ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ МЕН ТЕХНИКАСЫ

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ

TORAIGHYROV UNIVERSITY

НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 4 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

https://doi.org/10.48081/JPFT4234

Импакт-фактор РИНЦ – 0,216

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – PhD (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:
Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Кажибаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Жунусов Аблай Каиртасович – к.т.н., асс. профессор (доцент) (Павлодар, Казахстан);
Зарубежные члены редакционной коллегии:
Baigang Sun – PhD, профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия)
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).
Чайкин Владимир Андреевич– д.т.н., доцент (Сафоново, Россия);

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Асангалиев Е. А., Апшикур Б., Лутай С. С., Қалибек Ж.
Ірі қара малға арналған фито минералды-тұзды жалауыш брикеттерін жасау технологиясында прессteуді оңтайландыру.....7
Байбатша А. К., Нұғман Е. З., Мустафа А. Қ., Дюсебаев И. М.
WAAM технологиясымен дайындалған үлгілердің құрылымдық қасиеттеріне қабатаралық илемдеудің әсерін зерттеу.....22
Есжан Е., Аскарулы К., Евлампиева Е., Amrousse R., Азат С.
Разработка и применение MXene-наноструктур для высокоэффективных устройств накопления энергии.....35
Зигангиров С. А., Янюшкин А. С., Бульдяев И. В., Касенов А. Ж., Харченко С. П.
Оптимизация технологической подготовки изготовления деталей с глубокими микроотверстиями.....52
Kakimov M., Mursalykova M., Kokayeva G., Zholzhaksina A., Bembenek M.
Improvement of resource-saving equipment in safflower production by optimizing the husking process.....63
Калиев А. Б., Алимжанов М. Д., Русланов Б. Р., Балтабай Д. К., Аяганова А. Ж.
Напряженно-деформированное состояние элементов конструкции багажной аэродромной тележки и оценка их прочности.....75
Молдаханов Б. А., Дудкин М. В., Ким А. И., Яковлев В. С., Айтказина А. К.
Бұрандалы секциялар қадамының өсімдік қалдықтарын экструдтау өнімділігіне әсері.....88
Момынкулов З. З., Олжаев О. М., Турсынова А. Т., Тулешов А. К., Ибраев С. М.
Построение и генерация оптимальных траектории при помощи алгоритма обучения с подкреплением DDPG.....109
Musina Z. K., Aubakirova M. Z., Musina L. R., Tursunov N. K.
Conceptual approaches to improving the system of certification of the origin of goods at machine-building enterprises in the Pavlodar region: barriers, challenges, and development prospects.....122
Мырзахмет Б., Шеров К. Т., Магавин С. Ш., Сагитов А. А., Шеров А. К.
Экспериментальное исследование показателей качества насоса шестеренного снабженного с разжимными элементами.....137

Утеулов К. Т., Адуов М. А., Нукушева С. А.
Кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі
жұмыс органдарының орналасуын есептеу және негіздеу.....149

МЕТАЛЛУРГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

Абуова Р. Ж., Буршукова Г. А., Меркибаев Е. С., Акпанбаев Р. С., Бахытұлы Н.
Акустические характеристики и амплитуднозависимое демпфирование
новых легированных сталей в условиях ударного возбуждения.....169
Айкенбаева Н. Ж., Ашкеев Ж. А., Айнабекова С. С., Абишкенов М. Ж., Тавшанов И. С.
Физическое моделирование процесса, реализующего несимметричное
приложение внешних нагрузок в закрытой полости матрицы.....187
Алмагамбетов М. С., Джундибаев М. К., Халитов Т. В., Жумагалиев Е. У., Шабанов Е. Ж.
Окускование вторичных продуктов феррохромного
производства и исследование их прочностных характеристик.....204
Баймолданова Л. С., Погребняк А. Д., Сакенова Р. Е., Бектасова Г. С.
Микроструктурные изменения и элементное распределение
в покрытиях (TiAlSiY)N/CrN после имплантации ионами Au^-.....223
Бекимбаева Г. С., Сапинов Р. В., Шошай Ж., Куленова Н. А., Маркова С. Ю.
Ертіс мыс балқыту өндірісінің қождарының
материалдық құрамын зерттеу.....239
Жаксыбекова А. К., Исагулова Д. А., Ковалев П. А.
Научный обзор применения редкоземельных металлов
для улучшения механических свойств сплава марки 09Г2С.....249
Zhunusov A. K., Zhunusova A. K., Kenzhebekova A. Ye., Bakirov A. G., Tyulyubaev R. A.
Study of physical and chemical properties of granules
obtained from aluminum slags.....260
Койшина Г. М., Жолдасбай Е. Е., Нурсаинов И. Н., Ичева Ю. Б., Досмухамедов Н. К.
Қара металлургия шаңын қайта өңдеудің хлорлау
технологиясының экономикалық тиімділігін бағалау.....273
Kuandykov A. B.
Refining of primary aluminum from vanadium.....288
Kulikov V. Yu., Baiseitova Y. A., Kovaleva T. V., Tulegenova Sh. N.
Analysis of samples produced by melting using
briquettes made from ShH15 metal turnings.....296
Kulumbaev N. K., Suyundikov M. M., Bykov P. O.
Study of the effect of thermal insulation mixtures made from gold and slag
waste from ekibastuz coals on the quality of steel castings.....307

Makhambetov Ye. N., Burumbayev A. G., Akhmetov A. S., Sadyk Zh. O., Yucel Onuralp
Thermographic studies of charge materials for the synthesis of silicon carbide.....317
Мухтар А. А., Макашев А. С., Касымова Б. К., Кочегина Е. В., Атахан М. М.
Техногендік марганец қалдықтарын магниттік байыту мүмкіндігін зерттеу.....327
Тулепова М. А., Квон Св. С., Окишев К. Ю.
Жоғары хромды шойындарда әртүрлі салқындау
жылдамдықтарында карбидтік фазаның түзілуі.....338

КӨЛІК
ТРАНСПОРТ
TRANSPORT

Амангалиев Е. З., Шадхин Ю.И.
Параметрический синтез нелинейной системы «преобразователь
частоты–вентильный двигатель» электропривода электромобиля.....346
Балабекова К. Г., Корабай Р. Б., Болатова А. Б., Саменов Г. К.
Қозғалтқыштардың цилиндр поршенді топтарының
функционалды баптауын зерттеу.....363
Балгабеков Т. К., Оразалиев Б. Т., Карбаев Н. К., Махкамов Х. Х., Аймагамбетов С. Т.
Этанол-бензин отын қоспаларын пайдалана отырып, бензин
қозғалтқыштарының пайдалану сипаттамаларын жақсарту.....375
Бекетов Т. С., Лукиных В. Ф., Болатқызы С., Искаков Р. Х.
Автокөлікпен жолаушылар тасымалдаудың белсенді қауіпсіздігі.....388
Булатов Н. К., Ахметжанова А. Б.,Увалиева А. Б., Умбетова А. К., Манапов К. Б.
Распределение концентрации пыли при погрузочно-разгрузочных
работах конвейером в крытых транспортных средствах.....400
Kazhmuratova A. K., Kalkabayeva A. Y., Mukhanova G. S., Chakeeva K. S., Tymbayeva Zh. M.
Digital maturity as a component of digitalization development
in the transport and logistics sector.....418
Кегенбеков Ж. К., Конгуева А. К., Алипова А. Н.
Управление глобальными цепями поставок полупроводников
и минералов: библиометрический и контент-анализ.....435
Нуралина А. К., Муканов Р. Б., Альтаева Ж. Ж.
Методологические подходы к моделированию логистических систем на
примере туристической логистики южного региона Казахстана.....445
Оразымбетова А. Ш., Муханова Г. С., Киселёва О. Г., Избаирова А. С., Alfonz Antoni
Исследование цифровой трансформации
транспортно-логистических компаний в условиях индустрии 4.0.....459
Шукаманов Ж. Е., Сулейменова Г. А.
Оценка влияния систем интервального регулирования
на развитие транзитного потенциала казахстана.....472

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors 487

Авторларға арналған ережелер
Правила для авторов
Rules for authors 526

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics 536

МАШИНОСТРОЕНИЕ

FTAMP 55.57.99
https://doi.org/10.48081/SNDD5011

Е. А. Асангалиев[1], *Б. Апшикур[2], С. С. Лутай[3], Ж. Қалибек[4]
[1,2,3,4]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9007-3689
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2103-9513
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5732-0724
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2238-9083
*e-mail: bapshikur@edu.ektu.kz

ІРІ ҚАРА МАЛҒА АРНАЛҒАН ФИТО МИНЕРАЛДЫ-ТҰЗДЫ ЖАЛАУЫШ БРИКЕТТЕРІН ЖАСАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА ПРЕССТЕУДІ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада Қазақстандағы ауыл шаруашылығы жануарларынан алынатын өнімділікті арттыруға негізгі факторлардың бірі болатын күнделікті рационында физиологиялық тұрғыдан қажетті микро және макроэлементтердің болуымен олардың мөлшерін белгілеу бойынша кейбір зерттеу барыстары қарастырылған. Атап айтқанда, ірі қара малға арналған фитоминералды-тұзды жалау брикеттерін жасау технологиясында престеу процесінің оңтайлы қысымын анықтау және ұзақ мерзімді сақтау жағдайларында олардың физика-технологиялық және биологиялық қасиеттерін бағалау нәтижелері келтірілген. Брикеттер азықтық тұз негізінде әзірленіп, құрамына темір сульфаты (30 г), мырыш (46 г), мыс (3,6 г), калий йодиді (3 г) және С дәруменіне бай сібір шыршасының инелері (50 г) енгізілді. Престеу 20–60 МПа аралығындағы қысымда жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде 40 МПа қысыммен престелген брикеттердің тығыздығы 1,763±0,146 г/см³, ал беріктігі 6,68±0,56 МПа болғаны анықталды. Бұл көрсеткіштер брикеттердің құрылымдық тұрақтылығы мен сапасын қамтамасыз ететін оңтайлы параметрлер болып табылды. Ұзақ мерзімді сақтау (6 және 12 ай) барысында брикеттердің массасы мен ылғалдылығы аздап төмендегенімен, тығыздық пен беріктік салыстырмалы түрде тұрақты сақталды. Жануарлардың жалау белсенділігі жоғары болып, тәулігіне орта есеппен 30–50 г брикет тұтынған. Бақылау жүргізілген барлық топтарда сиырлардың физиологиялық жағдайында ауытқулар тіркелмеді. Зерттеу нәтижелері фитоминералды-тұзды брикеттердің құрамы мен құрылымы олардың биологиялық тартымдылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ететінін көрсетті. Осылайша, 40 МПа қысыммен дайындалған брикеттер мал шаруашылығында тиімді, ұзақ сақталатын және теңгерімді минералдық қоспа ретінде ұсынылады.

Кілтті сөздер: фитоминералды-тұзды брикеттер, ірі қара мал, престеу қысымы, микроэлементтер, тығыздық пен беріктік, жемшөп қоспалары.

Кіріспе

Ауыл шаруашылығы жануарларының өнімділігін арттыруда толыққанды және теңгерімді азықтандырудың маңызы зор [1; 2; 8]. Әсіресе, ірі қара малдың рационында макро- және микроэлементтердің тапшылығы жиі кездеседі, бұл олардың физиологиялық жағдайына, сүт өнімділігіне және жалпы денсаулығына кері әсерін тигізеді [3; 4]. Микроэлементтер -темір, мыс, мырыш, йод және калий – жануардың зат алмасу процестеріне, иммундық жүйесінің белсенділігіне және ұрпақ өрбіту функцияларына тікелей әсер етеді [13].

Табиғи азық құрамындағы элементтердің жетіспеушілігі, әсіресе, сүрлем, сабан және пішен сияқты дәстүрлі азықтарда жиі кездеседі. Шығыс Қазақстан жағдайында жүргізілген зерттеулер мал азығында калий, темір, мыс және мырыш сияқты маңызды элементтердің төмен деңгейде болатынын көрсетті [3; 20]. Мұндай жағдайда қосымша минералды және витаминдік қоспаларды қолдану қажеттілігі туындайды. Соңғы жылдары тұз негізіндегі жалау брикеттері минералды қоспа түрінде кеңінен қолданылып келеді, себебі олар мал ағзасына қажетті натрий мен басқа да элементтердің жеткізілуін қамтамасыз етеді [1; 2].

Минералды-тұзды брикеттерді дайындау кезінде тұзды микронутриенттермен және витаминдермен байытып, оларды престеу арқылы тығыз құрылымды, ұзақ сақталатын және қолдануға ыңғайлы өнім алу технологиясы әзірленуде [9; 10]. Брикеттерді жалау арқылы малдар өздерінің физиологиялық қажеттілігіне сәйкес тұз және микроэлементтерді еркін тұтына алады, бұл мал ағзасындағы элементтер балансын оңтайландырады және жалпы өнімділікті арттырады [4; 5].

Фитоминералды-тұзды брикеттер құрамына тек минералды заттар ғана емес, сонымен қатар өсімдік текті биологиялық белсенді қоспалар енгізу – инновациялық тәсілдердің бірі болып отыр. Мысалы, С дәруменіне бай сібір шыршасының инелері брикеттердің антиоксиданттық қасиеттерін күшейтіп, олардың биологиялық тартымдылығын арттырады [1;58-б]. Бұл компоненттер ірі қара малдың қоректік қажеттілігін жан-жақты қанағаттандыруға мүмкіндік береді және малдың физиологиялық жағдайына оң әсер етеді.

Минералды брикеттердің тиімділігін қамтамасыз ететін маңызды технологиялық параметрлердің бірі - престеу қысымы. Қысымның дұрыс таңдалуы брикеттердің тығыздығы мен беріктігін, сондай-ақ сақтау барысында құрылымының тұрақтылығын анықтайды [8; 10; 18]. Престеу процесі жеткіліксіз болса, брикеттің құрылымы бос және оңай ыдырайтын болады, ал шамадан тыс қысым экономикалық жағынан тиімсіз болуы мүмкін [7; 17].

Осыған байланысты, фитоминералды-тұзды брикеттер дайындау барысында престеу параметрлерін оңтайландыру қажеттілігі туындайды. Бүгінгі таңда ғылым мен өндірісте брикеттердің құрылымдық, технологиялық және биологиялық сипаттамаларын кешенді зерттеу арқылы ең тиімді шешімдерді табу өзекті мәселеге айналып отыр [1; 6; 19]. Осы зерттеудің мақсаты – фитоминералды-тұзды

брикеттерді дайындау кезінде престеу қысымының оңтайлы деңгейін анықтау және алынған брикеттердің сақтау кезіндегі сапалық көрсеткіштері мен малға тартымдылығын бағалау болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Фитоминералды-тұзды жалау брикеттерін өндіру үшін негіз ретінде азықтық ас тұзы алынды. Бұл компонент брикеттің негізгі массасын құрап, басқа микроэлементтер мен витаминдік қоспаларға тасымалдаушы орта ретінде қызмет етеді. Шығыс Қазақстан өңіріндегі жеке шаруашылықтарда ірі қара малдың рационын зерттеу нәтижелері олардың ағзасында калий, темір, мыс және мырыш элементтерінің тапшылығы жиі кездесетінін көрсетті [3]. Осыған байланысты, брикет құрамына аталған микроэлементтердің биожетімді қосылыстары қосылды.

Минералды қоспалар ретінде келесі заттар пайдаланылды:

– Темір сульфаты ($FeSO_4$) – 30 г,
– Көмірқышқылды мырыш ($ZnCO_3$) – 46 г,
– Калий йодиді (KI) – 3 г,
– Көмірқышқылды мыс ($CuCO_3$) – 3,6 г.
– Сібір шыршасының инелері-50 г;
– Азықтық тұз-5000 Г дейін.

Аталған компоненттердің мөлшері 1 ірі қара малға арналған тәуліктік физиологиялық қажеттілікке негізделіп есептелді, ал оларды тұз брикеттеріне енгізу мал организміне қажетті минералды элементтердің жеткізілуін қамтамасыз етеді. Зерттеу барысында сиырлардың бір тәулікте жалау арқылы орта есеппен 30–50 г тұз брикетін тұтынатыны анықталды, бұл көрсеткіш олардың натрийге деген ең төменгі күнделікті қажеттілігіне сәйкес келеді.

Өсімдік текті биологиялық белсенді қоспа ретінде сібір шыршасының (Abies sibirica) инелері пайдаланылды. Бұл шикізат С дәруменінің және басқа да фитонутриенттердің табиғи көзі ретінде танымал. Инелер алдын ала кептіріліп, 0,1–0,2 мм дейінгі бөлшектерге ұнтақталды. Бұл ұнтақ брикеттің массасына біркелкі таралып, өнімге жасыл түсті реңді беріп, визуалды тартымдылығын арттырады. Инелердің қосылуы брикеттердің биологиялық құндылығын едәуір жоғарылатып, иммуномодуляциялық және антиоксиданттық әсер береді [14; 15; 16].

Жалпы, бір брикеттің массасы 5 кг-ды құрайды. Бұл көлем әрқайсысы шамамен 30–50 г мөлшерінде тұтынылатын 100 дозаға сәйкес келеді, яғни бір брикет орта есеппен бір ірі қара мал үшін 100 күндік минералдық және витаминдік қосымша көзі ретінде қызмет ете алады. Барлық компоненттерді араластыру тот баспайтын металдан жасалған сыйымдылығы бар ВПСМ-50 сусымалы материалдарының араластырғышында жүзеге асырылды. Жалау брикетін дайындауға арналған технологиялық процесті әзірлеу кезінде «Қалиақпаров У» ЖК кәсіпорнында жалау брикетін дайындауға арналған арнайы престе 20, 30, 40, 50 және 60 МПа камерадағы қысым кезінде престеу құрғақ әдіспен жүзеге асырылды. Пресс қалыптау камерасы гидравликалық жүйе арқылы жасалған жоғары қысымға төтеп бере алатын қалың қабырғалы тот баспайтын болаттан жасалған [11;70-б.].

Камераның өлшемдері 15×15×15 см болды, бұл оңтайлы өлшемдегі брикеттерді алуға мүмкіндік береді (1-суретке сәйкес).

1-сурет – Жалау брикеттерін жасауға арналған пресс

Жасалынған минералды-тұзды брикеттерде сыртқы түрі, массасы, ылғалдылығы, тығыздығы және беріктігі, негізгі технологиялық көрсеткіштері зерттеу мақсатында анықталды. Массасы CAS SW-20 электронды таразысында контактілі электр ылғал өлшегішінің көмегімен 4 мг ылғалдылықпен анықталды.

Жемшөп қоспаларының ең маңызды технологиялық көрсеткіштерінің бірі, олардың тығыздығы мен беріктігі болып табылады. Өнімдердің сапасы, олардың құрылымы, мөлшерлеу дәлдігі және белсенді заттардың биологиялық жетімділігі оларға байланысты болады [3]. Тығыздық келесі формула бойынша есептелді.

$$P = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Мұндағы: P – заттың тығыздығы (брикеттер);
M – брикет массасы (г);
V – брикеттің көлемі (см^3).
Беріктік гидравликалық престе анықталды (2-суретке сәйкес).

2-сурет – Жалау брикеттерінің беріктігін анықтауға арналған гидравликалық пресс

Фитоминералды-тұзды жалау брикеттерінің физика-технологиялық қасиеттері мен биологиялық тартымдылығы жаңадан дайындалған өнімдерде және 6 және 12 ай сақталғаннан кейін зерттелді. Бұл мақсатта 40 МПа қысыммен престелген брикеттер пайдаланылды. Сақтау үдерісі бөлме температурасында, құрғақ әрі жақсы желдетілетін қоймада жүргізілді.

Алынған деректер математикалық статистика әдістерімен өңделді [10, 61-б.]. Сонымен қатар, сақтау мерзімінің ұзақтығы брикеттердің жануарлар үшін тартымдылығына әсер етуі мүмкін болғандықтан, олардың 6 және 12 айдан кейінгі биологиялық тартымдылық деңгейін бағалау зерттеудің маңызды құрамдас бөлігі болып табылады.

Осы мақсатта 2023 жылдың жаз айларында Шығыс Қазақстан облысы, Ұлан ауданындағы «Багратион» шаруа қожалығының базасында қолданбалы зерттеу жүргізілді. Тәжірибе үшін лактация кезеңіндегі 48 сиыр іріктеліп алынып, әрқайсысында 12 бастан тұратын 4 топқа бөлінді: үш тәжірибелік және бір бақылау тобы.

Бірінші тәжірибелік топтағы сиырлар 2 ай бойы жаңадан дайындалған фитоминералды-тұзды жалау брикеттерін тұтынды. Екінші топтағы жануарларға 6 ай бойы сақталған брикеттер ұсынылды, ал үшінші топтағы сиырлар 12 ай сақталған брикеттермен қамтамасыз етілді. Бақылау тобындағы жануарлар осы кезеңде дәстүрлі тұз брикеттерін жалады. Барлық брикеттер сиырлардың азықтандыру аймағына еркін қолжетімді етіп орналастырылды. Зерттеу барысында жануарлардың негізгі рационы жасыл шөптен және тәулігіне 2–3 кг көлеміндегі құрама жемнен құралды. Азық мөлшері сиырлардың күнделікті 12–14 азықтық өлшем бірлігін қамтамасыз ететін деңгейде сақталды.

Сиырлардың брикеттерге деген қызығушылығы мен жалау белсенділігі күнделікті тіркеліп отырды. Сонымен қатар, барлық жануарларға клиникалық бақылау жүргізіліп, олардың физиологиялық күйі мен жалпы денсаулығы бағаланды.

Престеу нәтижесінде алынған брикеттің өлшемдері 15×15 см және биіктігі 12 см-ді құрады. Өсімдік текті компоненттердің (әсіресе, сібір шыршасының ұнтағының) енгізілуіне байланысты жалау брикеттеріне тән жасыл рең байқалды. 3-суретте сол жақта фитоминералды-тұзды брикет, ал оң жақта тек тұздан тұратын брикет көрсетілген.

3-сурет – Ірі қара малға арналған жалау брикеттері:
сол жақта–фитоминералды – тұз; оң жақта–тұз

Зерттеуде қолданылған шикізат құрамы, өндірістік технологиялық режимдер (престеу қысымы), сақтау жағдайлары және тәжірибелік дизайн мал азығына арналған фитоминералды-тұзды жалау брикеттерінің физика-технологиялық және биологиялық қасиеттерін жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер және талқылау

Жүргізілген зерттеулер мен математикалық өңдеу нәтижелері бойынша фитоминералды-тұзды жалау брикеттерінің бастапқы тығыздығы 1,512±0,138 г/см³, ал тұз брикеттерінде бұл көрсеткіш 1,522±0,126 г/см³ деңгейінде болғаны анықталды. Престеу процесі кезінде қысым 40 МПа-ға дейін артқан жағдайда, фитоминералды-тұзды брикеттердің тығыздығы 1,763±0,146 г/см³-ке дейін, ал тұз брикеттерінде 1,836±0,148 г/см³-ке дейін ұлғайды.

Екі жағдайда да тығыздықтың өсуі бастапқы мәндерге қатысты 12,1 %-ға тең болып, бұл айырмашылықтың статистикалық тұрғыдан сенімді екені анықталды (P < 0,05). Жоғары қысым жағдайында фитоминералды және тұз брикеттерінің тығыздығы белгілі бір шекке дейін ұлғайғанымен, өсім қарқыны салыстырмалы түрде біркелкі сақталды.

Фитоминералды-тұзды брикеттердегі тығыздықтың салыстырмалы түрде төмен болуы, олардың құрамындағы ұсақталған сібір шыршасының инелері мен қосылған микроэлементтердің көлемінің тұзбен салыстырғанда көбірек орын

алуымен байланысты болуы мүмкін. Бұл компоненттердің көлемдік үлесі артып, нәтижесінде брикеттің жалпы тығыздығына кері әсер етеді [8, 20, 113-б].

Брикеттердің орташа салмағы 5000±0,086 г құрады. Фитоминералды және тұзды брикеттердің массалық көрсеткіштері барлық қысым шамаларында тұрақты болып қалады. Фитоминералды – тұзды брикеттердің ылғалдылығы барлық қысым көрсеткіштерімен бірдей 12,6±1,6 % шегінде болды, тұзды брикеттерде бұл көрсеткіш – 11,8±1,4 % құрады.

Брикеттердің бастапқы биіктігі 15±0,5 см аралығында болды. Престеу процесі барысында, 40 МПа қысым әсерінен, фитоминералды-тұзды және тұзды брикеттердің биіктігі орта есеппен 12,2±0,3 см-ге дейін төмендеді. Алайда, жоғары қысым жағдайында брикеттердің биіктігінің төмендеуі статистикалық тұрғыдан (P > 0,05), сенімді айырмашылық көрсетпеді (1-кесте).

Бұл нәтижелер престеу процесінің брикет өлшемдеріне әсерін бағалауда маңызды көрсеткіш болып табылады. Биіктіктің төмендеуі тығыздықтың артуымен қатар жүреді, бұл брикеттердің құрылымдық тығыздалуын білдіреді.

1-кесте – Фито минералды-тұзды брикеттердің кейбір физика-технологиялық көрсеткіштері-престеу кезінде әртүрлі қысымдағы жалау

Үлгі №	Престеу кезіндегі қысым (МПа)	Брикеттің биіктігі (см)		Брикеттің тығыздығы (г/см³)		Брикеттің беріктігі (МПа)	
		фито-минералды	тұзды	фито-минералды	тұзды	фито-минералды	тұзды
Бастапқы күйі		15±0,5	15±0,5				
1	10	14,7±0,5	14,6±0,5	1,512±0,138	1,522±0,126	2,22±0,16	2,44±0,18
2	20	14,3±0,5	14,2±0,5	1,554±0,128	1,565±0,128	3,46±0,24	3,62±0,28
3	30	13,4±0,3	13,1±0,3	1,658±0,136	1,696±0,134	5,28±0,32	5,78±0,34
4	40	12,6±0,3	12,1±0,3	1,763±0,146	1,836±0,158	6,68±0,56	7,24±0,58
5	50	12,2±0,3	12,0±0,3	1,821±0,156	1,852±0,152	7,25±0, 60	8,06±0, 64
6	60	11,8±0,3	11,7±0,3	1,883±0,168	1,899±0,166	8,17±0,66	8,55±0,72
Ескерту: n=8							

Сонымен қатар, престеуден кейін алынған барлық жалау брикеттерінің көлемі шамамен 2700±32 см³ деңгейінде сақталды, бұл олардың құрылымдық тұрақтылығын және өндірістік біркелкілігін көрсетеді [11,70-б].

Брикеттердің беріктігі престеу процесінде 10-нан 40 МПа-ға дейін сенімді түрде артады және фитоминералды-тұзды брикеттерде 6,68±0,56 МПа, тұзды брикеттерде 7,24±0,58 МПа құрайды. Екі жағдайда да P<0,05. Престеу процесінде қысымның одан әрі жоғарылауымен брикеттердегі беріктіктің жоғарылау қарқындылығы баяулайды және ол онша сенімді емес (p<0,5).

Айта кету керек, 20–30 МПа қысыммен алынған фитоминералды және тұзды брикеттер аз тығыз және берік болды және шамалы физикалық әсермен ыдырады.

Әрі қарай, ұзақ уақыт сақтау кезінде фитоминералды-тұзды брикеттердің физика-технологиялық көрсеткіштері зерттелді. Сақтау үшін 40 МПа қысыммен алынған жалау брикеттері қолданылды, өйткені бұл қысым параметрі оңтайлы

технологиялық қасиеттері бар брикеттерді алуды қамтамасыз етеді. Сақтау процесінде фитоминералды-тұзды жалау брикеттерінің массасы 120 г-ға және тұз брикеттерінің 160 г-ға азаюы анықталды, екі жағдайда да P<0,05.

Соңғысы сақтау процесінде брикеттердегі ылғалдың айтарлықтай жоғалуына байланысты. Фитоминералды-тұзды брикеттерде ылғалдылық 3,8±0,4 % дейін, тұзды брикеттерде 3,4±0,4 % дейін төмендейді. Екі жағдайда да P<0,05.

Тиісінше, бұл өзгерістер фитоминералды-тұзды жалау брикеттерінде де, тұз брикеттерінде де тығыздықтың кейбір өзгеруіне әкеледі. Алайда, бұл өзгерістер статистикалық тұрғыдан дұрыс емес.

Сонымен қатар, сақтау кезінде фитоминералды-тұзды жалау брикеттерінде де беріктік көрсеткіштері 10,24±0,64 МПа дейін, ал тұз брикеттерінде 11,42±0,68 МПа дейін артады. Бұл ең сенімді брикеттерде 12 ай сақтау кезінде байқалады (P<0,05).

Массаның төмендеуіндегі айырмашылық фитоминералды-тұзды брикеттер құрылымының әртүрлілігі, ылғалдың жоғалу процесін тежейтіндігіне байланысты болуы мүмкін (2-кесте).

2-кесте – Ұзақ мерзімді сақтау кезінде фито минералды-тұзды жалау брикеттерінің кейбір физика-технологиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштері	Брикеттер	Брикет көрсеткіштері		
		түпнұсқасы	6 айдан кейін	12 айдан кейін
Массасы (г)	фито минералды-тұзды	5000 ±0,086	4930 ±0,085	4880 ±0,082
	тұзды	5000 ±0,086	4910 ±0,082	4840 ±0,081
Ылғалдылық (%)	фито минералды-тұзды	12,6±1,1	6,6±0,6	3,8±0,4
	тұзды	11,8±1,1	6,2±0,6	3,4±0,4
Тығыздық (г/см^3)	фито минералды-тұзды	1,763±0,146	1,825±0,138	1,807±0,134
	тұзды	1,836±0,158	1,818±0,142	1,792±0,132
Беріктік (МПа)	фито минералды-тұзды	6,68±0,56	9,46±0,60	10,24±0,64
	тұзды	7,24±0,58	9,46±0,60	11,42±0,68
Ескерту: n=8				

Жануарлардың фитоминералды-тұзды жалау брикеттеріне деген тартымдылығын бағалау нәтижелері, олардың дәмдік сапасының сиырлар үшін қолайлы екенін көрсетті. Зерттеу барысында барлық топтағы жануарлар, сақтау мерзіміне қарамастан, ұсынылған брикеттерді белсенді түрде жалады. Орта есеппен бір сиыр тәулігіне 30–50 г аралығында фитоминералды-тұзды брикеттерді тұтынды. Бақылау тобындағы жануарлар да ұқсас мөлшерде тұз брикеттерін жалағаны тіркелді.

Фитоминералды брикеттерді жалау арқылы жануарлар ағзасына тұзбен қатар, олардың рационында жиі жетіспейтін калий, темір, мыс және мырыш сияқты маңызды микроэлементтер, сондай-ақ сібір шыршасы инелерінен алынған витаминдер түсті. Бұл қосымша заттар жануарлардың физиологиялық қажеттіліктерін тиімді қамтамасыз етті.

Брикеттердің физика-механикалық сипаттамалары (тығыздығы мен беріктігі) олардың қора ішінде, мал еркін қозғала алатын аймақтарда орналасуы кезінде

құрылымдық тұтастығын сақтап қалуына мүмкіндік берді. Бұл олардың қолдану барысында ыдырамауын қамтамасыз етіп, толық тұтынылуына жағдай жасады.

Зерттеу барысында фитоминералды-тұзды және тұз брикеттерінің толық жалауы шамамен 8–9 күн ішінде жүзеге асты. Тәжірибелік және бақылау топтарындағы жануарлар арасында физиологиялық жағдайдың өзгеруі немесе қандай да бір патологиялық ауытқулар тіркелмеді, бұл ұсынылған брикеттердің қауіпсіздігі мен биологиялық сәйкестігін растайды.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу жұмыстары ҚР ҒЖБМ AP19678322 «Ірі қара малға арналған минералды-витаминдік премикс-лизунец өндіруге арналған машиналар мен технологиялар кешенін әзірлеу» жобасы аясында жүргізілді.

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде фитоминералды-тұзды жалау брикеттерін дайындау технологиясында престеу қысымының маңызды рөл атқаратыны анықталды. Әртүрлі қысымда алынған брикеттердің физика-технологиялық көрсеткіштері салыстырылып, 40 МПа қысымның оңтайлы екені дәлелденді. Бұл жағдайда брикеттердің тығыздығы 1,763±0,146 г/см^3, ал беріктігі 6,68±0,56 МПа деңгейіне жетті. Престеу қысымының одан әрі жоғарылауы тығыздық пен беріктікке шамалы ғана әсер еткенімен, экономикалық және технологиялық тұрғыдан тиімсіз болып табылады.

Ұзақ мерзімді сақтау жағдайында (6 және 12 ай) жалау брикеттерінің массасы мен ылғалдылығы аздап төмендегенімен, тығыздығы мен беріктігі салыстырмалы түрде тұрақты сақталып, олардың құрылымы мен қолдану ыңғайлылығы бұзылмайтыны дәлелденді. Бұл көрсеткіштер жалау брикеттерінің мал қораларында және мал тарапынан жалау процесінде ыдырамай, өз формасын сақтап қалуға мүмкіндік береді.

Сондай-ақ, тәжірибелік сынақтар барысында фитоминералды-тұзды брикеттер сиырлар тарапынан жоғары биологиялық тартымдылық көрсетті. Барлық топтағы жануарлар жалау брикеттерін тәулігіне орта есеппен 30-50 г мөлшерде тұтынған. Бұл мал организміне қажетті натриймен қатар, калий, мыс, темір, мырыш сияқты микроэлементтер мен сібір шыршасының инелері құрамындағы С дәруменінің түсуін қамтамасыз етті. Жануарлардың физиологиялық жағдайында ешқандай патологиялық ауытқулар тіркелген жоқ.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер фитоминералды-тұзды жалау брикеттерінің ірі қара малдың рационында физиологиялық және технологиялық тұрғыдан тиімді жемшөп қоспасы бола алатынын көрсетеді. Жасалған брикеттердің құрамындағы микроэлементтер мен өсімдік тектес биологиялық белсенді қоспалар олардың азықтық құндылығын арттырады. Сондықтан 40 МПа қысыммен дайындалған фитоминералды-тұзды брикеттерді өндіріске енгізу мал шаруашылығы өнімділігін арттыруға ықпал етуі мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Асангалиев, Е. А., Дудкин, М. В., Данилов, М. С., Воробьев, А. Л, Лутай, С. С.** Минерально-солевые брикеты-лизунцы с хвоей пихты сибирской для КРС // Вестник ВКТУ-2023. – № 4. – С. 60–68. – https://doi.org/10.51885/1561-4212_2023_4_60.

2 **Ахметова, А. С., Поезжалов, В. М.** Технология изготовления минерально-солевых брикетов с микроэлементами способом вибропрессования // Сельскохозяйственный журнал. – 2015. – № 1(8). – С. 15–18.

3 **Лыткина, Л. И., Шенцова, Е. С., Апалихина, О. А., Переверзева, С. А.** Оптимизация технологии кормовых брикетов-лизунцов с применением парокомпрессионного насоса // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – Т. 79. – № 2. – С. 61–67.

4 **Воронова, И. В., Игнатьева, Н. Л., Немцева, Е. Ю.** Современные аспекты кормления молочных коров // Вестник Ульяновской государственной сельхоз академии. – 2021. – № 1(53). – С. 164–169. – https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-1-164-169.

5 **Микко, О., Анттила, О.** Правильное кормление до и после отела // Животноводство России. – 2012. – № 3. – С. 38–39.

6 **Данилов, М. С., Воробьев, А. Л., Асангалиев, Е. А., Лутай, С. С.** Минеральное обеспечение коров в крестьянских хозяйствах Восточного Казахстана // Исследования, результаты. – 2016. – № 3. – С. 31–38.

7 **Крюков, В. С., Пикалова, И. Н.** К проблеме однородности распределения микродобавок при производстве комбикормов и премиксов // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2010. – № 2. – С. 97–111.

8 **Царев, Е. М., Волдаев, М. Н., Герасимов, М. К., Хисамеева, А. Р.** Исследование процесса прессования древесных брикетов из отходов лесопромышленных производств // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 113–116.

9 **Искаков, Р. М., Абильжанулы, Т., Гуляренко, А. А., Хан, В. А., Ремшев, Е. Ю.** Исследование высушивания кормов в комбинированном измельчающе-сушильном и перемешивающем устройстве // Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени С. Сейфуллина : Междисциплинарный. – 2024. – № 3(122). – С. 55–63. – https://doi.org/10.514 52/kazatu.2024.3(122).1747.

10 **Шенцова, Е. С., Лыткина, Л. И., Апалихина, О. А., Муравьев, А. С.** Выбор рациональных параметров технологических условий процесса смешивания при получении кормовых брикетов. Вестник ВГУИТ. – 2016. – № 3. – С. 61–67.

11 **Афанасьев, В. А., Киселев, А. А.** Разработка технологии влажного прессования углеводно-витаминно-минеральных добавок с повышением содержания мелассы // Вестник ВГУИТ. – 2015. – № 1. – С. 70–73.

12 **Asangaliev, E. A., Danilov, M. S., Lutai, S. S., Karmanov, D. K., Mlynchak, M.** Development of technology for salt-licker briquettes with bentonite for the prevention of mineral deficiency in cattle // Вестник ВКТУ. – 2024. – № 3. – С. 5–12. – https://doi.org/10.51885/1561-4212_2024_3_5.

13 **Гаврин, Д. В.** Дифференцированная диагностика содержания железа, меди, йода в кормах с учетом суббиогеохимических провинций Нижегородской области // Молочное и мясное скотоводство. – 2011. – № 5. – С. 20–22.

14 **Натынчик, Т. М., Лемешевский, В. О.** Новые технологии в кормлении крупного рогатого скота. Вестник Полесского государственного университета // Серия природоведческих наук. – 2014. – № 1. – С. 34–37.

15 **Абитбек, А. Е., Жиенбаева, С. Т., Аскарбеков, Э. Б., Нургожина, Ж. К.** Рациональное использование новых сортов фуражных культур при производстве комбикормов для крупного рогатого скота // Вестник Алматинского технологического университета. – 2025. – Т. 147. – № 1.– С. 70–76. – https://doi.org/10. 48184/2304-568X-2025-1-70-76.

16 **Shrinivasa, D. J., Mathur, S.** Compound Feed Production for Livestock // Current Science. – 2021. – 118. – https://doi.org/10.18520/cs/v118/i4 /553-559.

17 **Ali, A., Kumari, M., Manisha., Sumit, T., Mahesh, K., Deepak, Ch., Ravinder, K. S.** Insight into the Biomass-Based Briquette Generation from Agro-Residues: Challenges, Perspectives, and Innovations // Bioenerg. – 2024. – Res. 17. – P. 816–856. – https://doi.org/10. 1007/s12155-023-10712-5.

18 **Kaur, A., Kumar, A., Singh, P., Kundu, K.** Production, Analysis and Optimization of Low Cost Briquettes from Biomass Residues // Advances in Research. – 2017. – 12. – P. 1–10. – https://doi.org/10.9734/AIR/2017/37630.

19 **Djuragic, O., Čabarkapa, I., Šeremešić, M. M., Rakita, S., Tomičić, Z.** Feed Additives, Their Role, and Technological Properties // In: Arsenos, G., Giannenas, I. (eds) Sustainable Use of Feed Additives in Livestock. – Springer, Cham. – 2023. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-42855-5_2.

20 **Samoylovskaya, N.** The application of salt briquettes with ivermectin for wild animals for parasitos // Veterinary Medicine Journal. – 2019. – № 22. – P. 34–37. – https://doi.org/10.30896/0042-4846.2019.22.6.34-37.

REFERENCES

1 **Asangaliev, E. A., Dudkin, M. V, Danilov, M. S, Vorob`ev, A. L, Lutaj, S. S.** Mineral`no-solevy`e brikety`-lizuncy s xvoej pixty` sibirskoj dlya KRS. [Mineral-salt briquettes-lizuntsy with coniferous Siberian fir for KRS] // Vestnik VKTU-2023. – № 4. – P. 60–68. – https://doi.org/10.51885/1561-4212_2023_4_60.

2 **Axmetova, A. S., Poezzhalov, V. M.** Texnologiya izgotovleniya mineral`no-solevy`x briketov s mikroe`lementami sposobom vibropressovaniya. [Technology for the production of mineral-salt briquettes with microelements using vibration pressing] // Sel`skoxozyajstvenny`j zhurnal. – № 1(8). – 2015. – P. 15–18.

3 **Ly`tkina, L. I., Shenczova, E. S., Apalixina, O. A., Pereverzeva, S. A.** Optimizaciya texnologii kormovy`x briketov-lizunczov s primeneniem parokompressionnogo nasosa. [Optimization of feed lick briquette technology using a vapor compression pump] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenerny`x texnologij. – T. 79. – № 2. – 2017. – P. 61–67.

4 **Voronova, I. V., Ignat`eva, N. L., Nemceva, E. Yu.** Sovremenny`e aspekty` kormleniya molochny`x korov. [Modern aspects of feeding dairy cows] // Vestnik Ul`yanovskoj gosudarstvennoj sel`xoz akademii. – № 1(53). – 2021. – P. 164–169. – https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-1-164-169.

5 **Mikko, O., Anttila, O.** Pravil`noe kormlenie do i posle otela.[Proper feeding before and after calving.] // Zhivotnovodstvo Rossii. – № 3. – 2012. – P. 38–39.

6 **Danilov, M. S., Vorob`ev, A. L., Asangaliev, E. A., Lutaj, S. S.** Mineral`noe obespechenie korov v krest`yanskix xozyajstvax Vostochnogo Kazaxstana. [Mineral supply of cows in peasant farms of Eastern Kazakhstan] Issledovaniya, rezul`taty`. – № 3. – 2016. – P. 31–38.

7 **Kryukov, V. S., Pikalova, I. N.** K probleme odnorodnosti raspredeleniya mikrodobavok pri proizvodstve kombikormov i premiksov. [On the problem of uniform distribution of microadditives in the production of compound feed and premixes] Problemy` biologii produktivny`x zhivotny`x. – № 2. – 2010. – P. 97–111.

8 **Czarev, E. M., Voldaev, M. N., Gerasimov, M. K., Xisameeva, A. R.** Issledovanie processa pressovaniya drevesny`x briketov iz otxodov lesopromy`shlenny`x proizvodstv. [Study of the process of pressing wood briquettes from forest industry waste] Vestnik Kazanskogo texnologicheskogo universiteta. – Vol. 15. – № 3. – 2012. – P. 113–116.

9 **Iskakov, R. M., Abil`zhanuly`, T., Gulyarenko, A. A., Xan, V. A., Remshev, E. Yu.** Issledovanie vy`sushivaniya kormov v kombinirovannom izmel`chayushhe-sushil`nom i peremeshivayushhem ustrojstve. [Study of feed drying in a combined crushing, drying and mixing device] Vestnik nauki Kazaxskogo agrotexnicheskogo issledovatel`skogo universiteta im. S. Sejfullina : Mezhdisciplinarny`j. – № 3(122). – 2024. – P. 55–63. – https://doi.org/10.51452/kazatu.2024.3 (122).1747.

10 **Shenczova, E. S., Ly`tkina, L. I., Apalixina, O. A., Murav`ev, A. S.** Vy`bor racional`ny`x parametrov texnologicheskix uslovij processa smeshivaniya pri poluchenii kormovy`x briketov. [Selection of rational parameters of technological conditions of the mixing process in the production of feed briquettes] Vestnik VGUIT. – № 3. – 2016. – P. 61–67.

11 **Afanas`ev, V. A., Kiselev, A. A.** Razrabotka texnologii vlazhnogo pressovaniya uglevodno-vitaminno-mineral`ny`x dobavok s povy`sheniem soderzhaniya melassy`. [Development of a technology for wet pressing of carbohydrate-vitamin-mineral supplements with increased molasses content] Vestnik VGUIT. – № 1. – 2015. – P. 70–73.

12 **Asangaliev, E. A., Danilov, M. S., Lutai, S. S., Karmanov, D. K., Mlynchak, M.** Development of technology for salt-licker briquettes with bentonite for the prevention of mineral deficiency in cattle. Vestnik VKTU. – № 3. – 2024. – P. 5–12. – https://doi.org/10.51885/1561-4212_2024_3_5.

13 **Gavrin, D. V.** Differencirovannaya diagnostika soderzhaniya zheleza, medi, joda v kormax s uchetom subbiogeoximicheskix provincij Nizhegorodskoj oblasti. [Differential diagnostics of iron, copper, and iodine content in feed, taking into account the subbiogeochemical provinces of the Nizhny Novgorod region] Molochnoe i myasnoe skotovodstvo. – № 5. – 2011. – P. 20–22.

14 **Naty`nchik, T. M., Lemeshevskij, V. O.** Novy`e texnologii v kormlenii krupnogo rogatogo skota. [New Technologies in Cattle Feeding. Bulletin of Polesie State University] Vestnik Polesskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya prirodovedcheskix nauk. – № 1. – 2014. – P. 34–37.

15 **Abitbek, A. E., Zhienbaeva, S. T., Askarbekov, E`. B., Nurgozhina, Zh. K.** Racional`noe ispol`zovanie novy`x sortov furazhny`x kul`tur pri proizvodstve kombikormov dlya krupnogo rogatogo skota. [Rational use of new varieties of forage crops in the production of compound feed for cattle] Vestnik Almatinskogo texnologicheskogo universiteta. – Vol. 147. – № 1. – 2025. – P. 70–76. – https://doi.org/10.48184/2304-568X-2025-1-70-76.

16 **Shrinivasa, D. J., Mathur, S.** Compound Feed Production for Livestock. Current Science. – 2021. – 118. – https://doi.org/10.18520/cs/v118/i4 /553-559.

17 **Ali, A., Kumari, M., Manisha., Sumit, T., Mahesh, K., Deepak, Ch., Ravinder, K. S.** Insight into the Biomass-Based Briquette Generation from Agro-Residues: Challenges, Perspectives, and Innovations. Bioenerg. – 2024. – Res. 17. – P. 816–856. – https://doi.org/10. 1007/s12155-023-10712-5.

18 **Kaur, A., Kumar, A., Singh, P., Kundu, K.** Production, Analysis and Optimization of Low Cost Briquettes from Biomass Residues. Advances in Research. – 2017. – 12. – P. 1–10. – https://doi.org/10.9734/AIR/2017/37630.

19 **Djuragic, O., Čabarkapa, I., Šeremešić, M.M., Rakita, S., Tomičić, Z.** Feed Additives, Their Role, and Technological Properties. In: Arsenos, G., Giannenas, I. (eds) Sustainable Use of Feed Additives in Livestock. Springer, Cham. – 2023. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-42855-5_2.

20 **Samoylovskaya, N.** The application of salt briquettes with ivermectin for wild animals for parasitos. Veterinary Medicine Journal. – 2019. – № 22. – P. 34–37. – https://doi.org/10.30896/0042-4846.2019.22.6.34-37.

23.10.25 ж. баспаға түсті.
23.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
25.10.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Е. А. Асангалиев[1], *Б. Апшикур[2], С. С. Лутай[3], Ж. Калибек[4]
[1,2,3,4]Восточно-Казахстанский технический университет
имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 23.10.25.
Поступило с исправлениями 23.10.25.
Принято в печать 25.10.25.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕССОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФИТОМИНЕРАЛЬНО-СОЛЕВЫХ ЛИЗУНЦОВ ДЛЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

В статье рассмотрены отдельные аспекты исследований, направленных на определение количества физиологически необходимых микро- и макроэлементов в рационе, что является одним из ключевых факторов повышения продуктивности сельскохозяйственных животных в Казахстане. В частности, приведены результаты по оптимизации давления прессования при производстве фитоминерально-солевых лизунцов для крупного рогатого скота, а также оценка их физико-технологических и биологических свойств при длительном хранении. Брикеты были разработаны на основе кормовой соли с добавлением сульфата железа (30 г), соединений цинка (46 г), меди (3,6 г), йодида калия (3 г) и хвои сибирской пихты (50 г), богатой витамином С. Прессование осуществлялось под давлением от 20 до 60 МПа. В результате исследований установлено, что при давлении 40 МПа плотность брикетов составила 1,763±0,146 г/см³, а прочность – 6,68±0,56 МПа. Эти параметры обеспечивают структурную устойчивость и высокое качество готового продукта. При длительном хранении (6 и 12 месяцев) масса и влажность брикетов несколько снижались, однако плотность и прочность оставались относительно стабильными. Животные проявляли высокую активность лизания, потребляя в среднем 30–50 г брикета в сутки. Нарушений физиологического состояния у коров во всех экспериментальных группах не наблюдалось. Полученные данные свидетельствуют о том, что состав и структура фитоминерально-солевых брикетов обеспечивают их биологическую привлекательность и безопасность. Таким образом, брикеты, подготовленные под давлением 40 МПа, могут быть рекомендованы в качестве эффективной, сбалансированной и длительно хранящейся минеральной добавки в животноводстве.

Ключевые слова: фитоминерально-солевые брикеты, крупный рогатый скот, давление прессования, микроэлементы, плотность и прочность, кормовые добавки.

E. A. Asangaliev[1], *B. Apshykur[2], S. S. Lutai[3], Zh. Kalibek[4]
[1,2,3,4]D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 23.10.25.
Received in revised form 23.10.25.
Accepted for publication 25.10.25.

OPTIMIZATION OF PRESSING IN THE TECHNOLOGY OF PRODUCING PHYTOMINERAL-SALT LICKING BRIQUETTES FOR CATTLE

This article presents selected aspects of research focused on determining the required levels of physiologically important micro- and macroelements in the daily diet, which is one of the key factors in improving the productivity of agricultural animals in Kazakhstan. Specifically, it provides results on optimizing pressing in the production of phytomineral-salt licking briquettes for cattle, as well as an evaluation of their physicotechnological and biological properties during long-term storage. The briquettes were developed based on feed salt with the addition of iron sulfate (30 g), zinc (46 g), copper (3.6 g), potassium iodide (3 g), and Siberian fir needles (50 g) rich in vitamin C. Pressing was carried out under pressures ranging from 20 to 60 MPa. The results showed that briquettes pressed at 40 MPa had a density of 1.763±0.146 g/cm³ and a strength of 6.68±0.56 MPa. These indicators were found to be optimal for ensuring structural integrity and product quality. During long-term storage (6 and 12 months), a slight decrease in weight and moisture content was observed, while density and strength remained relatively stable. Animals exhibited high licking activity, consuming on average 30–50 g of briquettes per day. No physiological abnormalities were recorded in any of the experimental groups of cows. The findings confirm that the composition and structure of the phytomineral-salt briquettes ensure their biological attractiveness and safety. Thus, briquettes prepared under a pressure of 40 MPa can be recommended as an effective, balanced, and long-lasting mineral supplement in livestock production.

Keywords: phytomineral-salt briquettes, cattle, pressing pressure, microelements, density and strength, feed additives.

ҒТАМР 55.13.99

https://doi.org/10.48081/SNDD5011

А. К. Байбатша[1], Е. З. Нұғман[2], А. Қ. Мустафа[3], И. М. Дюсебаев[4]

[1,2,3]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

[4]«Алматы Электрқалқан зауыты» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6701-6625

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8514-8300

*e-mail: akosyabaibatsha@mail.ru

WAAM ТЕХНОЛОГИЯСЫМЕН ДАЙЫНДАЛҒАН ҮЛГІЛЕРДІҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНА ҚАБАТАРАЛЫҚ ИЛЕМДЕУДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Қазіргі таңда өнеркәсіпте күрделі пішінді және ірі габаритті металл бөлшектерді тиімді, жылдам әрі үнемді жолмен өндіруге деген сұраныс артып келеді. Бұл қажеттілікті өтеу үшін аддитивті өндіріс технологиялары, оның ішінде доғалы аддитивті өндіріс (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) кеңінен қолданылуда. Алайда WAAM әдісінің басты кемшіліктерінің бірі – қабатаралық шекаралар мен құрылымдағы анизотропия, микрожарықтар және кеуектер сияқты ақаулардың жиі кездесуі. Осыған байланысты, бұл зерттеуде WAAM процесімен біріктірілген MIG дәнекерлеу және әр қабаттан кейін бірден жүргізілетін қабатаралық илемдеу арқылы алынатын құрылым сапасын жақсарту мүмкіндігі зерттелді. Әрбір қабат дәнекерленген соң үлгі бірден пластикалық деформацияға ұшыратылып, дән өлшемін ұсақтау, құрылымның тығыздығы мен біртектілігін арттыру көзделді. ER70S-6 болатынан дайындалған үлгілер Leica DMI8 оптикалық микроскопымен зерттеліп, илемдеудің макро және микродеңгейдегі әсері талданды. Нәтижелер бойынша илемделген үлгілерде қабатаралық шекаралардың жойылып, кеуектілік пен анизотропиялық құрылымның азайғаны, әрі біртекті және ұсақ түйіршікті құрылымның қалыптасқаны анықталды. Бұл илемдеу әдісінің WAAM технологиясында кездесетін құрылымдық кемшіліктерді жоюда және дайын өнім сапасын арттыруда тиімді құрал екенін көрсетті. Алдағы уақытта бұл тәсілді көпбағытты қысым арқылы жетілдіру және деформация әсерін сандық модельдеу арқылы нақтылау ұсынылады.

Кілтті сөздер: аддитивті өндіріс, WAAM технологиясы, MIG дәнекерлеу, қабатаралық илемдеу, құрылымдық талдау, микроқұрылым, пластикалық деформация, ER70S-6 болаты.

Кіріспе

Қазіргі өндірісте күрделі пішінді және үлкен көлемді металл бөлшектерін жылдам әрі үнемді жолмен жасау қажеттілігі артып келеді. Бұл сұранысты қанағаттандыру аддитивті өндіріс технологиялары, әсіресе доғалы аддитивті өндіріс WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) кеңінен қолданыла бастады [1]. WAAM – балқытылған металл сымын қабат-қабатпен қосу арқылы бұйым құрастыруға мүмкіндік беретін, дәнекерлеу процесіне негізделген технология. Оның артықшылығы – өндіріс жылдамдығы жоғары, құрылғы бағасы қолжетімді және ірі габаритті бөлшектер жасауға мүмкіндік береді [2]. Дегенмен, бұл әдіспен алынған бұйымдарда ірі дән құрылымы, бағаналық өсу және анизотропия сияқты мәселелер байқалады [3]. Доға негізіндегі дәнекерлеу кезінде енгізілетін жоғары температура нәтижесінде бөлшекте қалдық кернеулер пайда болады. Бұл кернеулер бұйымды ұстап тұрған қысқыш алынғанда оның формасының бұрмалануына әкелуі мүмкін [4]. Сонымен қатар WAAM технологиясымен алынған бұйымдарда ірі бағаналық дән құрылымы, анизотропиялық қасиеттер және қалдық кернеулер сияқты мәселелер жиі кездеседі. Бұл ақаулар бұйымның механикалық сенімділігі мен өлшемдік дәлдігін төмендетіп, қолдану аясын шектейді. Осы мәселелерді азайту үшін қабатаралық суық илемдеу сияқты пластикалық деформация әдістері қолданыла бастады. Martina және авторлар жүргізген зерттеулерде WAAM әдісімен алынған бөлшектеріне суық илемдеу жүргізу арқылы қалдық кернеудің 60%-ға дейін төмендегені және дән құрылымының майда әрі изотропты пішінге өзгергенін көрсетті [5]. Hönnige және авторлардың зерттеуінде қабатаралық суық илемдеудің дән құрылымын ұсақтап, анизотропияны азайту және текстураны тиімді бақылау арқылы қалдық кернеуді төмендететіні дәлелденді [6]. Сонымен қатар, Gornyakov және басқалары сандық модельдеу арқылы илемдеу параметрлерінің (мысалы, ролик диаметрі мен қысым күші) кернеу-деформация өрістеріне әсерін зерттеп, бұл әдістің тиімді аймақтарын анықтады [7].

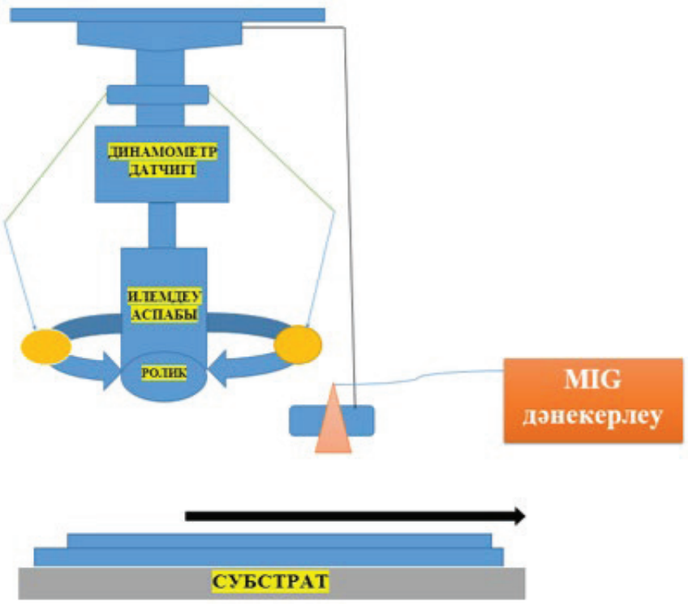
Дегенмен, зерттеулерде кеуектілік, микрожарықтар тәрізді ақаулардың толық жойылмауы немесе механикалық қасиеттердің аймақ бойынша біркелкі бөлінбеуі сияқты мәселелер әлі де шешімін таппай отыр. Сонымен қатар, зерттеу жұмыстарында илемдеу WAAM процесінен кейін бөлшек толық суытылғаннан соң ғана жүзеге асырылған. Осыған байланысты, бұл зерттеу жұмысында бөлшек толық салқындап үлгермей тұрып, WAAM процесінен кейін бірден қабатаралық илемдеуді жүргізу әдісін қолдану ұсынылады. Ол үшін илемделген және илемделмеген үлгілерді салыстыра отырып, дән өлшемі, микроструктура, микрожарықтар сияқты негізгі көрсеткіштер талдау ұсынылады.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу жұмысында дәнекерлеу материалы ретінде AWS A5.18 стандартпен жасалған ER70S-6 маркалы көміртекті болат сым қолданылды. Бұл сым көбіне MIG/MAG доғалық дәнекерлеу мен WAAM технологиясы үшін қолданылады, себебі оның жақсы механикалық қасиеттері мен доға тұрақтылығы жоғары. ER70S-6 маркалы сым AWS A5.18 стандартына сәйкес келетін, құрамында

марганец пен кремний мөлшері жоғары көміртекті болаттан жасалған дәнекерлеу материалы болып табылады.

Тәжірибелік жұмысты дайындау әдісі GMAW (Gas Metal Arc Welding) процесіне негізделген MIG дәнекерлеу көзін және онымен біріктірілген илемдеу модулін қамтиды, мұнда дәнекерлеу және пластикалық деформация қатар жүзеге асады. Жұмыс барысында дәнекерлеу материалы ретінде жоғарыда айтылып өткендей ER70S-6 сым қолданылып, балқытылған металл қабаты субстрат (материал болат 3)бетіне құйылады, ал одан кейін бұл қабат бірден илемдеу аспабымен деформацияға ұшырайды. Осылайша, әр қабат WAAM процесі кезінде қалыптасқан бойда илемделіп отырды. WAAM технологиясынан кейін бірден қабатты илемдеу жүргізу үшін дәнекерлеу процесімен біріктірілген арнайы илемдеу жүйесінің схемалық көрінісі (1а және ә-сурет) ұсынылды. MIG дәнекерлеу құрылғысы инертті газбен қорғалатын балқымалы сымды электродты пайдалану арқылы тұрақты доға түзіп, дәнекер тігісін қалыптастырады. Сым автоматты түрде берілді және электр доғасы арқылы балқытылды. Қорғаныс газы ретінде аргон газымен қоспасы балқыманы тотығудан сақтау үшін қолданылды. Бұл әдіс жоғары сапалы және біркелкі дәнекер тігістерін алуға мүмкіндік берді. MIG дәнекерлеу басы тиегі илемдеу ролигінің алдында орналасқан, ал дәнекерлеуден кейін бірден илемдеу процесі іске қосылды. Дәнекерлеу бастиегі мен илемдеу ролигі арасындағы арақашықтық 16 мм құрайды. Илемдеу кезінде қабатқа 50 кН тұрақты күш түсірілді. Бұл күш динамометрлік датчик арқылы бақыланды. Аталған датчик илемдеу құрылғысына интеграцияланған және илемдеу кезінде қабатқа түсірілетін нақты жүктемені нақты уақыт режимінде өлшеп көрсетті. Илемдеу модулінің жоғарғы бөлігінде қысым түсіретін илемдеу ролигі, ал төменгі жағында тірек ролик орналасқан. Жоғарыдан түсірілетін күш субстрат пен балқытылған қабаттың арасында біркелкі пластикалық деформация тудырып, құрылымдық тығыздық пен біртектілікті арттырды. Бұл әдіс әр қабаттың құрылымын қалыптастыру барысында деформациялық әсерді енгізу арқылы бұйымның микрокұрылымын өзгертуге мүмкіндік берді.

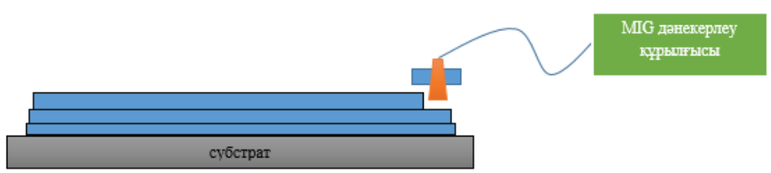


а

ә

1-сурет – Дәнекерлеумен бірге жүргізілетін илемдеу жүйесінің құрылымы және оның тәжірибедегі қолданылуы:
а – жүйенің жұмыс принципін көрсететін схемалық бейне;
ә – зертханада қолданылған нақты эксперименттік қондырғының фотосуреті.

Тәжірибе барысында дәнекерлеу процесінің негізгі параметрлері алдын ала оңтайландырылып, олар ER70S-6 сымы үшін жеткілікті жылу енгізу мен қабатаралық тұрақты балқу процесін қамтамасыз етті. Салыстырмалы талдау жүргізу мақсатында илемдеу әдісінде қолданылған барлық параметрлер (MIG дәнекерлеу режимі, ER70S-6 сымы, қабат биіктігі, қорғаныш газы және субстрат түрі) сақтала отырып, илемдеусіз үлгілер де (2-сурет) дайындалды. Бұл үлгілерде WAAM технологиясы арқылы тек дәнекерлеу жүзеге асырылды, ал қабаттарға деформациялық өңдеу қолданылған жоқ.



2-сурет – WAAM технологиясында дәнекерлеу бастиегінің қозғалысы арқылы қабаттық металл құрылымын қалыптастыру процесінің схемалық көрінісі

Тәжірибе барысында дәнекерлеу процесі алдын ала таңдалған технологиялық параметрлерге сәйкес жүргізілді, олардың мәндері төменде 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте – WAAM процесі үшін қолданылған дәнекерлеу параметрлері

Параметр	Ұсынылған мәні
Жүру жылдамдығы (Travel Speed, TS)	3,3 мм/с
Сым беру жылдамдығы	3,0 м/мин
Кернеу (Voltage)	24–28 В
Ток (Current)	53 А
Арақашықтық (Torch–Roller)	16 мм
Арақашықтық (Torch–Substrate)	5 мм
Арақашықтық (Roller–Substrate)	3 мм

Осы параметрлер балқымалы қабаттың тұрақты түзілуін және кейінгі илемдеу процесінің тиімді орындалуын қамтамасыз етті, бұл WAAM технологиясында құрылымдық тұтастық пен сапалы қабатаралық байланыс қалыптастыруға мүмкіндік берді.

Үлгіні микроқұрылымды зерттеуге дайындау әдісіне келер болсақ, алынған үлгілер стандартты металлографиялық дайындық әдістемесіне сәйкес тегістеу және ажарлау (жылтырату) процестерінен өткізілді. Тегістеу EcoMet 30 Manual (3-сурет) құрылғысында кремний карбиді негізіндегі абразивті қағаздармен кезең-кезеңімен (P180–P1200) орындалды. Әр кезеңде үлгілер ылғал ортада, белгіленген айналу жылдамдығында (300 айн/мин) өңделіп, беткі ақаулар толық

жойылғанға дейін тегістелді. Жылтырату кезеңінде алмазды суспензиялар (9 μm, 6 μm және 3 μm) және арнайы маталар қолданылып, айналу жылдамдығы 150 айн/мин шамасында ұсталды. Әрбір өңдеу кезеңінде үлгілердің тазалығы қадағаланып, соңғы кезеңнен кейін микроскопиялық талдауға жіберілді.

3-сурет – EcoMet 30 Manual құрылғысы

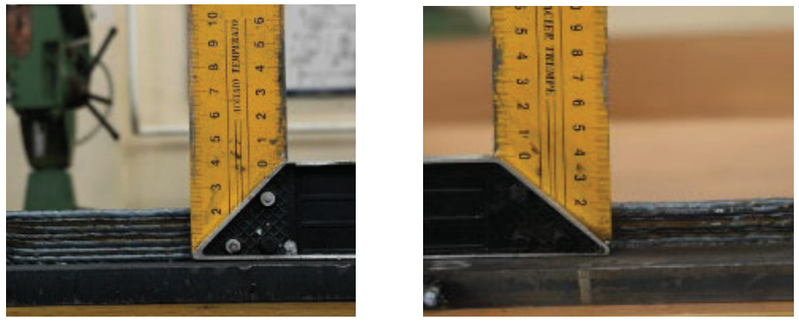
Микро және макроқұрылымдық талдау Leica DMI8 инверттелген оптикалық микроскоп арқылы жүргізілді (4-сурет). Зерттеуге арналған үлгілер стандартты металлографиялық әдістеме бойынша дайындалып, бастапқыда үлгілер тегістеліп, механикалық өңдеуден өткеннен кейін 3 % Nital ерітіндісімен уландырылды, үлгі сумен шайылды және сүзгі қағазында кептірілді. Инверттелген микроскоптың оптикалық жүйесі ірі үлгілерді зерттеуге қолайлы, ал жоғары ажыратымдылықтағы сандық камера зерттеу нәтижелерін нақты бейнелеуге және тікелей компьютерге жіберуге мүмкіндік берді. Бұл әдіс қабаттық илемдеудің WAAM үлгілеріндегі макроқұрылымға әсерін визуалды түрде бақылауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, осы құрылғы арқылы микроқұрылымдық талдау да жүргізілді. Микроскоптың жарық көзі мен объектив жүйесі дәндердің морфологиясын, өлшемдерін және олардың бағытталуын анықтауға мүмкіндік берді. Илемделген және илемделмеген үлгілер арасында дән өлшемі мен құрылым біртектілігіндегі айырмашылықтар осы бақылау арқылы тіркелді. Илемдеудің нәтижесінде дәндердің ұсақталуы, қабатаралық шекаралардың әлсіз көрінісі және құрылым тығыздығының артуы анық байқалды. Бұл өз кезегінде қабатаралық деформацияның материал құрылымына айтарлықтай әсер ететінін дәлелдеді.

4-сурет – Leica DM оптикалық микроскобы

Нәтижелер мен талқылау

WAAM технологиясы және одан кейінгі илемдеу процесі нәтижесінде үлгілер дайындалды. Алынған үлгілердің өлшемдік сипаттамалары келесідей: ұзындығы – 102 мм, биіктігі – 17,6 мм, бір қабаттың қалыңдығы – 3,6 мм (5а-сурет). Осындай құрылымда 1 дана үлгі дайындалып, 7 қатардан тұратын дәнекерленген қабаттардан қалыптастырылды. Металл қабаттары бір бағытта жүйелі түрде жүргізілді.

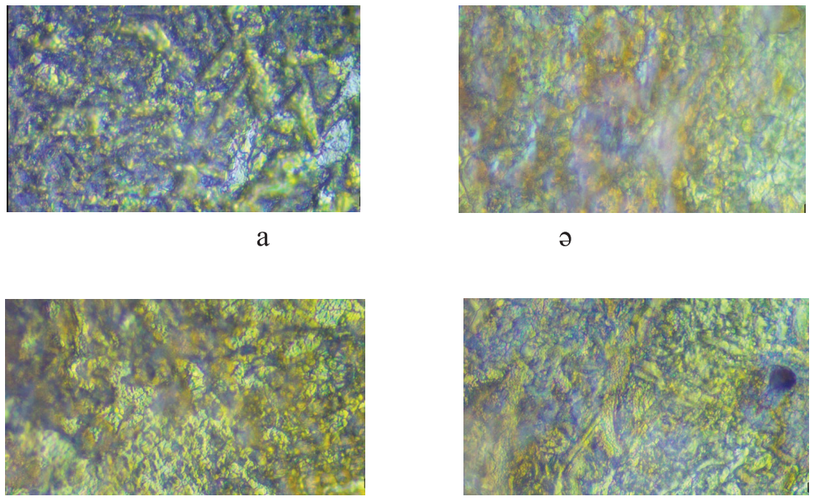
Салыстыру мақсатында дәл осы параметрлер мен дәнекерлеу режимі сақтала отырып, илемдеусіз үлгілер (5ә-сурет) де алынды. Алынған үлгілердің өлшемдік сипаттамалары: ұзындығы – 102 мм, биіктігі – 22,4 мм, бір қабаттың қалыңдығы – 3,7 мм. Осындай құрылымда 1 дана үлгі дайындалып, 7 қатардан тұратын дәнекерленген қабаттардан қалыптастырылды. Бұл үлгілер WAAM әдісімен қалыптасқанымен, қабаттарға илемдеу қолданылған жоқ.



а ә

5-сурет – WAAM технологиясы бойынша алынған үлгілердің салыстырмалы көрінісі: а – дәнекерлеумен үйлескен илемдеу арқылы қалыптастырылған үлгі; ә – илемдеусіз алынған бастапқы үлгі

Зерттеу нәтижелері илемделген және илемдеусіз жағдайдағы құрылымның айтарлықтай айырмашылықтарын көрсетті. Илемделген үлгілерде (6ә-сурет) дәндердің ұсақталғаны, белгілі бір бағытта созылғаны және құрылымның біртекті болғаны байқалады. Бұл пластикалық деформация нәтижесінде металл құрылымының тығыздалып, шлак пен микрожарықтардың азаюына себеп болғанын көрсетеді. Сонымен қатар, жанынан қарағанда (6с-сурет) дәндердің айқын бағытталуы мен қайта кристалдану белгілері көрінеді, бұл илемдеудің құрылымға елеулі әсер еткенін растайды. Мұндай құрылым қалдық кернеулердің төмендеуіне және механикалық қасиеттердің жақсаруына ықпал етеді. Салыстыру барысында, илемдеусіз үлгілерде (6а-сурет) құрылымның анизотропиясы мен гетерогенділігі анық байқалды. Жанынан қарағанда кезде (6б-сурет) дәндер әртүрлі бағытта орналасқан, мөлшері әркелкі және қабатаралық шекаралар ішінара көрініп тұр. Бұл WAAM технологиясының қабаттап дәнекерлеу ерекшеліктерінен туындайтын құрылымдық айқынсыздық пен термиялық циклдердің қайталануының салдары болып табылады. Сонымен қатар ірі және бағытсыз дәндермен қоса, феррит пен перлит фазалары араласқан, бұл құрылымның макроскопиялық кемшіліктерін және механикалық қасиеттердің әркелкілігін көрсетеді. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер WAAM әдісімен өндірілген үлгілерге илемдеуді қолдану арқылы құрылымның айтарлықтай жақсаруына қол жеткізуге болатынын дәлелдейді. Илемдеу дәндердің ұсақталуына, құрылымның біркелкіленуіне және қалдық кернеудің төмендеуіне ықпал етіп, материалдың беріктігі мен сенімділігін арттырады. Ал илемдеусіз үлгілерде керісінше, ақаулар, ірі дәндер және қабатаралық құрылымның сақталуы материалдың механикалық қасиеттеріне кері әсер етуі мүмкін екенін көрсетеді. Зерттеу барсыныда илемдеуді тек бір жағынан жүргізу кезінде дәнекерлеу процесінде қабаттың бүйірге жайылып кету ықтималдығы байқалды. Осыған байланысты, келесі зерттеу жұмыстарында илемдеуді бір жақты емес, үш бағытта – жан-жақтан қысым түсіру арқылы жүргізу мүмкіндігін қарастыру ұсынылады.



а ә

б с

6-сурет – Илемделген және илемдеусіз WAAM үлгілерінің микрокұрылымдық айырмашылықтары:
а – илемдеусіз үлгідегі бағытсыз, ұсақталған дәндер;
ә – бастапқы құрылымдағы қабаталық ақаулардың байқалуы;
б – илемдеу әсерінен дәндердің созылуы, бағытталуы және тығыздалуы;
с – илемдеу дәрежесі жоғары болған кездегі анизотропияның төмендеуі мен құрылымдық біркелкіліктің артуы

Алынған нәтижелерде шетелдік зерттеулермен салыстырғанда, ұқсас үрдістер байқалады. Мысалы, Colegrove авторлар WAAM әдісімен алынған бөлшектерде қабатаралық құрылымның айқындылығы, дәндердің байқалуы және анизотропиялық қасиеттердің туындауы сынды макрокұрылымдық кемшіліктерді атап өткен [8]. Härtel және авторлар WAAM әдісімен алынған үлгілерде қабатаралық микроструктураның біркелкі еместігі мен қалдық кернеулердің өнімнің механикалық сенімділігіне кері әсер ететінін атап өткен [9]. WAAM процесінде қабатаралық күту уақыты тым қысқа болған жағдайда, дәндердің бақылаусыз өсуі салдарынан ірі дәндер, құрылымның біркелкі еместігі, қалдық кернеулер және анизотропиялық қасиеттерге әкелетін ақаулар қалыптасатыны айқындалды. [10]. Бұл мәселелер біздің зерттеу жұмысымызда да байқалды, және оны қабаттық илемдеу арқылы жеңілдету мүмкіндігі қарастырылды.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Ғылыми мақала №AP19679253 «Көпфункционалды мобильді металл 3д принтерді зерттеу және жобалау» ғылыми гранттық қаржыландыру жобасы аясында жарияланды (зерттеуді Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады).

Қорытынды

Бұл зерттеу жұмысында WAAM технологиясымен дайындалған ER70S-6 болат үлгілеріне қабатаралық илемдеудің құрылымдық қасиеттеріне әсері тәжірибелік жолмен зерттелді. Зерттеудің негізгі жаңалығы – бөлшек илемдеу процесінің WAAM технологиясынан кейін бірден орындалуында. Алынған нәтижелерге сүйенсек, қабатаралық илемдеу дән құрылымын айтарлықтай ұсақтап, қабатаралық шекараларды жойып, құрылымның біртектілігін арттырған. Илемделген үлгілерде кеуектілік пен анизотропия деңгейі төмендеп, қабатаралық байланыс сапасы жақсарғаны байқалды. Ал илемдеусіз үлгілерде қабатаралық ақаулар, микрожарықтар және ірі дән құрылымы сақталған. Бұл илемдеудің құрылым тығыздығына және макрокұрылымдық тұтастыққа оң әсер ететінін көрсетті. Зерттеу WAAM технологиясының кемшіліктерін жоюда қабатаралық пластикалық деформацияны қолдану – тиімді тәсіл екенін дәлелдеді.

Тәжірибелік жұмыстың нәтижелері WAAM технологиясын жетілдіруде илемдеудің интеграциялануы маңызды рөл атқаратынын және бұл тәсілдің аддитивті өндіріс өнімдерінің сапасын арттыруда тиімді құрал бола алатынын көрсетті. Болашақ зерттеу жұмыстары илемдеуді жан-жақты (үш бағытта) қысым түсіру арқылы жүргізу, деформация әсерін модельдеу, сондай-ақ алынатын құрылымдардың механикалық қасиеттерін толық сипаттау бағытында жалғасуы қажет.

REFERENCES

1 **DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A. D., De, A. and Zhang, W.** Additive manufacturing of metallic components–process, structure and properties // Progress in materials science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

2 **Colegrove, P. A., Martina, F., Roy, M. J., Szost, B. A., Terzi, S., Williams, S. W. Withers, P. J. and Jarvis, D.** High pressure interpass rolling of wire+ arc additively manufactured titanium components // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 996. – P. 694–700. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.996.694.

3 **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. and Li, H.** «Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests» // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. –Vol. 81. – № 1. – P. 465–481. – https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3.

4 **Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P.** Wire+ arc additive manufacturing // Materials science and technology. – 2016. – Vol. 32(7). – P. 641–647. – https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073.

5 **Martina, F., Roy, M.J., Szost, B.A., Terzi, S., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Withers, P.J., Meyer, J. and Hofmann, M.** Residual stress of as-deposited and rolled wire+ arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components // Materials Science

and Technology. – 2016. –Vol. 32. – № 14. – P. 1439–1448. – https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1142704.

6 **Hönnige, J. R., Colegrove, P. A., Ahmad, B., Fitzpatrick, M. E., Ganguly, S., Lee, T. L. and Williams, S. W.** Residual stress and texture control in Ti-6Al-4V wire+ arc additively manufactured intersections by stress relief and rolling // Materials & Design. – 2018. – Vol. 150. – P. 193–205. – https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.065.

7 **Abbaszadeh, M., Hönnige, J. R., Martina, F., Neto, L., Kashaev, N., Colegrove, P., Williams, S., and Klusemann, B.** Numerical investigation of the effect of rolling on the localized stress and strain induction for wire+ arc additive manufactured structures // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol.28. – № 8. – P. 4931–4942. – https://doi.org/10.1007/s11665-019-04249-y.

8 **Colegrove, P. A., Coules, H. E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H. and Cozzolino, L. D.** Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213. – № 10. – P. 1782–1791. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012.

9 **Härtel, S., Adams, T. E., Hoefer, K., Awiszus, B. and Mayr, P.** A Novel Method for Improving Weld Seam Properties through Inline Coupling of Welding and Forming // Materials. –2020. – Vol. 13. – № 2. – P. 271. – https://doi.org/10.3390/ma13020271.

10 **Singh, S., Jinoop, A. N., Tarun Kumar, G. T. A., Palani, I. A., Paul, C. P. and Prashanth, K. G.** Effect of interlayer delay on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured wall structures // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 15 – P. 4187. – https://doi.org/10.3390/ma14154187.

12.06.25 ж. баспаға түсті.
30.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
24.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. К. Байбатша[1], Е. З. Нұғман[2], А. Қ. Мустафа[3], И. М. Дюсебаев[4]
[1,2,3]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]ТОО «Алматинский электрощитовой завод»,
Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 12.06.25.
Поступило с исправлениями 30.10.25.
Принято в печать 24.11.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖСЛОЙНОЙ ПРОКАТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ WAAM

В современной промышленности наблюдается растущий спрос на эффективное, быстрое и экономичное производство металлических деталей сложной формы и крупных размеров. Для удовлетворения этой потребности всё шире применяются технологии аддитивного производства, в частности, доуговое аддитивное изготовление WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Однако одним из основных недостатков WAAM является частое возникновение таких структурных дефектов, как межслойные границы, анизотропия, микротрещины и пористость. В этой связи в представленном исследовании рассматривается возможность улучшения качества структуры за счёт интеграции MIG-сварки с межслойной прокаткой, выполняемой сразу после каждого нанесённого слоя. Целью является измельчение зерна и повышение плотности и однородности структуры путём пластической деформации свеженанесённого слоя. Образцы из стали ER70S-6 были исследованы с использованием оптического микроскопа Leica DMI8, а влияние прокатки оценивалось на макро- и микроструктурном уровнях. Результаты показали, что в прокатанных образцах устраняются межслойные границы, существенно снижается пористость и анизотропия, формируется однородная мелкозернистая структура. Это подтверждает, что межслойная прокатка может быть эффективным инструментом для устранения структурных дефектов в технологии WAAM и повышения качества готовой продукции. В дальнейшем предлагается усовершенствование метода за счёт применения многовекторного давления и численного моделирования процессов деформации.

Ключевые слова: аддитивное производство, технология WAAM, MIG-сварка, межслойная прокатка, структурный анализ, микроструктура, пластическая деформация, сталь ER70S-6.

A. K. Baibatsha[1], E. Z. Nugman[2], A. K. Mustafa[3], I. M. Dyussebayev[4]
[1,2,3]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]LLP «Almaty Electric Switchgear Plant», Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 12.06.25.
Received in revised form 30.10.25.
Accepted for publication 24.11.25.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INTERPASS ROLLING ON THE MICROSTRUCTURE OF WAAM-FABRICATED SAMPLES

In modern industry, the demand for efficient, rapid, and cost-effective production of complex-shaped and large-sized metal parts is steadily increasing. To meet this need, additive manufacturing technologies, particularly WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – are being widely adopted. However, one of the major drawbacks of WAAM is the frequent occurrence of structural defects such as interlayer boundaries, anisotropy, microcracks, and porosity. In this context, the present study explores the potential for improving the structural quality of WAAM-fabricated parts by integrating MIG welding with interlayer rolling applied immediately after each deposited layer. The aim was to refine grain size and increase the density and homogeneity of the structure by subjecting the freshly deposited layer to plastic deformation. Samples made from ER70S-6 steel were analyzed using a Leica DMI8 optical microscope, and the structural effects of rolling were evaluated at both the macro and microstructural levels. The results revealed that in rolled samples, interlayer boundaries were eliminated, porosity and anisotropic features were significantly reduced, and a fine and homogeneous grain structure was formed. These findings confirm that interlayer rolling can be an effective tool to minimize structural imperfections in WAAM and enhance the final product quality. Future improvements may include the application of multidirectional pressure and numerical modeling of the deformation process for further optimization.

Keywords: additive manufacturing, WAAM technology, MIG welding, interlayer rolling, structural analysis, microstructure, plastic deformation, ER70S-6 steel.

МРНТИ 55.38.00
https://doi.org/10.48081/TFRY6883

Е. Есжан[1], К. Аскарулы[2], Е. Евлампиева[3], R. Amrousse[4], С. Азат[5]
[1,2,5]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Shakarim University, Республика Казахстан, г. Семей;
[4]Chouaib Doukkali University, Faculty of Sciences, Morocco, El Jadida.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4523-1211
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8998-0409
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1953-3686
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2905-602X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438
*e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ MXENE-НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Растущий спрос на решения в области устойчивой энергетики стимулирует интенсивные исследования передовых материалов для систем накопления энергии. MXenes – двумерные карбиды и нитриды переходных металлов – рассматриваются как одни из наиболее перспективных кандидатов для суперконденсаторов нового поколения благодаря их исключительной металлической проводимости, регулируемому химическому составу поверхности и выраженной гидрофильности. В данной работе представлен всесторонний обзор синтеза, структурной модификации и электрохимических характеристик MXene-материалов, применяемых в суперконденсаторах. Рассматриваются различные методы синтеза, включая традиционное травление HF и более безопасные in-situ методы на основе систем LiF/HCl. Проанализированы стратегии преодоления внутренних ограничений с акцентом на функционализацию, гетероатомное легирование, инженерии вакансий, а также формирование трёхмерных архитектур и гибридных композитов с углеродными материалами и оксидами металлов.

Экспериментальные исследования, проведённые на титановом MXene, синтезированном мягким методом LiF/HCl, показали удельную ёмкость около 44 F g^{-1} в электролите 6 M KOH, обеспечивая высокую производительность и превосходную циклическую стабильность. Почти прямоугольные CV-профили и симметричные кривые заряда-разряда подтверждают механизм накопления заряда в двойном электрическом слое и высокую кулоновскую эффективность. Полученные результаты демонстрируют, что MXene-электроды сочетают высокую плотность мощности, быструю передачу заряда и длительный срок службы, что делает их одними из наиболее перспективных материалов для создания высокопроизводительных и экологически устойчивых устройств накопления энергии. Особый акцент в работе сделан на инженерной значимости MXene-суперконденсаторов для машиностроительной отрасли. Высокая скоростная способность материала напрямую транслируется в способность обеспечивать пиковую мощность для

высокодинамичных узлов (например, электрические приводы и робототехника) и эффективно работать в режимах рекуперативного торможения. Эти свойства критически важны для повышения надёжности и ресурса приводных звеньев, а также для снижения массо-габаритных характеристик (МГХ) энергомодулей в портативном оборудовании и аэрокосмических механизмах. Таким образом, работа обосновывает потенциал MXene как технологического решения, обеспечивающего конкретные конструктивные и эксплуатационные преимущества перед традиционными источниками энергии.

Ключевые слова: устойчивая энергетика, системы накопление энергии, суперконденсаторы, MXene-электроды, мягкий метод травления.

Введение

Глобальная энергетическая ситуация находится под растущим давлением. Особенно остро проблема эффективного управления энергией стоит в области современного машиностроения, где высокодинамичные узлы (приводы, актуаторы, робототехника) требуют быстрого реагирования и способности работать в режиме высоких пиковых нагрузок и рекуперации. Многие страны попрежнему в значительной степени полагаются на ископаемое топливо для производства электроэнергии, транспорта и промышленных процессов, однако эти ресурсы ограничены и вносят значительный вклад в выбросы парниковых газов. Воздействие продолжающегося использования ископаемого топлива на окружающую среду от загрязнения воздуха до изменения климата – привело к быстрому расширению использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия и энергия ветра. Хотя эти ресурсы являются обильными и устойчивыми, они по своей сути непостоянны: солнечный свет и ветер не всегда доступны в период пика спроса. Следовательно, эффективные решения для хранения энергии необходимы для сбалансирования выработки и потребления, сглаживания колебаний и повышения надежности использования возобновляемых источников энергии.

Устройства накопления энергии выполняют множество функций в энергетической цепочке создания стоимости. В масштабах сети они стабилизируют напряжение и частоту, позволяют выравнивать нагрузку и облегчают интеграцию распределенных возобновляемых источников энергии. В небольших масштабах они могут питать портативную электронику и электромобили, обеспечивать резервное питание и даже обеспечивать доступ к электричеству в автономных районах. Ключевым требованием к производительности является способность быстро обеспечивать высокую мощность (например, для рекуперативного торможения), а также сохранять достаточный запас энергии для длительного использования. Аккумуляторы превосходны по плотности энергии, но, как правило, страдают от ограниченной плотности мощности и срока службы; традиционные конденсаторы, наоборот, обеспечивают очень высокую мощность, но накапливают мало энергии.

В контексте машиностроительных систем эти электрохимические требования имеют прямое влияние на конструктивные и эксплуатационные

показатели. Высокая плотность мощности суперконденсаторов критична для высокодинамичных узлов, таких как электрические сервоприводы и актуаторы в робототехнике, где необходимо мгновенное ускорение или торможение, а также эффективная рекуперация энергии при сбросе нагрузки. Благодаря этому свойству SC позволяют сглаживать пиковые нагрузки, защищая основные источники питания и обеспечивая стабильность крутящего момента. Кроме того, беспрецедентно долгий срок службы суперконденсаторов, который может превышать сотни тысяч циклов, напрямую повышает надёжность приводных звеньев и снижает частоту обслуживания и замены энергомодулей в промышленном оборудовании, которое должно функционировать без остановок. Наконец, высокая удельная и объемная мощность SC позволяет значительно сократить массо-габаритные характеристики (МГХ) энергомодулей, что является решающим фактором для создания компактных и легких автономных механических систем, таких как дроны, портативный электроинструмент и элементы систем активного виброгашения.

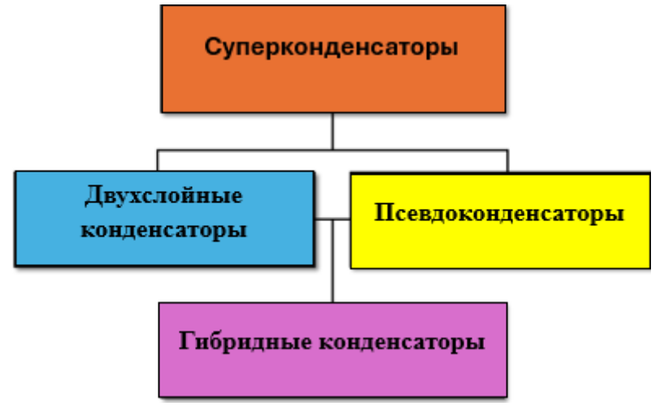


Рисунок 1 – Классификация суперконденсаторов

Суперконденсаторы обычно делятся на три категории в зависимости от их механизмов накопления заряда (Рис.1): электрические двухслойные конденсаторы (EDLC), псевдоконденсаторы и гибридные конденсаторы. EDLC электростатически накапливают заряд на границе раздела электрод–электролит; они обладают отличной производительностью и очень длительным сроком службы, но относительно низкой плотностью энергии. Псевдоконденсаторы основаны на быстрых, обратимых фарадеевских окислительно-восстановительных реакциях на поверхности электрода или вблизи нее для накопления заряда, обеспечивая более высокую емкость, чем EDLC, за счет несколько меньшей плотности мощности и стабильности цикла. Гибридные конденсаторы сочетают в себе оба механизма – электрод EDLC в паре с электродом псевдоконденсативного или аккумуляторного типа для повышения плотности энергии при сохранении разумной мощности и срока службы [1].

Суперконденсаторы (SCS) находятся в середине этого спектра, сокращая разрыв между батареями и обычными конденсаторами, обеспечивая высокую плотность мощности и более длительный срок службы, чем аккумуляторы. Аккумуляторы SCS могут быстро заряжаться и разряжаться, выдерживать сотни тысяч циклов без существенного ухудшения качества и работать с высокой эффективностью. Поэтому они незаменимы в приложениях, требующих быстрой выработки энергии, таких как рекуперативное торможение, сглаживание энергопотребления в системах, использующих возобновляемые источники энергии, и резервное питание электронных устройств.

В категории псевдоемкостей значительное внимание привлекла псевдоемкость интеркаляционного типа. В рамках этого механизма ионы быстро проникают в материал электрода и извлекаются из него, не вызывая серьезных структурных изменений. Этот процесс обеспечивает высокую емкость и быстродействие и, как отмечается в недавней литературе, «сокращает разрыв между обычными батареями и SCS», поскольку сочетает высокую плотность энергии, характерную для материалов батарей, с быстрой кинетикой конденсаторов. Таким образом, выбор подходящих электродных материалов и оптимизация их структуры и химического состава поверхности имеют решающее значение для раскрытия всего потенциала суперконденсаторов.

Сами по себе суперконденсаторы не могут заменить батареи при длительном хранении энергии, но их уникальные возможности делают их незаменимыми в приложениях, требующих быстрой подачи энергии, поддержания максимальной мощности и эффективной рекуперации энергии. Достижения в области электродных материалов, в частности, малоразмерных и проводящих материалов, таких как MXenes, продолжают способствовать повышению плотности энергии и расширению сферы применения, о чем говорится в следующих разделах.

MXenes представляют собой недавно открытое семейство двумерных материалов, которые быстро завоевали популярность в исследованиях по накоплению энергии. Впервые они были выделены в 2011 году, когда Нагиб и его коллеги выборочно вытравили слои алюминия из слоистых фаз MAX (ранних карбидов и нитридов переходных металлов), чтобы получить новый класс двумерных карбидов и нитридов переходных металлов. Общая формула для MXenes $Mn+_{1}X_{n}T_{x}$, где M это переходный металл (такой как Ti, V, Nb или Mo)., M – это переходный металл (такой как Ti, V, Nb или Mo)., X представляет углерод и/или азот, и T обозначает поверхностные зазоры, обычно –O, –OH и –F. Эти зазоры возникают в процессе травления и могут быть скорректированы с помощью последующей обработки, что позволяет контролировать химический состав поверхности и расстояние между слоями [2].

Электрохимическое поведение MXenes дополнительно определяется их характерной слоистой морфологией. Каждый отдельный лист обладает значительной удельной поверхностью, обеспечивая формирование электрического двойного слоя и возможность обратимой интеркаляции ионов. Состав материала напрямую влияет на его функциональные свойства:

Ti_3C_2Tx и Ti_2CTx преимущественно проявляют псевдоёмкостное поведение за счёт окислительно-восстановительных реакций, в которых участвуют атомы титана и кислородсодержащие окончания.

V_2CTx и Nb_2CTx характеризуются интеркаляцией катионов (Li^+, H^+, K^+) в межслоевые галереи, что соответствует механизму интеркаляционно-типовой псевдоёмкости.

Регулируемая химия поверхности MXenes предоставляет широкие возможности для целенаправленного подбора их электрохимических характеристик. Так, увеличение содержания -O или -OH групп, как правило, усиливает вклад псевдоёмкости, однако может снижать электропроводность. В то же время наличие -F окончаний способствует более эффективному переносу электронов, но уменьшает гидрофильность поверхности и, следовательно, смачиваемость электролитом.

Таким образом, MXenes являются многообещающими материалами для применения в устройствах накопления энергии благодаря сочетанию высокой проводимости, богатой функциональности поверхности и возможности точной настройки их электрохимического отклика [3].

Несмотря на свои многообещающие свойства, первозданные нанолисты MXene сталкиваются с рядом внутренних ограничений, которые ограничивают их практическое применение в системах хранения энергии. Наиболее актуальная проблема возникает из-за сильных ван-дер-ваальсовых взаимодействий между отдельными листами. Эти силы приводят к переупаковке и разрушению промежуточных слоев, когда хлопья MXene собираются в пленки или электроды. Такая переупаковка значительно уменьшает доступную площадь поверхности и затрудняет пути ионной диффузии, что приводит к снижению удельной емкости и снижению производительности. С точки зрения машиностроения, эта тенденция к переупаковке также создает серьезную проблему структурной стабильности электрода, особенно при его интеграции в узлы, подверженные постоянной вибрации или механическому напряжению. Неконтролируемая агрегация нанолистов MXene ухудшает механическую прочность и долговечность пленочного электрода, что критически важно для надежности энергомодулей, используемых в промышленных машинах и агрегатах.

Другим существенным недостатком MXenes является склонность к поверхностному окислению, особенно в водной среде. Процессы окисления изменяют химический состав поверхности и снижают электропроводность, что еще больше ограничивает их электрохимические характеристики [4].

Стратегии преодоления ограничений, присущих первозданным MXenes, направлены на модификацию структуры и разработку материалов для улучшения стабильности и электрохимических характеристик. Функционализация поверхности и легирование гетероатомами, такими как азот или переходные металлы, расширяют межслойное пространство и создают дополнительные окислительно-активные центры. Интеркаляция органических молекул, полимеров или ионов создает разделители между слоями MXene, предотвращая их повторное наслоение,

улучшая доступность ионов и повышая гибкость. Формирование композитов из таких материалов, как графен, углеродные нанотрубки, углерод, полученный из биомассы, оксиды металлов, сульфиды, слоистые двойные гидроксиды или металлоорганические каркасы, приводит к созданию иерархических структур, которые одновременно стабилизируют полимеры и придают им дополнительные функциональные возможности. Наконец, конструктивные инженерные подходы, в том числе разработка трехмерных пенопластов, аэрогелей или вертикально выровненных пленок, создают непрерывные пути прохождения ионов и увеличивают площадь поверхности, значительно повышая емкость и стабильность циклирования. В совокупности эти стратегии демонстрируют, что продуманная наномасштабная и мезомасштабная инженерия может эффективно устранить недостатки MXene и раскрыть их потенциал для создания передовых устройств хранения энергии.

Синтез MXenes обычно начинается с избирательного удаления A-элемента из исходной фазы MAX. Для достижения этой цели было разработано несколько химических способов, позволяющих сохранить целостность слоёв M-X и контролировать химический состав поверхности.

При традиционном способе используется концентрированная плавиковая кислота (HF) для травления слоёв алюминия или других A-элементов из исходного материала MAX. Например, погружение Ti_3AlC_2 в HF растворяет слои Al и даёт листы Ti_3C_2Tx, где Tx обозначает поверхностные окончания, такие как -O, -OH и -F, вызванные травителем. Несмотря на эффективность, концентрированный HF представляет угрозу безопасности и может привести к образованию дефектов, которые ухудшают качество материала [4].

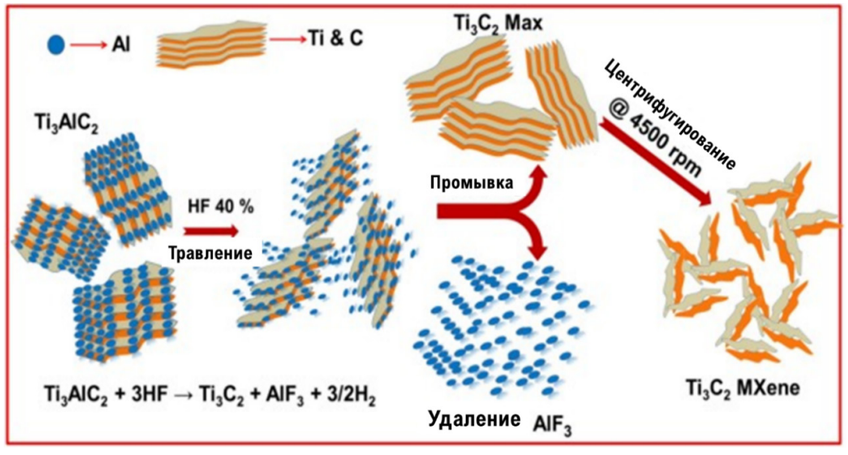


Рисунок 2 – Схематическая диаграмма

Для решения этих проблем в методах «in-situ» используется смесь фторида лития (LiF) или других фторидных солей с соляной кислотой (HCl). Такое сочетание создаёт HF прямо в растворе, обеспечивая более мягкие условия травления и способствуя проникновению ионов Li^+ между слоями, что облегчает расслаивание. Щелочное травление и травление расплавленными солями являются альтернативами, не содержащими фтора. Например, гидротермальная обработка NaOH может деалюминировать Ti_3AlC_2 с получением Ti_3C_2Tx без применения HF. Было показано, что расплавное травление обеспечивает лучший контроль над поверхностными окончаниями и уменьшает образование дефектов.

Помимо прямого химического травления, для синтеза MXenes изучены гидротермальные и сольвотермические методы. В типичном гидротермальном процессе Ti_3AlC_2 обрабатывают раствором NaOH при повышенной температуре (например, 65 °C) в течение нескольких часов с последующей промывкой и расслаиванием для получения Ti_3C_2Tx. Этот метод работает в более мягких условиях и может привести к меньшему количеству структурных дефектов, но часто требует более длительного времени реакции. Сольвотермическая обработка позволяет вводить органические интеркалянты в процессе синтеза, изменяя межслоевые расстояния и поверхностную химию [5].

Электрохимическое травление открывает ещё один путь. В этом процессе фаза MAX служит рабочим электродом в электрохимической ячейке; подача анодного потенциала в электролит избирательно удаляет A-слой. Электрохимические методы позволяют избежать использования HF и дают возможность точно регулировать скорость травления, хотя в настоящее время они менее масштабируемы.

MXenes, полученные любым из вышеописанных методов, требуют дальнейшей модификации для достижения максимальных электрохимических характеристик. Расслаивание часто осуществляется путём интеркаляции органических молекул (например, диметилсульфоксида, TBAOH) или ионов (Li^+, K^+), которые увеличивают межслоевые расстояния и облегчают разделение на однослойные или фью-лейерные чешуйки. Последующее воздействие ультразвуком или механическим перемешиванием позволяет получать стабильные коллоидные суспензии нанолистов MXene.

Функционализация с помощью химического легирования или модификации поверхности помогает устранить проблемы с повторным слипанием и окислением, характерные для исходных MXenes. Легирование Ti_3C_2Tx азотом, достигаемое путём термической обработки аммиаком или мочевиной, увеличивает межслоевые расстояния и снижает содержание фтора, что приводит к повышению удельной ёмкости (449 F g^{-1} против 321 F g^{-1} для исходного Ti_3C_2Tx) и улучшает стабильность при циклировании. Легирование Ti_3C_2Tx ниобием (например, $Ti_{2.9}Nb_{0.1}C_2Tx$) увеличивает межслоевые расстояния и создаёт дополнительные редокс-активные центры, обеспечивая объёмную ёмкость до 1014 F cm^{-3}. Включение молекулярных разделителей, таких как Ni-фталоцианин, проводящие полимеры или органические радикалы, между слоями MXene предотвращает повторное слипание и обеспечивает дополнительные механизмы накопления

заряда; например, электроды MXene, модифицированные Ni-фталоцианином, достигают 792 F g^{-1} [6].

Для решения проблем, связанных с повторным наслаиванием и ограниченным транспортом ионов, исследователи разрабатывают трёхмерные архитектуры и гибридные композиты. Химическое вспенивание переводит влажные плёнки Ti_3C_2Tx в трёхмерные пористые пены со специфической поверхностью ~60.8 m^2 g^{-1}; электроды на их основе обеспечивают удельную ёмкость 426 F g^{-1} при 1 A g^{-1} и сохраняют характеристики более 10 000 циклов.

Интеграция MXenes с углеродными нанотрубками, графеном или карбонизованной биомассой формирует проводящие сети, повышающие механическую стабильность и обеспечивающие дополнительные пути для транспорта ионов. Гибридизация с оксидами металлов (например, $Ni(OH)_2$, $Co(OH)_2$) или слоистыми двойными гидроксидами создаёт гетероструктуры, совмещающие свойства электрического двойного слоя и псевдоёмкости; такие композиты достигают удельной ёмкости до ~1400 F g^{-1} [7].

Инженерия вакансий, заключающаяся в контролируемом создании вакансий в металлических или углеродных позициях, позволяет модулировать электронную структуру и плотность активных центров, что дополнительно повышает ёмкость и энергетическую плотность.

Исходные электроды MXene, состоящие в основном из немодифицированного Ti_3C_2Tx или других листов $Mn+1XnTx$, обладают привлекательными электрохимическими свойствами благодаря высокой электропроводности и большой удельной поверхности. Однако двумерные слои имеют тенденцию к переуплотнению, что ограничивает диффузию ионов и снижает ёмкость. Поэтому исследователи изучают как немодифицированные плёнки MXene, так и различные стратегии функционализации, чтобы полностью раскрыть их потенциал.

Чистые MXene-чернила и плёнки. Одним из перспективных подходов является получение MXene-чернил без добавок и их переработка в гибкие электроды. Юань и коллеги использовали осадочные чернила на основе Ti_3C_2Tx и напечатали из них гибкие электроды суперконденсатора методом трёхмерной печати. Эти MXene-электроды, не содержащие добавок, обеспечили удельную ёмкость 2.337 F cm^{-2} и превосходно сохраняли её в течение 10 000 циклов заряда-разряда. Хорошая циклическая стабильность объясняется отсутствием связующих и токопроводящих добавок, что снижает сопротивление на границе раздела фаз и сохраняет природную электропроводность MXene [8].

Легированные MXene. Для повышения ёмкости и быстродействия MXene могут быть дополнены другими элементами или функциональными молекулами. Группа ученых создала композит V_2CTx@Si путём травления V_2AlC и введения кремния в слоистую структуру. Электрохимические испытания показали, что электроды V_2CTx@Si достигли удельной ёмкости 557.7 F g^{-1} при 1 A g^{-1} и сохраняли характеристики в течение 10 000 циклов, что демонстрирует улучшение проводимости и способности к накоплению энергии [9].

Легирование органическими молекулами также доказало эффективность. Mu и соавторы внедрили фталоцианин никеля (NiPc) в нанолисты Ti_3C_2Tx, молекулы которого интеркалировались между слоями MXene и предотвращали их переупаковку. Полученные электроды NiPc/MXene обеспечили удельную ёмкость 792 F g^{-1} при 1 A g^{-1} и стабильность в течение 5000 циклов. Повышенная производительность объясняется увеличенным расстоянием между слоями и дополнительными редокс-центрами, созданными NiPc.

Элементное легирование MXene также может увеличить количество активных центров и скорректировать электронную структуру. Азотное легирование Ti_3C_2Tx, достигнутое термической обработкой с азотными предшественниками, увеличивало межслоевые расстояния и снижало содержание фтора, что способствовало ускорению диффузии ионов. Электроды Ti_3C_2Tx, легированные азотом, достигали ёмкости 449 F g^{-1} при скорости сканирования 2 mV s^{-1} и сохраняли стабильность до 8000 циклов. Другой пример – ниобиевое легирование: электроды $Ti_{2.9}Nb_{0.1}C_2Tx$ обладали объёмной ёмкостью 1014 F cm^{-3} при 2 mV s^{-1}. Атомы Nb увеличивали межслоевые расстояния и способствовали дополнительным редокс-реакциям, улучшая как удельную, так и объёмную ёмкость.

Эти примеры демонстрируют, что хотя исходные плёнки MXene уже обладают высокой электропроводностью и хорошей циклической стабильностью, функционализация – путём легирования элементами или молекулярной интеркаляции – значительно повышает их ёмкость и быстродействие. Регулируя межслоевые расстояния, создавая дополнительные редокс-активные центры и предотвращая рестэкинг нанолистов, модифицированные MXene устраняют ограничения исходных материалов и приближают их к практическому применению в суперконденсаторах [10].

Таким образом, обширный обзор показывает, что MXenes являются чрезвычайно перспективным классом материалов для устройств накопления энергии благодаря их превосходной электропроводности и высокой удельной площади поверхности. Однако, для перехода от лабораторных испытаний к успешной интеграции в реальные узлы машин и агрегатов, необходимо решить ряд конструктивно-технологических задач. Ключевая инженерная проблема заключается в достижении оптимального баланса между электрохимической производительностью и физико-механической стабильностью электрода. Мы не можем рассматривать удельную емкость (F/g) изолированно от таких факторов, как устойчивость к вибрациям, гибкость и механическая целостность электрода, которые являются критическими для обеспечения надёжности и долговечности энергомодулей в условиях промышленной эксплуатации. Разработка трехмерных архитектур, легирование и создание гибридных композитов на основе MXenes — это не просто способ увеличения емкости, но, в первую очередь, технологическая стратегия, направленная на:

1. Предотвращение рестэкинга: Что обеспечивает стабильные пути диффузии ионов на протяжении тысяч циклов, повышая тем самым ресурс всего энергомодуля.

2. Повышение проводимости в объеме: Что критически важно для обеспечения высокой плотности мощности и минимизации тепловыделения при пиковых токах (например, в системах рекуперативного торможения).

3. Обеспечение механической прочности и гибкости: Что позволяет встраивать суперконденсаторы в сложные, подверженные деформации, элементы конструкций (например, в качестве источников питания для датчиков вибромониторинга).

Целью данной работы является комплексный анализ перспектив применения MXene-наноструктур в устройствах накопления энергии. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: 1) провести обзор современных методов синтеза, модификации и анализа эксплуатационных характеристик MXene-электродов, с акцентом на инженерно-конструктивные аспекты; 2) синтезировать титановый MXene Ti_3C_2Tx мягким методом LiF/HCl и экспериментально исследовать его электрохимическое поведение в щелочном электролите с целью подтверждения его потенциала для интеграции в высокодинамичные машиностроительные узлы.

Материалы и методы

Синтез MXenes. Синтез Ti_3C_2Tx осуществлялся с использованием мягкого in-situ метода травления. Для приготовления травителя 1.6 г LiF растворяли в 20 мл 9 M HCl в полиэтиленовом сосуде и перемешивали в атмосфере азота при температуре ~35 °C до полного растворения LiF. Затем в полученный раствор медленно добавляли 1 г коммерческого порошка Ti_3AlC_2 (размер частиц ~200 меш). Суспензию перемешивали при помощи магнитной мешалки при температуре 35 °C в течение ~40 часов, что обеспечивало образование HF in-situ и избирательное удаление Al из MAX-фазы. В ходе реакции выделялся газообразный водород, и процесс протекал по уравнению 1:

$$Ti_3AlC_2 + 3LiF + 3HCl \rightarrow Ti_3C_2Ti_x + AlF_3 + 3LiCl + {}^3/_2\ H_2\uparrow \quad (1)$$

В результате гидролиза на поверхности образующихся Ti_3C_2 слоёв формировались терминальные группы −O, −OH и −F.По завершении травления кислый надосадочный раствор удаляли, а твёрдый остаток промывали деионизированной водой до достижения pH ~6, сопровождавшегося самопроизвольным расслаиванием чешуек MXene. Для удаления нерасслоившихся частиц суспензию центрифугировали при 3500 об/мин в течение 1 часа. Полученный осадок сушили в вакууме при 60 °C.

Электрохимические испытания. Электрохимические испытания проводились в ячейках CR2032, собранных в аргоновом перчаточном боксе. Литиевая фольга использовалась как противоэлектрод, сепаратором служила мембрана Celgard 2500, электролитом – 6M KOH. Рабочие электроды из MXene, Super C45 и ПВДФ (80:10:10) диспергировали в NMP и наносили на медную фольгу (18 мкм, слой 75 мкм). После вакуумной сушки при 110 °C в течение 5 ч электроды вырубали в диски диаметром 16 мм. Нагрузка активного вещества составляла ~0,4 мг/см².

Результаты и обсуждение

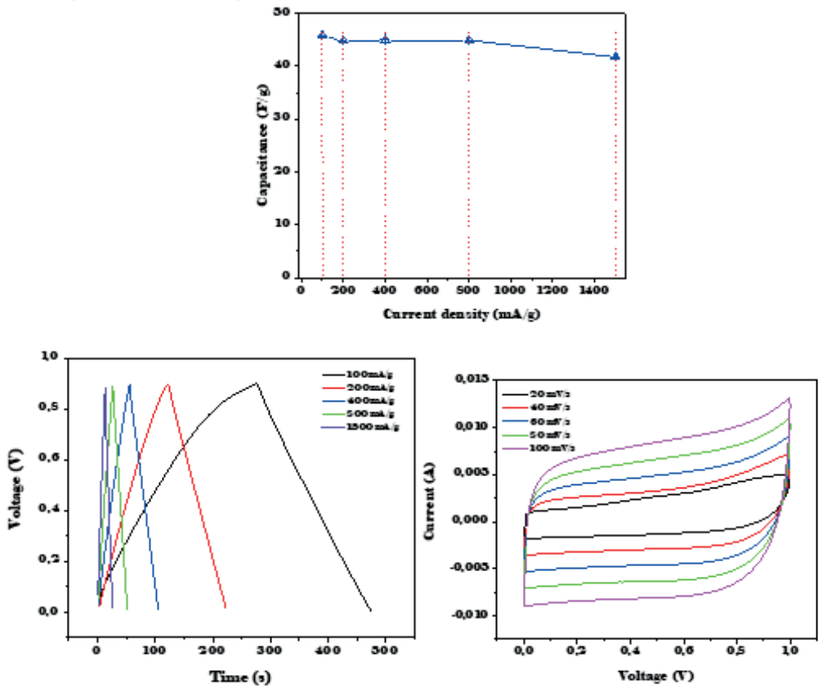


Рисунок 3 – Электрохимические характеристики MXene-электрода в электролите 6M KOH:
(a) зависимость удельной ёмкости от плотности тока;
(b) гальваностатические заряд-разрядные кривые при различных плотностях тока;
(c) циклические вольтамперные кривые при различных скоростях сканирования.

Электрохимические характеристики MXene-электродов в электролите 6M KOH были исследованы методами циклической вольтамперометрии (CV), гальваностатического заряда-разряда (GCD) и измерений удельной ёмкости при различных плотностях тока.

На рис. 3a представлена зависимость удельной ёмкости от плотности тока. При низкой плотности тока 100 mA/g удельная ёмкость составила около 44 F/g. С увеличением плотности тока до 1500 mA/g наблюдается незначительное снижение значения ёмкости (~42 F/g), что свидетельствует о высокой скорости-способности MXene-электродов. Незначительное уменьшение ёмкости при повышении плотности тока связано с ограниченной диффузией ионов электролита во внутренние поры при быстрых процессах заряда-разряда.

Гальваностатические заряд-разрядные кривые при различных плотностях тока (рис. 3б) демонстрируют почти линейную и симметричную форму, характерную для систем с ёмкостью двойного электрического слоя. При плотности тока 100 mA/g длительность заряд-разрядного цикла достигает ~450 с, тогда как при 1500 mA/g время сокращается до нескольких десятков секунд, что согласуется с ускорением процессов накопления и отдачи заряда. Симметричный характер кривых указывает на высокую кулоновскую эффективность и минимальные энергетические потери.

На рис. 3в представлены CV-кривые при различных скоростях сканирования (20–100 mV/s). Кривые сохраняют квазипрямоугольную форму, что подтверждает типичное поведение конденсатора с двойным электрическим слоем (EDLC). При увеличении скорости сканирования площадь под кривой возрастает, при этом форма кривых практически не искажается, что указывает на быструю кинетику ионного транспорта и высокую обратимость электрохимических процессов. Отсутствие выраженных пиков подтверждает, что накопление заряда протекает преимущественно за счёт формирования электрического двойного слоя, без значительного вклада псевдоёмкостных реакций.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что MXene-электроды в щёлочном электролите (6M KOH) характеризуются:

– высокой удельной ёмкостью (~44 F/g),

– отличной скорости-способностью,

– стабильным ёмкостным поведением при различных скоростях сканирования.

Эти характеристики подтверждают высокую перспективность MXene в качестве материала для суперконденсаторов.

Однако, что более важно, полученные электрохимические показатели имеют прямое и значимое значение для практической реализации в машиностроительных системах, что является ключевым аспектом прикладной значимости данной работы. Отличная скоростная способность, подтвержденная незначительным снижением удельной емкости с 44 F/g до 42 F/g при увеличении плотности тока в 15 раз, прямо указывает на исключительно низкое внутреннее сопротивление электрода. Этот параметр является определяющим для достижения высокой удельной плотности мощности (W) которая необходима для работы в режиме пиковых токов, характерных для современного оборудования. Например, в системах рекуперативного торможения электромобилей или многоосевых промышленных роботов требуется мгновенное поглощение значительной мощности. Суперконденсаторы на основе MXene способны эффективно аккумулировать этот импульс, что позволяет снизить тепловую нагрузку и повысить надёжность приводного узла по сравнению с традиционными литий-ионными источниками. Более того, высокий потенциальный ресурс Mxene (сотни тысяч циклов) напрямую повышает долговечность критически важных узлов, таких как активные системы виброгашения или аварийные энергомодули в оборудовании непрерывного цикла. В итоге, высокий уровень производительности Mxene позволяет инженерам-конструкторам создавать компактные и высоконадёжные энергомодули с лучшими

массо-габаритными характеристиками (МГХ), что является стратегическим преимуществом в разработке портативной техники и аэрокосмических систем.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992873).

Выводы

В настоящем обзоре подчёркивается растущее значение современных материалов для накопления энергии в условиях глобального перехода от ископаемого топлива к прерывистым возобновляемым источникам. MXenes – двумерные карбиды и нитриды переходных металлов – рассматриваются как одни из наиболее перспективных кандидатов для создания электродов суперконденсаторов благодаря их высокой металлической проводимости, гидрофильности и регулируемому химическому составу поверхности. За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в синтезе MXenes как с использованием традиционного высокочастотного травления, так и более безопасных «мягких» методов LiF/HCl. Наряду с этим активно исследуются модификации структуры, включая регулирование межслоевых расстояний, изменение поверхностных окончаний посредством легирования, инженерии вакансий и создания композитов. Подобные подходы позволили достичь удельной ёмкости от нескольких сотен до более тысячи фарад на грамм, расширить рабочий диапазон напряжений и повысить показатели производительности. Дополнительное улучшение достигается при формировании композитов MXene с углеродными материалами, полимерами или оксидами металлов, что обеспечивает повышенную механическую стабильность и предотвращает повторное наслаивание нанолистов.

Наши собственные электрохимические исследования подтверждают эти литературные данные. Титановые электроды, синтезированные мягким методом и испытанные в 6 M KOH, продемонстрировали удельную ёмкость ~44 F g^{-1} при низкой плотности тока и сохраняли значительную её часть даже при более высоких скоростях, что свидетельствует о превосходных скоростных характеристиках. Гальваностатические кривые заряда–разряда имели почти идеальную симметричную форму, демонстрируя высокую кулоновскую эффективность, а циклические вольтамперограммы сохраняли квазипрямоугольный профиль при различных скоростях сканирования, что подтверждает механизм накопления заряда в двойном электрическом слое.

В совокупности эти результаты показывают, что MXenes обладают не только теоретическим потенциалом, но и подтверждённой практической эффективностью в качестве электродных материалов для суперконденсаторов. Эти характеристики имеют решающее значение для прикладного машиностроения, поскольку они демонстрируют потенциал MXenes в обеспечении ключевых эксплуатационных преимуществ перед традиционными накопителями энергии.

Превосходные скоростные характеристики, такие как низкое снижение ёмкости при переходе к высоким плотностям тока, напрямую указывают на возможность работы в режиме пиковых нагрузок с минимальными тепловыми

потерями. Это критически важно для приводных систем и роботизированных манипуляторов, где требуется высокая динамика и ресурс, а также для эффективной рекуперации энергии в электрических транспортных средствах. Использование суперконденсаторов на основе MXene в таких узлах позволяет значительно повысить надёжность и увеличить срок службы оборудования, поскольку они легко выдерживают циклы заряда-разряда, губительные для литий-ионных батарей. Более того, высокая плотность мощности, достижимая благодаря MXene, даёт инженерам-конструкторам возможность существенно сократить массо-габаритные характеристики (МГХ) энергомодулей. Такой подход способствует созданию более компактных, легких и структурно интегрируемых накопителей для систем активного виброгашения, аэрокосмических механизмов и портативного оборудования, где каждый сэкономленный килограмм и кубический сантиметр имеет стратегическое значение.

Представленные результаты по синтезу и электрохимическому поведению закладывают основу для разработки композитов на основе MXene с улучшенной механической стабильностью и гибкостью. Дальнейшие исследования в области экологически безопасного и масштабируемого синтеза, а также разработка многокомпонентных композитов, устойчивых к эксплуатационным нагрузкам (вибрации, перепады температур), необходимы для ускорения коммерческого внедрения MXene-суперконденсаторов в промышленные и транспортные системы, подтверждая их роль как ключевого элемента для устойчивого развития современного машиностроения.

REFERENCES

1 **González A. et al.** Review on supercapacitors : Technologies and materials // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd, 2016. – Vol. 58. – P. 1189–1206.

2 **Salih A. J. S., Huseyin A.** Nitrogen-doped MXene for supercapacitor: A review // J Energy Storage. Elsevier, 2025. – Vol. 131. – P. 117521.

3 **Saju D.M. et al.** MXene material for supercapacitor applications: A comprehensive review on properties, synthesis and machine learning for supercapacitance performance prediction // J Power Sources. Elsevier, 2025. – Vol. 647. – P. 237302.

4 **Nahirniak S., Ray A., Saruhan B.** Challenges and Future Prospects of the MXene-Based Materials for Energy Storage Applications // Batteries. MDPI, 2023. – Vol. 9. – № 2.

5 **Siwal S. S. et al.** Unveiling interfacial chemistry: The importance and applications of MXene-based materials in energy storage devices // J Energy Storage. Elsevier, 2025. – Vol. 132. – P. 117694.

6 **Wang D. et al.** An intercalated structure MXene@CCNS : cuttlefish ink-derived carbon nanospheres composite Ti_3C_2Tx MXene for supercapacitors // Chemical Engineering Journal. Elsevier, 2025. – Vol. 522. – P. 167612.

7 **Alipuly M. et al.** MXene materials : modern synthesis methods, eco-friendly approaches, and prospects for application as coatings and composite materials // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. – 2025. – № 2(18). – P. 487–501.

8 **Sun X. et al.** Covalently intercalated MXene/graphene composite film enables ultrasensitive acoustic sensors under extreme conditions // Carbon N Y. Pergamon, 2026. – Vol. 246. – P. 120861.

9 **Li R. et al.** Fabrication of MXene/reduced graphene oxide/MoO3 film electrode for flexible supercapacitors // J Energy Storage. Elsevier, 2025. – T. 131. – C. 117669.

10 Functionalized MXene as a multifunctional crosslinker for reinforced novel waste PET-depolymerized monomer-based polyurethane composites with electrical conductivity and electromagnetic shielding effect // Composites Communications. Elsevier, 2025. – P. 102598.

Поступило в редакцию 05.11.25.
Поступило с исправлениями 06.11.25.
Принято в печать 24.11.25.

Е. Есжан[1], Қ. Асқарұлы[2], Е. Евлампиева[3], R. Amrousse[4], С. Азат[5]
[1,2,5]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Shakarim University, Қазақстан Республикасы, Семей қ.;
[4]Chouaib Doukkali University, Faculty of Sciences, Марокко, Эль-Джадида қ.
05.11.25 ж. баспаға түсті.
06.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
24.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖОҒАРЫ ТИІМДІ ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫ ҮШІН MXENE НАНОҚҰРЫЛЫМДАРЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ

Тұрақты энергетика саласындағы шешімдерге деген өсіп келе жатқан сұраныс энергия сақтау жүйелеріне арналған озық материалдарды қарқынды зерттеуге түрткі болып отыр. MXene – өтпелі металдардың екіөлшемді карбидтері мен нитридтері – ерекше металл өткізгіштігімен, беткі қабаттың реттелетін химиялық құрамымен және айқын гидрофильдік қасиеттерімен сипатталып, жаңа буынды суперконденсаторлар үшін ең перспективалы кандидаттардың бірі болып саналады.

*Бұл жұмыста суперконденсаторларда қолданылатын MXene материалдарының синтезі, құрылымдық модификациясы және электрохимиялық сипаттамалары бойынша жан-жақты шолу ұсынылған. HF негізіндегі дәстүрлі травлеу әдістерімен қатар, LiF/HCl жүйесіне негізделген қауіпсіздеу *in-situ* әдістер сияқты әртүрлі синтез тәсілдері қарастырылған. Ішкі шектеулерді еңсеру стратегиялары функционализацияға, гетероатомдық легірлеуге, вакансия инженериясына, сондай-ақ көміртекті материалдар мен металл оксидтерімен гибридті композиттер және үшөлшемді архитектуралар құруға бағытталған.*

LiF/HCl жұмсақ әдісімен синтезделген титан негізіндегі MXene бойынша жүргізілген тәжірибелік зерттеулер 6 М KOH электролитінде шамамен 44 F g^{-1} меншікті сыйымдылық көрсетіп, жоғары өнімділік пен тамаша циклдік тұрақтылықты қамтамасыз етті. Тікбұрышқа жуық CV-профильдер мен симметриялық заряд-разряд қисықтары қос электр қабатының заряд жинау механизмін және жоғары кулондық тиімділікті дәлелдейді.

Алынған нәтижелер MXene электродтарының жоғары қуат тығыздығын, зарядтың жылдам берілуін және ұзақ қызмет ету мерзімін біріктіретінін көрсетеді. Бұл қасиеттер оларды жоғары өнімді және экологиялық тұрғыдан тұрақты энергия сақтау құрылғыларын жасауға арналған ең үмітті материалдардың қатарына енгізеді. Сонымен қатар, мұндай энергия сақтау жүйелері машина жасау саласында да зор әлеуетке ие, себебі жеңіл, қуатты және ұзақ мерзімді энергия көздері жалпы механикалық тиімділікті және өнімділікті арттыру үшін шешуші рөл атқарады.

Кілтті сөздер: тұрақты энергия, энергия сақтау жүйелері, суперконденсаторлар, MXene электродтары, жұмсақ өңдеу әдісі.

Y. Yeszhan[1], K. Askaruly[2], Y. Yevlampiyeva[3], R. Amrousse[4], S. Azat[5]
[1,2,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey;
[4]Chouaib Doukkali University, Faculty of Sciences, Morocco, El Jadida.
Received 05.11.25.
Received in revised form 06.11.25.
Accepted for publication 24.11.25.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MXENE NANOSTRUCTURES FOR HIGHLY EFFICIENT ENERGY STORAGE DEVICES

The growing demand for sustainable energy solutions is driving intensive research into advanced materials for energy storage systems. MXenes–two-dimensional transition metal carbides and nitrides–are considered among the most promising candidates for next-generation supercapacitors due to their exceptional metallic conductivity, tunable surface chemistry, and pronounced hydrophilicity. This paper presents a comprehensive review of the synthesis, structural modification, and electrochemical performance of MXene materials used in supercapacitors. Various synthesis methods are discussed, including traditional HF etching and safer in-situ methods based on LiF/HCl systems. Strategies for overcoming inherent limitations are analyzed, focusing on functionalization, heteroatom doping, vacancy engineering, and the formation of three-dimensional architectures and hybrid composites with carbon materials and metal oxides. Experimental studies conducted on titanium MXene synthesized using the LiF/HCl soft method revealed a specific capacity of approximately 44 F g^{-1} in a 6 M KOH electrolyte, providing high performance and excellent cyclic stability. Nearly rectangular CV profiles and symmetric charge-discharge curves confirm the charge storage mechanism in the electric double layer and high Coulombic efficiency. The obtained results demonstrate that MXene electrodes combine high power density, fast charge transfer, and a long cycle life,

making them one of the most promising materials for creating high-performance and environmentally sustainable energy storage devices. These energy storage systems also hold significant potential for applications in mechanical engineering, where lightweight, high-power, and long-lasting energy sources are crucial for improving overall mechanical efficiency and performance.

Keywords: sustainable energy, energy storage systems, supercapacitors, MXene electrodes, gentle processing method.

МРНТИ 55.13.15

https://doi.org/10.48081/WGMB9394

С. А. Зигангиров[1], А. С. Янюшкин[2], И. В. Бульдяев[3],
****А. Ж. Касенов[4], С. П. Харченко[5]***

[1,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2]Чувашский государственный университет,
Российская Федерация, г. Чебоксары;
[3]ООО «Бустер ПРО», Российская Федерация, г. Новосибирск;
[4]Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации,
Республика Казахстан, г. Тараз;
[5]Инновационный Евразийский университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6271-5404
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1969-7840
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0842-1331
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1439
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1791-345X
*e-mail: kassenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ГЛУБОКИМИ МИКРООТВЕРСТИЯМИ

В Республике Казахстан стабильно растет объем производства в машиностроении и металлообработке, стимулируется конкурентоспособность предприятий по повышению доли обработанной продукции с высокой добавленной стоимостью и ориентацией на внешние рынки.

Одной из актуальных задач машиностроения является изготовление глубоких отверстий малого диаметра (диаметр ≤ 1–3 мм при глубине 20–100 мм и более) в стальных деталях машиностроения. Проблема имеет комплексный характер и связана с сочетанием геометрических, тепловых и материаловедческих факторов.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по совершенствованию технологического процесса изготовления деталей с глубокими микроотверстиями за счет замены операции сверления электроэрозионной обработкой на примере детали «Носик автотрубы» экструдера для полимеров из стали 40Х.

Целью исследования являлось сравнение технологического процесса изготовления деталей с глубоким микроотверстием методами стандартной и электроэрозионной обработки.

В производственных условиях ООО «Бустер ПРО» для детали «Носик автотрубы» из стали 40Х проведен сравнительный анализ двух технологических схем изготовления: с применением традиционного механического сверления и с применением электроэрозионной обработки.

Выявлено, что для сверления глубоких микроотверстий электроэрозионная обработка однозначно превосходит механическое сверление по точности, надежности и стабильности при сравнимой себестоимости изготовления деталей.

Ключевые слова: машиностроение, электроэрозионная обработка, сверление, сталь 40Х, металлообработка.

Введение

В Республике Казахстан стабильно растет объем производства в машиностроении и металлообработке, стимулируется конкурентоспособность предприятий по повышению доли обработанной продукции с высокой добавленной стоимостью и ориентацией на внешние рынки. Драйверами роста остаются транспортное, нефтегазовое, электротехническое и горнорудное машиностроение [1].

Одной из актуальных задач машиностроения является изготовление глубоких отверстий малого диаметра (диаметр ≤ 1–3 мм при глубине 20–100 мм и более) в стальных деталях машиностроения. Проблема имеет комплексный характер и связана с сочетанием геометрических, тепловых и материаловедческих факторов:

1) Ограничения традиционного механического сверления. При отношениях глубина/диаметр (L/D) ≥ 10–20 резко возрастают нагрузки на режущий инструмент:

– быстрое затупление режущей кромки, особенно на легированных, закалённых и нержавеющих сталях (HRC 40–60);

– интенсивная вибрация и биение инструмента при диаметрах <2 мм;

– риск поломки длинного тонкого сверла в зоне контакта;

– деформация и увод сверла, приводящие к «уводу» оси отверстия и отклонению геометрии.

Исследования показывают, что при сверлении высокопрочных сталей стабильно обеспечивать точность отверстий с L/D>15 практически невозможно [2].

2) Трудности охлаждения и смазки зоны резания.

Для отверстий малого диаметра подача охлаждающей жидкости затруднена из-за малого зазора между инструментом и стенкой, что приводит к ухудшению отвода теплоты, возникновению перегрева зоны резания, ускорению износа инструмента, ухудшению эвакуации стружки, что вызывает её прессование и заклинивание.

Особенно критично это при обработке конструкционных и нержавеющих сталей, стружка которых склонна к налипанию и образованию длинных спиральных сегментов [3].

3) Проблемы эвакуации стружки. В глубоких отверстиях стружка практически не может выходить свободно, что приводит к:

– образованию пробок из спрессованной стружки;

– росту сил сверления;

– появлению задиров, рисок, микротрещин;

– вероятной поломке инструмента.

Работы по моделированию течения стружки в глубоких отверстиях показывают, что эвакуация при диаметрах <2 мм становится крайне нестабильной [4].

4) Ограничения по обрабатываемым сталям. Многие машиностроительные детали изготавливаются из труднообрабатываемых сталей [5]:

– жаропрочных мартенситных сталей;
– хромистых и высокохромистых сталей;
– нержавеющих и коррозионностойких сталей (304, 316, 12Х18Н10Т);
– инструментальных сталей (Р6М5, Х12МФ);
– закалённых деталей с твёрдостью выше 55–60 HRC.

Механическое сверление отверстий малого диаметра в таких материалах сопровождается:

– значительным ростом сил резания;
– интенсивным износом режущей кромки;
– потерей геометрической точности;
– остаточными напряжениями и структурными изменениями.

5) Ограничения по точности и шероховатости. Даже при использовании современных высокоточных станков возникают:

– отклонения прямолинейности;
– конусность отверстия;
– недопустимая овальность;
– увеличение параметров шероховатости Ra и Rz.

Для изделий в автомобилестроении, энергетике, производстве гидравлических систем и пресс-форм требования к качеству поверхности очень высоки (Ra ≤ 1,6–0,8 мкм), что сложно обеспечить механическим методом при L/D > 20 [6].

6) Требования современной техники. Глубокие отверстия малого диаметра требуются в дизельных форсунках (d = 0,12–0,25 мм), охлаждающих каналах турбинных элементов, пресс-формах и штампах, медицинских инструментах и имплантатах, системах гидравлики высокого давления, микроотверстиях под электронику и датчики [7;8;9;10].

В этих областях требуются минимальная погрешность диаметра, отсутствие микротрещин, высокая стойкость детали, отсутствие механических напряжений. Механическое сверление часто не в состоянии обеспечить такие параметры, что делает проблему актуальной.

Целью исследования является сравнение технологического процесса изготовления деталей с глубоким микроотверстием методами стандартной и электроэрозионной обработки.

Материалы и методы

На рисунке 1 в качестве детали-представителя показана деталь «Носик автотрубы». Материал детали сталь 40Х по ГОСТ4543-71.

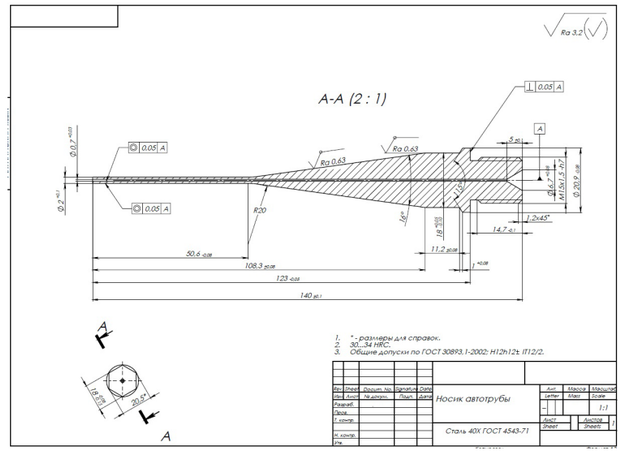


Рисунок 1 – Чертеж детали «Носик автотрубы»

Деталь «Носик автотрубы» экструдера технологической линии по изготовлению полимерных труб (рисунок 2) – это конечный формообразующий элемент экструзионной головки, который отвечает за предварительное придание геометрии полимерной трубе и стабилизацию ее потока перед калибровкой.

Рисунок 2 – Общий вид экструдера технологической линии по изготовлению полимерных труб

Требования, предъявляемые к детали – высокая износостойкость при трении, термостойкость при температурах 180 – 230 °С, коррозионная стойкость и низкая шероховатость (необходима полировка зеркального класса).

В производственных условиях ООО «Бустер ПРО» была изготовлена деталь «Носик автотрубы» (рисунок 1) по двум схемам технологического процесса:

1) с применением традиционного механического сверления;

2) с применением электроэрозионной обработки.

Базовый технологический процесс изготовления детали «Носик автотрубы» с применением традиционного механического сверления включал в себя следующие этапы:

1) Заготовительный этап.

2) Черновая токарная обработка резанием.

3) Механическая обработка отверстий:

– центровка;

– предварительное пилотное сверление сверлом с большим диаметром (1 мм) на глубину 10–15 мм с целью задать направление для инструмента меньшего диаметра;

– сверление сквозного осевого отверстия;

– дорновое раскатывание и микророзвертка.

4) Чистовая токарная обработка наружных поверхностей:

– точная обработка цилиндрических поверхностей;

– нарезание резьбы, углов, фасок;

– обработка конуса.

5) Термическая обработка (закалка 820–860 °С и отпуск 200–300 °С).

6) Финишная механическая обработка после термической обработки, доводка, контроль качества.

Далее проводили изготовление детали «Носик автотрубы» (рисунок 1) с применением электроэрозионной обработки, который включал в себя следующие этапы:

1) Заготовительный этап.

2) Черновая токарная обработка для формирования опорных поверхностей.

3) Электроэрозионная обработка отверстий:

– подготовка к электроэрозионной обработке отверстий;

– прошивание отверстия;

– электроэрозионное калибрующее доведение и промывка канала.

4) Чистовая токарная обработка наружных поверхностей.

5) Термическая обработка (закалка 820–860 °С и отпуск 200–300 °С).

6) Финишная механическая обработка после термической обработки, доводка, контроль качества.

На втором этапе проводили лабораторные металлографические исследования для определения структурных характеристик детали. Шлифы образцов из стали перед микроскопическим исследованием протравливали 1 мин в 4 %-ном растворе азотной кислоты [11]. Исследование микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе OLYMPUS BX2M при кратности увеличения 100, 200.

Результаты и обсуждение

Сравнительный анализ способов изготовления детали «Носик автотрубы» показывает, что электроэрозионная обработка отверстий заменяет весь комплекс механического сверления-дорнового раскатывания-развертывания и значительно технологичнее при сверхмалых диаметрах отверстий и большой глубине, обеспечивает более прямолинейное и стабильное по диаметру отверстие.

Итоги сравнительного анализа данных способов приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ способов изготовления детали «Носик автотрубы»

Критерий	Механическое сверление	Электроэрозионная обработка
Сложность выполнения	Очень высокая при глубине > 50-70 мм	Средняя
Вероятность ухода инструмента (искривление канала)	Высокая (из-за гибкости сверла малого диаметра)	Практически отсутствует, канал формируется электрическим разрядом
Облом сверла	Часто, особенно при соотношении L/D > 100	Отсутствует (электрод не контактирует с металлом)
Требования к оснастке	Сверхжёсткая фиксация, высокоточный шпиндель	Стандартная EDM-фиксация
Отклонения от прямолинейности	До 0,1-0,3 мм на глубине >100 мм	0,01-0,03 мм на той же глубине
Точность диаметра	Сложно обеспечить диаметр 0,7±0,03 без микроразвертки	диаметр 0,7±0,03 достигается без калибрования
Овальность	Часто повышенная	Практически отсутствует
Качество поверхности	Ra 1,6÷3,2 (без доводки)	Ra 1,0÷2,5 (в зависимости от режимов)
Скорость процесса	Быстрая при малых глубинах, резко падает глубже 10×D	Умеренная, но стабильная
Время обработки отверстия Ø0,7×100 мм	10-20 минут (с перерывами на выведение стружки)	20-30 минут (не требует отвода инструмента)
Простои/поломки	Значительные	Минимальные
Себестоимость	Выше при единичном и мелкосерийном	Стабильно низкая, особенно в единичном и мелкосерийном производстве
Возможность обработки закаленной стали	Затруднена	Выполняется без проблем до 55-60 HRC

Сравнительный анализ микроструктур поверхностного слоя детали «Носик автотрубы» после термической обработки (закалка 820–860 °С и отпуск 200–300 °С) полученной с применением традиционного механического сверления и с применением электроэрозионной обработки показал следующее.

Для детали, полученной механическим сверлением микроструктурных следов сверления практически нет, на поверхности отсутствуют следы наклепа и полос сдвига, микроструктура представлена сорбитом отпуска.

Для детали, полученной электроэрозионной обработкой микроструктура поверхностного слоя представлена следами плотного белого слоя, толщиной до 15 мкм. Причиной образования данного слоя является сам процесс электроэрозионной обработки и повышенное содержание углерода и примесей легирующих компонентов электрода (Cu, Zn, C).

Информация о финансировании

Исследования проводились в рамках госбюджетной программно-целевой научной-исследовательской работы Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту ИРН BR24993003-ОТ-24 «Разработка комплекса мероприятий инструментального обеспечения обрабатывающих отраслей экономики».

Выводы

В производственных условиях ООО «Бустер ПРО» для детали «Носик автотрубы» из стали 40Х проведен сравнительный анализ двух технологических схем изготовления: с применением традиционного механического сверления и с применением электроэрозионной обработки.

Выявлено, что для сверления глубоких микроотверстий электроэрозионная обработка однозначно превосходит механическое сверление по точности, надежности и стабильности при сравнимой себестоимости изготовления деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Концепция развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 20 декабря 2018 года № 846.

2 **Nguyen, M. D., Rahman, M., Wong, Y. S.** Simultaneous micro-EDM and micro-ECM in low-resistivity deionized water // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 54 – 55, March – April, PP. 55 – 65.

3 **Sherov, K. T., Musina, Zh. K., Sagitov, A. A., Itybayeva, G. T., Mazdubay, A. V., Sherov, A. K., Kossatbekova, D. Sh., Tussupova S. O., Kassenov A. Zh.** A Study on Surface Quality and Stress-State in Rotational Turning of Steel 45 Using Experimental and FEM Approaches // Engineering, Technology & Applied Science Research – 2025. – Vol. 15. –№ 6. – P. 28502–28510.

4 **Мусина, Ж. К., Луб, Т. Л., Шумейко, И. А., Деревягин, С. И., Ткачук, А. А.** Математическое моделирование процесса износа при ротационной обработке инструментом с самовращающейся кромкой // Наука и техника Казахстана – 2025. – № 1. – С. 128–142.

5 **Касенов, А. Ж.** Ресурсоэнергосберегающие металлорежущие инструменты: монография. – Павлодар: Toraighyrov University, 2025. – 129 с.

6 **Абишев, К. К., Бочкарёв, П. Ю., Гумаров, Г. С., Митин, С. Г., Назарьев, А. В., Янюшкин, А. С.** Технологическое обеспечение эффективного изготовления высокоточных изделий: монография. – Павлодар : Toraighyrov University, 2022. – 115 с.

7 **Касенов, А. Ж., Таскарина, А. Ж., Абишев, К. К., Муканов, Р. Б., Итыбаева, Г. Т., Мусина, Ж. К., Быков, П. О., Маздубай, А. В., Искакова, Д. А., Евтушенко, Т. Л.** Спиральное сверло без поперечной кромки со специальной формой заточки перьев, подточки ленточки и передней поверхности (варианты)

// Патент на полезную модель РК № 7293 МКИ B23B 51/02. Заявлено 15.04.2022; Опубл. 22.07.2022. Бюллетень № 29 от 22.07.2022 года.

8 **Mukanov, R. B., Kasenov, A. Zh, Itybaeva, G. T., Musina, Zh. K., Abisheva K. K., Bykov, P. O.** Face Turning of Holes // Russian Engineering Research, 2019. – Vol. 39. – № 1. – P. 75–78.

9 **Быков, П. О., Нефтисов, А. В., Богомолов, А. В., Каменов, А. А.** Жел энергетикалық қондырғылардың металл бөлшектерінің бұзылуын макро- және микроқұрылымдық талдау // Наука и техника Казахстана, 2023. – № 2. – С. 76 – 85.

10 **Быков, П. О., Зигангиров, С. А., Муканов, Р. Б., Бульдяев, И. В.** Оптимизация технологической подготовки изготовления зубчатых колес горно-металлургического оборудования // Наука и техника Казахстана – 2025. – № 3. – С. 20 – 32.

11 **Лякишев, Н. П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : В 3 т.: Т. 1. – М. : Машиностроение, 1996. – 992 с.

REFERENCES

1 Koncepciya razvitiya obrabaty`vayushhej promy`shlennosti Respubliki Kazaxstan na 2023 – 2029 gody` [The concept of the development of the manufacturing industry of the Republic of Kazakhstan for 2023-2029] [Text], utverzhdyonnaya Postanovleniem Pravitel`stva Respubliki Kazaxstan ot 20 dekabrya 2018 goda № 846.

2 **Nguyen, M. D., Rahman, M., Wong, Y. S.** Simultaneous micro-EDM and micro-ECM in low-resistivity deionized water // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012, March – April. – Vol. 54 – 55, 55 – 65.

3 **Sherov, K. T., Musina, Zh. K., Sagitov, A. A., Itybayeva, G. T., Mazdubay, A. V., Sherov, A. K., Kossatbekova, D. Sh., Tussupova S. O., Kassenov A. Zh.** A Study on Surface Quality and Stress-State in Rotational Turning of Steel 45 Using Experimental and FEM Approaches // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2025. – Vol. 15. – № 6. – P. 28502–28510.

4 **Musina, Zh. K., Lub, T. L., Shumejko, I. A., Derevyagin, S. I., Tkachuk, A. A.** Matematicheskoe modelirovanie processa iznosa pri rotacionnoj obrabotke instrumentom s samovrashhayushhejsya kromkoj [Mathematical modeling of the wear process during rotary machining with a tool with a self-rotating edge] [Text] // Nauka i texnika Kazaxstana – 2025. – № 1. – P. 128–142.

5 **Kasenov, A. Zh.** Resursoe`nergosberegayushhie metallorezhushhie instrumenty` [Resource-saving metal cutting tools : monograph] [Text]: Pavlodar : Toraighyrov University, 2025. – 129 p.

6 **Abishev, K. K., Bochkaryov, P. Yu., Gumarov, G. S., Mitin, S. G., Nazar`ev, A. V., Yanyushkin, A. S.** Texnologicheskoe obespechenie e`ffektivnogo izgotovleniya vy`sokotochny`x izdelij : monografiya [Technological support of effective production of high-precision products] [Text]: Pavlodar: Toraighyrov University, 2022. – 115 p.

7 **Kasenov, A. Zh., Taskarina, A. Zh., Abishev, K. K., Mukanov, R. B., Ity`baeva, G. T., Musina, Zh. K., By`kov, P. O., Mazdubaj, A. V., Iskakova, D. A., Evtushenko, T. L.** Spiral`noe sverlo bez poperechnoj kromki so special`noj formoj zatochki per`ev, podtochki lentochki i perednej poverxnosti (varianty`) [Spiral drill without a cross edge with a special shape for sharpening feathers, sharpening ribbons and the front surface (option)] [Text] // Patent na poleznuyu model` RK № 7293 MKI V23V 51/02. Zayavleno 15.04.2022; Opubl. 22.07.2022. Byulleten` № 29 ot 22.07.2022 goda.

8 **Mukanov, R. B., Kasenov, A. Zh, Itybaeva, G. T., Musina, Zh. K., Abisheva, K. K., Bykov, P. O.** Face Turning of Holes // Russian Engineering Research, 2019. – Vol. 39. – № 1. – P. 75–78.

9 **By`kov, P. O., Neftisov, A. V., Bogomolov, A. V., Kamenov, A. A.** Zhel e`nergetikaly`k qondy`rqy`lardy`n metall bolshekterinin buzy`luy`n makro- zhane mikroқұry`ly`mdy`қ taldau [Macro- and microstructural analysis of the failure of metal parts of wind power plants] [Text] // Nauka i texnika Kazaxstana, 2023. – № 2. – P. 76–85.

10 **By`kov P. O., Zigangirov S. A., Mukanov R. B., Bul`dyaev I. V.** Optimizaciya texnologicheskoj podgotovki izgotovleniya zubchaty`x koles gorno-metallurgicheskogo oborudovaniya [Optimization of technological preparation for the manufacture of gears for mining and metallurgical equipment] [Text] // Nauka i texnika Kazaxstana – 2025. – № 3. – P. 20–32.

11 **Lyakishev N. P.** Diagrammy` sostoyaniya dvojny`x metallicheskix sistem [Phase diagrams of binary metallic system] [Text] : spravochnik : V 3 t.: T. 1. – M. : Mashinostroenie, 1996. – 992 p.

Поступило в редакцию 15.11.25.
Поступило с исправлениями 18.11.25.
Принято в печать 24.11.25.

С. А. Зигангиров[1], А. С. Янюшкин[2], И. В. Бульдяев[3],
****А. Ж. Касенов[4], С. П. Харченко[5]***
[1,4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2]Чуваш мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы, Чебоксары қ.;
[3]ООО «Бустер ПРО», Ресей Федерациясы, Новосибирск қ.;
[4]Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті,
Қазақстан Республикасы, Тараз қ.;
[5]Инновациялық Еуразия университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
15.11.25 ж. баспаға түсті.
18.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
24.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТЕРЕҢ МИКРО ТЕСІКТЕРІ БАР БӨЛШЕКТЕРДІ ДАЙЫНДАУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ДАЙЫНДЫҒЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Қазақстан Республикасында машина жасау мен металл өңдеудегі өндіріс көлемі тұрақты өсуде, қосылған құны жоғары және сыртқы нарықтарға бағдарланған өңделген өнім үлесін арттыру бойынша кәсіпорындардың бәсекеге қабілеттілігі ынталандырылуда.

Машина жасаудың өзекті міндеттерінің бірі-Болат машина жасау бөлшектерінде шағын диаметрлі терең тесіктер (диаметрі ≤ 1–3 мм, тереңдігі 20–100 мм және одан да көп) жасау. Мәселе күрделі сипатқа ие және геометриялық, жылу және материалтану факторларының жиынтығымен байланысты.

Мақалада 40Х болаттан жасалған полимерлерге арналған экструдердің «автотүтік шүмегі» бөлігінің мысалында бұрғылау операциясын электроэрозиялық өңдеумен ауыстыру есебінен терең микро тесіктері бар бөлшектерді дайындаудың технологиялық процесін жетілдіру бойынша эксперименттік зерттеулердің нәтижелері келтірілген.

Зерттеудің мақсаты бөлшектерді дайындаудың технологиялық процесін терең микро тесікпен стандартты және электроэрозиялық өңдеу әдістерімен салыстыру болды.

Өндірістік жағдайда «Бустер ПРО» ЖШҚ 40Х болаттан жасалған «автотүтік шүмегі» бөлшегі үшін өндірістің екі технологиялық схемасына салыстырмалы талдау жүргізілді: дәстүрлі механикалық бұрғылау және электр эрозиясын қолдану.

Терең микро тесіктерді бұрғылау үшін электроэрозиялық өңдеу Бөлшектерді өндірудің салыстырмалы құны кезінде дәлдігі, сенімділігі және тұрақтылығы бойынша механикалық бұрғылаудан біржақты асып түсетіні анықталды.

Кілтті сөздер: машина жасау, электроэрозиялық өңдеу, бұрғылау, 40Х болат, металл өңдеу.

S. A. Zigangirov[1], A. S. Yanyushkin[2], I. V. Buldyayev[3],
****A. Zh. Kasenov[4], S. P. Kharchenko[5]***
[1,4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[2]Chuvash State University, Russian Federation, Cheboksary;
[3]«Buster PRO» LLC, Russian Federation, Novosibirsk;
[4]Kazakh National University of Water Management and Irrigation,
Republic of Kazakhstan, Taraz;
[5]Innovative Eurasian University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 15.11.25.
Received in revised form 18.11.25.
Accepted for publication 24.11.25.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION FOR MANUFACTURING PARTS WITH DEEP MICROHOLES

In the Republic of Kazakhstan, the volume of production in mechanical engineering and metalworking is steadily increasing, and the competitiveness of enterprises is being stimulated to increase the share of processed products with high added value and focus on foreign markets.

One of the current challenges in mechanical engineering is the production of deep holes with small diameters (≤ 1–3 mm in diameter and 20–100 mm or more in depth) in steel mechanical engineering parts. This problem is complex and involves a combination of geometric, thermal, and material science factors.

The article presents the results of experimental studies on improving the technological process of manufacturing parts with deep micro-holes by replacing the drilling operation with electro-erosion processing, using the «Nose of the Auto-Pipe» part of an extruder for polymers made of 40X steel.

The purpose of the study was to compare the manufacturing process of parts with deep microholes using standard and electric discharge machining methods.

In the production conditions of Booster PRO LLC, a comparative analysis of two manufacturing schemes was conducted for the «Car Pipe Nose» part made of 40X steel: using traditional mechanical drilling and using electro-erosion machining.

It has been found that for drilling deep micro-holes, EDM is clearly superior to mechanical drilling in terms of accuracy, reliability, and stability, while maintaining a comparable cost of manufacturing parts.

Keywords: mechanical engineering, electric discharge machining, drilling, 40X steel, metalworking.

SRSTI 55.63.53

https://doi.org/10.48081/AIDZ8183

M. Kakimov[1], *M. Mursalykova[2], G. Kokayeva[3], A. Zholzhaksina[4], *M. Bembenek[5]

[1,3]S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana;

[2,4]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey;

[5]AGH University of Krakow, Poland, Krakow

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9392-6444

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

*e-mail: maigul_85@mail.ru

**e-mail: bembenek@agh.edu.pl

IMPROVEMENT OF RESOURCE-SAVING EQUIPMENT IN SAFFLOWER PRODUCTION BY OPTIMIZING THE HUSKING PROCESS

When developing technology for producing high-quality safflower oil, it is crucial to enhance the efficiency of refining processes. Among other things, primary refining processes are essential for separating safflower oil from mechanical impurities. In safflower production, one of the first refining processes is the separation of safflower from the husk. Separation of safflower from the husk not only increases the oil yield, but also improves the quality of the oil, contributing to the technology of obtaining all safflower oil. This is because separating the husk from the grain prevents the formation of fine suspended or «reticulated» wax crystals that separate the wax from foreign matter, such as beeswax, which degrades the quality of the oil. Therefore, processing safflower without peeling reduces the efficiency of safflower oil technology development work. This article presents a method for separating the husk from the kernel in a screw pneumatic classifier, utilizing airflow to optimize the safflower seed hulling process. For oilseeds, this approach will be a fundamentally new solution. In this case, there is an opportunity to double the airflow with centrifugal force in the screw channel of the pneumatic classifier compared to the straight-line inertia force during the husking process. Thus, based on the proposed husking equipment, from the social, economic, and industrial efficiency perspectives, husking efficiency is increased, equipment design is simplified, and equipment dimensions are reduced. However, judging by comparison with the force of inertia in a rectilinear flow, the path of aerodynamic air flow is not reduced, but, on the contrary, gives the possibility of its increase. Reduce the length of pneumatic conveying and air consumption by half, resulting in energy savings for husking of up to 50 %.

Keywords: Safflower, husk, kernel, technological equipment, husking, separation, aerodynamics.

Introduction

According to the concept for developing the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan for 2021–2030, a comprehensive plan has been developed to subsidize processed products and promote the agricultural processing industry. As a result of sustainable development of the crop production industry, the area of oilseed crops increased by 2 %. According to the Ministry of Agriculture of the RK's development plan for 2023–2027, 17.1 million tons of grain crops and 2.2 million tons of oilseeds were allocated in the first year. Investment in the agro-industrial complex grew by 10.3 % to $981.0 billion, while exports totaled $4.9 billion. The volume of exports totaled $4.9 billion, representing a 4.6 % growth rate [1].

The Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan is developing a project, «Powerful AIC» for 2024-2028, dedicated to the development of the agro-industrial complex. During this time, increasing labor productivity by 9.1 million tenge, increasing gross output by 17 trillion tenge and exports by 10 billion tenge, increasing the share of processed agricultural products (milk, meat, oilseeds, buckwheat, corn, etc.) by 70 % and reducing import dependency through domestic production [2]. In the course of implementing the above development plan, it is planned to form seven large ecosystems for the production and processing of meat, fruits, vegetables, sugar, cereals, oilseeds, and dairy products [3].

Cultivation of safflower in Kazakhstan is a promising direction due to its high resistance to arid conditions and its unpretentiousness to the Soil. Kazakhstan is well-suited for cultivation due to its steppe zones and sharply continental, unfavorable climate, which allows for the quick adaptation of culture to such conditions. This peculiarity of safflower allows for a stable harvest even in years without precipitation. Additionally, safflower does not require frequent irrigation and fertilization of arable land, which reduces the cultivation costs and is beneficial to farmers in regions with limited resources. Therefore, safflower cultivation among oilseeds plays a crucial role in enhancing the economic sustainability of agriculture in Kazakhstan [4; 5].

Safflower oil has special beneficial properties. It is rich in linoleic acid, antioxidants, and vitamin E, making it an important component for heart and skin health. Fats lower cholesterol, improve blood vessel function, and reduce the risk of cardiovascular disease. Because it strengthens the immune system, it improves metabolism and helps fight inflammation [6; 7]. Kazakhstan is among the leading countries in terms of safflower crop exports and imports in the world market. In 2022, Kazakhstan's average annual growth rate for imports was 53.9 %, and on the export side, Kazakhstan, along with the Netherlands and Russia, accounted for 79 % of global exports [8]. The central oilseed-buying countries are China, Ukraine, Poland, Uzbekistan, Tajikistan, Afghanistan, and Russia, among others. Between 2020 and 2025, in the Republic of Kazakhstan, the volume of specified sown areas of oilseeds increased from 2,834.18 thousand hectares to 3,461.802 thousand hectares. The total harvested volume of oilseeds over the last 5 years increased from 2,693.62 thousand tons to 3,051.29 thousand tons [9].

Currently, many enterprises do not engage in the complete processing of safflower crops, as this complicates the processing technology and leads to additional production

costs. Production sites, Additional technological equipment, and labor costs, etc. To remain competitive in the global market and provide the population with high-quality products, it is essential to process the safflower crop fully. One of the main challenges is to separate the safflower crop from its outer husk; this is a complex process that requires comprehensive technological research. The primary purpose of separating safflower culture from the husk is to improve the physicochemical and organoleptic properties of the final product and extend the shelf life. Fermenting flavoring components and phytomelan (6.9 %) in safflower husks prevents the separation of the husk from the grain, negatively affecting the organoleptic properties of the oil. Due to these problems, many companies undergo a pressing process with safflower husks, and the organoleptic properties, i.e., smell, taste, and color, are brought up to standard through chemical refining. As a result, the nutritional value, including physicochemical properties, fatty acid and mineral composition, and vitamin content, is significantly reduced [10].

In the direction of husking safflower grains, countries such as China and India are primarily engaged in husking, whereas other countries are not involved in husking. It markets safflower oil as a raw material or sells it after complex husking. The husking process consists of the following operations: calibration, stripping, and detaching the husks. Sieves and equipment driven by linear aerodynamic airflow are used for this purpose. However, these methods and equipment have the following disadvantages in use: large-scale production areas, additional labor costs and inter-operational expenses, as well as discomfort in the workplace due to vibration and noise. In addition, due to the inability to provide a uniform particle size distribution, the efficiency of the following technological operations (crushing and pressing) is reduced, which negatively affects the quality of the final product. In this regard, in order to eliminate the above disadvantages, it is necessary to improve the technique and technology of husking [11].

When separating mixtures of grain crops by pneumatic classification, the following methods are used: pneumogravity, pneumopulse, and pneumocentrifugal. However, in pneumogravity, pneumopulse separators reveal the following disadvantages. In pneumogravity separators, the velocity of introduction (Vi) of material into the separation chamber is not more than 1...2 m/s. The air flow velocity should be less than the critical seed velocity (Vcr), i.e. $V = Vi/Vcr < 1$. Additional sophisticated devices would be required to solve this problem. Pneumopulse separators can have a higher velocity of material entering the separation chamber, resulting in more kinetic energy being expended per particle to overcome air resistance.

Analyzing information from literature sources, the scientific novelty lies in the fact that to optimize the husking process of safflower seeds, a method is employed that separates the shell from the kernel using a screw pneumatic classifier with centrifugal air flow. For oilseeds, this method is a fundamentally new solution.

Materials and methods

The tests were conducted on a homogeneous batch of safflower grain (moisture content 6-8%). A 10 kg sample was used in each test mode, and the experiment was repeated three times. The following parameters were set on the device:

1) air flow velocity: 20, 24, 28, 30, 32, and 36 m/s,

2) degree of opening of the holes: full, medium, narrow,
3) transfer rate: 5-15 kg/h.
Measured indicators:
1) whole kernel yield, %;
2) mechanical damage of grain, % (by microscopic and photo analysis);
3) kernel, uncleaned from husks, %,
4) energy consumption, kWh/t (via wattmeter),
5) air consumption, m3/h (via anemometer).

Experimental studies were conducted in the experimental production workshop for vegetable oil at the Scientific and Experimental Platform «Agricultural Product Processing» of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University. The equipment's performance was estimated at 0.5–1.2 t/h. It was tested for 4–8 hours of continuous operation at optimal conditions (airflow velocity of 28–30 m/s) and deviations of ±2 m/s from these conditions. Random samples were taken every hour and analyzed using laboratory methods. The energy efficiency of the equipment, air consumption, product quality, and impact on the operator's working conditions were recorded.

The proposed pneumatic screw separator belongs to a group of equipment designed to separate grain by density and shape within an air stream. The process of husking safflower grain involves separating the husk and kernel into sampling zones using gravity. The screw coils are installed with a gap relative to the housing and the guide element in a specific ratio. The short-bladed reflector is curved in the opposite direction to the screw guide coil, and a gap exists between the housing and the airflow channel to allow air to pass through.

The safflower crop, intended for separation by size, is fed into the middle part of the apparatus and, under the action of inertial and aerodynamic forces, performs a complex curvilinear motion. Light husks are separated from heavy grains using an air stream and removed from the machine. Heavier grains slow down as a result of contact with the cylindrical surface of the housing and are fed into the channel through a ring gap. The separated part of the safflower grain is fed from the stream onto an inclined screw spiral guide and, moving along it towards the center, falls onto a short-bladed deflector coil. From there, these grains are fed by gravity into a curved air stream, where a secondary separation process takes place.

The process of separating safflower grains in an air stream according to density and shape is regulated by changing the speed of the air stream passing through the separator. The angle of inclination of the screw coils is designed to ensure that the material being separated moves toward the center of the device and away from the center along the coil. Air suction through the opening and pipe causes a radial air flow, as a result of which the fine husks, moving together with the air flow, are removed from the apparatus through the upper axial pipe.

The proposed pneumatic screw classifier, according to Figure 1, consists of the tangential loading pipe (1), pneumatic channel (2), upper screw surface (3) and lower screw surface (4), windows (5), conical part of the housing (6), side pipe (7), axial pipe (8), cylindrical central pipe with holes (9), pipe (10) for adjusting the size of the holes,

cylindrical part of the housing (11), handle (12) for adjusting the size of the holes, axial pipe (13) for discharging the fine fraction, and hole (14) located between the lower screw surface (4) and the cylindrical part of the housing (11). The upper screw surface (3) is rigidly fixed to the cylindrical part of the housing (11), while the lower screw surface (4), compared to the cylindrical part of the housing (11), has a hole (14) along its periphery (at the edges) and, forming a curved pneumatic channel (2), connects the tangential loading pipe (1) and the side pipe (7). The holes (14) in the axial pipe (13) for discharging the fine fraction are located in the working space of the pneumatic channel (2), formed by the upper screw surface (3) and the lower screw surface (4).

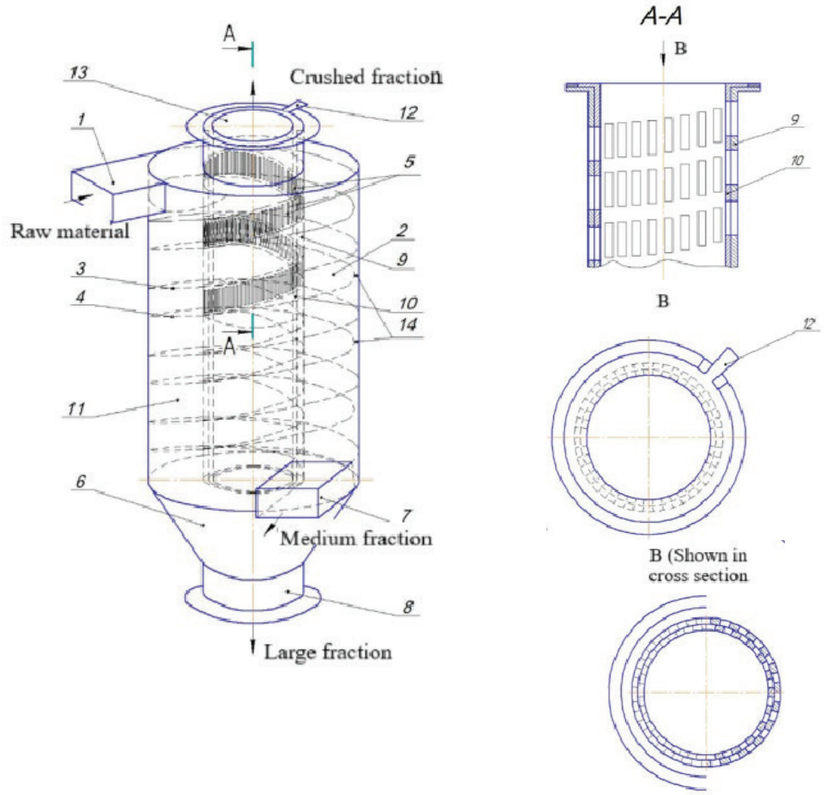


Figure 1 – Pneumatic screw equipment for husking safflower crops:
1 – tangential loading pipe; 2 – pneumatic channel; 3 – upper screw surface; 4 – lower screw surface; 5-windows; 6-conical part of the housing; 7 – side pipe; 8 – axial pipe; 9 – cylindrical central pipe with holes; 10 – pipe for adjusting the size of the holes; 11 – cylindrical part of the housing; 12 – handle for adjusting the size of the holes; 13 – axial pipe for discharging the fine fraction; 14 – hole

The pneumatic screw classifier operates as follows: safflower seeds are fed by an air stream through the tangential loading pipe (1) into the pneumatic channel (2), formed by the upper screw surface (3) and the lower screw surface (4). The safflower seed particles, under the action of aerodynamic and centrifugal forces, move along a complex path within the pneumatic channel (2). As part of the air stream passes through the windows (5), the husks of the safflower seeds, whose sizes allow them to pass through the windows, are carried away by the air stream and discharged from the apparatus through the axial pipe (13) for discharging the fine fraction. The large safflower seeds, under the action of centrifugal force, move toward the edge of the lower screw surface (4), accumulate on the inner surface of the cylindrical part of the housing (11), and, passing through the hole (14). The conical part of the housing (6) is discharged from the apparatus through the axial pipe (8). The medium fractions of the safflower seeds, moving with the air stream along the pneumatic channel (2), are discharged from the apparatus through the side pipe (7). The separation process can be controlled by adjusting the air flow velocity passing through the screw channel, as well as by changing the size of the holes in the cylindrical central pipe (9) by moving and rotating the handle (12) of the pipe (10), which is designed to regulate the size of the holes.

Results and discussion

To evaluate the effectiveness of the proposed pneumatic equipment, laboratory and production tests were conducted. During the study, the degree of separation of the husk from the safflower kernel, the yield of whole kernels, energy consumption, and air consumption were measured.

Table 1 – Comparative indicators of husking results

Name of indicators	Traditional method	Equipment offered	Change, %
Damage to grain, % 12.4		5.8	-53.2
Whole kernel yield, %	78.3	86.7	+10.7
Energy consumption, kW·h/t	12.5	6.3	-49.6
Air consumption, m^3/h	100	52	-48.0
Kernel, uncleaned from husks, %	8.1	3.9	-51.9

Test results showed that the improved equipment halved mechanical damage to the grain, resulting in an approximately 11 % increase in the yield of whole kernels. Energy consumption was reduced by almost 50 %, and air consumption was reduced by 48 %.

Graphical analysis revealed that the efficiency of pneumatic equipment is directly dependent on the air flow velocity. The optimal velocity is 28–30 m/s, at which the husk is wholly separated and grain damage is minimal. Figure 2 shows the effect of air flow velocity on husking quality.

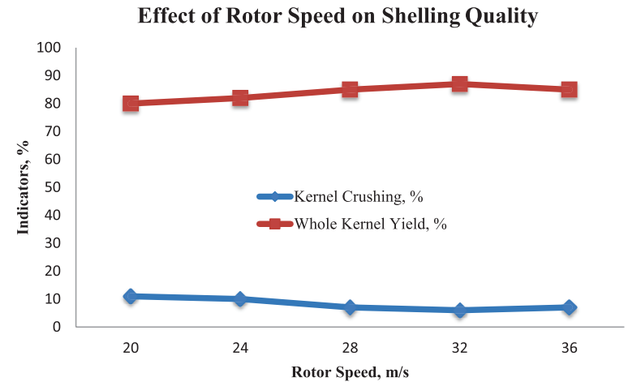


Figure 2 – Effect of Rotor Speed on Shelling Quality

Laboratory tests allowed us to adjust the equipment parameters precisely and demonstrated the fractional separation of grain at different air speeds. In the optimal mode, complete separation of the husk and preservation of the kernel in its entirety was ensured.

Industrial tests have confirmed that the equipment is capable of operating continuously for extended periods (up to 8 hours) and ensuring consistent product quality. Reduced energy consumption and air consumption have led to lower production costs and increased economic efficiency.

The results of the analysis demonstrated the advantages of pneumatic screw equipment:

1 The combination of centrifugal force and aerodynamic flow effectively separates the husks.

2 Adjustable air speed allows the equipment to be adapted to different crops.

3 The simple design of the equipment facilitates maintenance and cleaning;

4 Reduced vibration and noise improve working conditions.

These results prove that the proposed equipment is effective not only for safflower, but also for sesame, flax, and small-seeded legumes.

Financing information

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26100145 “Development of technology for obtaining high-quality safflower oil with optimization of the process of separating safflower from the husk”).

Conclusion

Thus, the results of the studies showed the high efficiency of the proposed pneumatic screw equipment for the safflower grain husking process. The improved design of the equipment significantly reduced mechanical damage to the grain, increased the yield of whole kernels, and also reduced energy and air consumption. During laboratory and production tests, grain damage was reduced by 53 %, whole kernel yield increased

by approximately 11 %, energy consumption was reduced by up to 50 %, and air consumption was reduced by up to 48 %. The equipment's ability to operate stably and continuously was confirmed. The design and operating principle of the proposed equipment allow it to be used effectively not only for safflower crops, but also for husking other oilseeds and small-grain crops. This, in turn, contributes to improving the quality of products from oilseed processing enterprises, reducing production costs, and enhancing overall technological efficiency.

REFERENCES

1 Мировой рынок сафлора: производство и импорт по странам мира [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://agrovesti.net/lib/industries/oilseeds/mirovoj-rynok-saflora-proizvodstvo-i-import-po-stranam-mira.html (Дата обращения 10.11.2023).

2 Объем производства сафлорового масла бьет рекорды [Электронный ресурс]. – 2023. – https://apk-news.kz/news/item-1741 (Дата обращения 10.11.2023).

3 Казахстанское масло завоевывает мировые рынки [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: https://www.zakon.kz/redaktsiia-zakonkz/4932590-kazahstanskoe-maslo-zavoevyvaet-mirovye.html (Дата обращения 10.11.2023).

4 **Liu, L., Guan, L. L., Yang, Y. X.** A review of fatty acids and genetic characterization of safflower (Carthamus tinctorius L.) seed oil //World Journal of Traditional Chinese Medicine. – 2016. – Т. 2. – №. 2. – С. 48–52.

5 **Гончаров, С., Жылқыбай, А.** Мақсарының (Carthamus tincforius) себу нормасын зерттеу //Ғылым және білім журналы. – 2022. – Т. 2. – №. 1 (66). – С. 132–140.

6 **Kakimov, M., Mursalykova, M., Gajdzik, B., Wolniak, R., Kokayeva, G., Bembenek M.** Optimal Ways of Safflower Oil Production with Improvement of Press Equipment // Foods. – 2024. – Т. 13. – №. 12. – P. 1909.

7 **Iskakov, B., Kakimov, M., Kudelski, R., Mursalykova, M., Kassenov, A., Satayeva, Z., Kardenov, S., Kalibekkyzy, Z., Mustafayeva, A., Igenbayev, A., Bembenek, M.** Improving the Technology of Primary Purification of the Safflower Oil Using Secondary Products of Processing on a Biological Basis // Foods. – 2023. – Т. 12. – № 17. – P. 3275.

8 **Toishimanov, M. et al.** Comparative Analysis and Determination of the Fatty Acid Composition of Kazakhstan's Commercial Vegetable Oils by GC-FID //Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – № 13. – P. 7910.

9 Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың «Әділетті Қазақстанның экономикалық бағдары» атты Қазақстан халқына Жолдауы, 2023. – [Электронды ресурс]. – URL: https://www.akorda.kz/kz/memleket-basshysy-kasym-zhomart-tokaevtyn-adiletti-kazakstannyn-ekonomikalyk-bagdary-atty-kazakstan-halkyna-zholdauy-18333 (Жүгінген күні: 15.11.2023).

10 **Mursalykova, M., Kokayeva, G., Kakimov, M., Gajdzik, B., Wolniak, R., Dzienniak, D., Bembenek, M.** Innovative Resource-Saving Equipment for Safflower Processing to Improve Oil Quality. Foods 2025, 14, 1596.

11 **Andersson, A. M.** Air Classification of Barley Flours / A. M. Andersson, R. Andersson, P. Aman // Cereal Chemistry. – 2000. – Vol . 77. – Iss. 4. – P. 463–467.

REFERENCES

1 Mirovoy rynok saflora: proizvodstvo i import po stranam mira. [Global safflower market: production and imports by country]. [Electronic resource]. – 2023. URL: https://agrovesti.net/lib/industries/oilseeds/mirovoj-rynok-saflora-proizvodstvo-i-import-po-stranam-mira.html (Date of access: 10.11.2023).

2 Obyem proizvodstva saflorovogo masla b'et rekordy. [Safflower oil production hits record highs]. – 2023. – [Electronic resource]. – URL: https://apk-news.kz/news/item-1741 (Date of access: 10.11.2023).

3 Kazakhstanskoe maslo zavoevyvaet mirovye rynki. [Kazakhstan butter conquers global markets]. – 2018. – [Electronic resource] – URL: https://www.zakon.kz/redaktsiia-zakonkz/4932590-kazahstanskoe-maslo-zavoevyvaet-mirovye.html (Date of access: 10.11.2023).

4 **Liu, L., Guan, L. L., Yang, Y. X.** A review of fatty acids and genetic characterization of safflower (Carthamus tinctorius L.) seed oil //World Journal of Traditional Chinese Medicine. – 2016. – Vol. 2. – №. 2. – C. 48–52.

5 **Goncharov S., Zhylyqbay A.** Maksarynyng (Carthamus tinctorius) sebu normasyn zertteu // Gylym zhane bilim zhurnaly. [Study of the sowing rate of safflower (Carthamus tinctorius) // Journal of Science and Education]. – 2022. – Vol. 2. – № 1 (66). – P. 132–140.

6 **Kakimov, M., Mursalykova, M., Gajdzik, B., Wolniak, R., Kokayeva, G., Bembenek M.** Optimal Ways of Safflower Oil Production with Improvement of Press Equipment // Foods. – 2024. – Vol. 13. – №. 12. – C. 1909.

7 **Iskakov, B., Kakimov, M., Kudelski, R., Mursalykova, M., Kassenov, A., Satayeva, Z., Kardenov, S., Kalibekkyzy, Z., Mustafayeva, A., Igenbayev, A., Bembenek, M.** Improving the Technology of Primary Purification of the Safflower Oil Using Secondary Products of Processing on a Biological Basis // Foods. – 2023. – T. 12. – № 17. – C. 3275.

8 **Toishimanov, M. et al.** Comparative Analysis and Determination of the Fatty Acid Composition of Kazakhstan's Commercial Vegetable Oils by GC-FID //Applied Sciences. – 2023. – T. 13. – № 13. – P. 7910.

9 Memleket basshysy Qasym-Zhomart Toqaevtyn «Adiletti Qazaqstannyn ekonomikalıq bagdary» atty Qazaqstan halkyna Zholdauy (Elektrondy resurs). [Message from Head of State Kassym-Jomart Tokayev to the people of Kazakhstan «The economic course of a fair Kazakhstan» – 2023. – [Electronic resource]. – URL: https://www.akorda.kz/kz/memleket-basshysy-kasym-zhomart-tokaevtyn-adiletti-kazakstannyn-ekonomikalyk-bagdary-atty-kazakstan-halkyna-zholdauy-18333 (Date of access: 15.11.2023).

10 **Mursalykova, M., Kokayeva, G., Kakimov, M., Gajdzik, B., Wolniak, R., Dzienniak, D., Bembenek, M.** Innovative Resource-Saving Equipment for Safflower Processing to Improve Oil Quality. Foods 2025, 14, 1596.

11 **Andersson, A. M.** Air Classification of Barley Flours / A. M. Andersson, R. Andersson, P. Aman // Cereal Chemistry. – 2000. – Vol . 77. – Iss. 4. – P. 463–467.

Received 11.08.25.
Received in revised form 13.08.25.
Accepted for publication 19.08.25.

М. М. Какимов[1], *М. Т. Мурсалыкова[2], Г. А. Кокаева[3], А. Д. Жолжаксина[4], *M. Bembenek[5]
[1,3]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2,4]Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.;
[5]AGH университеті, Poland, Krakow
11.08.25 ж. баспаға түсті.
13.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАУЫЗДАУ ПРОЦЕСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ АРҚЫЛЫ МАҚСАРЫ ӨНДІРІСІНДЕ РЕСУРС ҮНЕМДЕЙТІН ЖАБДЫҚТЫ ЖЕТІЛДІРУ

Сапалы мақсары майын алу технологиясын әзірлеуде, өңдеу процестерінің тиімділігін артыру маңызды болып табылады. Оның ішінде алғашқы өңдеу процестерінің мақсары майын механикалық қоспалардан бөлуде маңызы зор. Мақсары өндірісінде алғашқы өңдеу процестерінің бірі мақсарыны қауызынан ажырату. Мақсарыны қауызынан ажырату, майдың шығымын арттырып қана қоймайды сонымен қатар барлық мақсары майын алу технологиясына ықпал етіп, майдың сапасының артуына өз әсерін тигізеді. Өйткені дәнен қабықтарды ажыратқанда, балауыз бен балауыз тәрізді бөгде заттардан ажыратып, май сапасын нашарлататын жұқа суспензиялы немесе «тор» тәрізді балауыз кристалдарының түзілуінің алдын алады. Сондықтан мақсарыны қауыздамай өңдеу, мақсары майын алу технологиясын әзірлеуде жұмыс тиімділігін төмендетеді.

Ұсынылған мақалада мақсары тұқымдарын қауыздау процесін оңтайландыру үшін, ауа ағыны арқылы шнекті пневмоклассификаторда

дәннен қабықты ажырату тәсілі ұсынылған. Мақсары дақылдарын қауыздау процесі үшін бұл тәсіл, түбегейлі жаңа шешім болмақ. Қауыздау процесі кезінде, түзу сызықты инерция күшіне қарағанда, пневмоклассификатордың шнек арнасында ортадан тепкіш күшпен ауа ағынын екі есеге арттыруға мүмкіндік аламыз.

Олай болса, ұсынылған қауыздау жабдығы негізінде өнеркәсіпте әлеуметтік, экономикалық және индустриялық мүдделік тұрғысынан, қауыздау тиімділігі жоғарлайды, жабдықтың құрылымы жеңілдеп, көлемдік өлшемі кішірейеді. Бірақта түзу сызықты ағындағы инерция күшінен қарағанда, аэродинамикалық ауа ағынының жолы қысқармайды, мейлінше ұзарта түсуге мүмкіндік аламыз. Тасымалдау кезіндегі мақсары дәнінің шығынын және ауа шығынын екі есе азайтып, энергия тұтынуды шамамен 50 % дейін үнемдеуге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: мақсары, қауыз, дән, технологиялық жабдық, қауыздау, ажырату, аэродинамика.

М. М. Какимов[1], *М. Т. Мурсалыкова[2], Г. А. Кокаева[3], А. Д. Жолжаксина[4], *M. Bembenek[5]
[1,3]Казахский аротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[2,4]Университет Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей;
[5]AGH University of Krakow, Poland, Krakow
Поступило в редакцию 11.08.25.
Поступило с исправлениями 13.08.25.
Принято в печать 19.08.25.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ САФЛОРА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ШЕЛУШЕНИЯ

При разработке технологии получения качественного сафлорового масла важно повысить эффективность процессов переработки. В том числе, первичные процессы переработки имеют большое значение для отделения сафлорового масла от механических примесей. В производстве сафлора одним из первых процессов переработки является отделение сафлора от шелухи. Отделение сафлора от шелухи не только увеличивает выход масла, но и способствует повышению качества масла, способствуя технологии получения всего сафлорового масла. Это связано с тем, что при отделении шелухи от зерна предотвращается образование тонких взвешенных или «сетчатых» восковых кристаллов, которые отделяют воск от посторонних предметов, таких как пчелиный воск и воск, что ухудшает качество масла. Поэтому обработка сафлора без шелушения снижает эффективность работы по разработке технологии получения сафлорового масла.

В данной статье представлен способ отделения шелухи от ядра в шнековом пневмоклассификаторе с помощью воздушного потока для оптимизации процесса шелушения семян сафлора. Для масличных культур

этот подход станет принципиально новым решением. В данном случае есть возможность увеличить поток воздуха с центробежной силой в шнековом канале пневмоклассификатора, чем с прямолинейной силой инерции во время процесса шелушения.

Таким образом, исходя предлагаемого оборудования для шелушения, с точки зрения социальной, экономической и индустриальной эффективности, повышается эффективность шелушения, упрощается конструкция оборудования, уменьшаются габаритные размеры оборудования. Но, судя по сравнению с силой инерции в прямолинейном потоке, путь аэродинамического воздушного потока не сокращается, а наоборот дает возможность его увеличить. Сократить протяженность пневмотранспорта и расход воздуха вдвое, что обеспечивает экономию энергопотребления на шелушение примерно до 50 %.

Ключевые слова: сафлор, шелуха, ядро, технологическое оборудование, шелушение, разделение, аэродинамика.

МРНТИ 55.01.87

https://doi.org/10.48081/QQDN4359

А. Б. Калиев[1], М. Д. Алимжанов[2], Б. Р. Русланов[3], Д. К. Балтабай[4], А. Ж. Аяганова[5]

[1,2,3,4]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана;

[5]Карагандинский университет Казпотребсоюза, Республика Казахстан, г. Караганда

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3778-6885

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5068-3351

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7127-2321

*e-mail: adilbekk@mail.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БАГАЖНОЙ АЭРОДРОМНОЙ ТЕЛЕЖКИ И ОЦЕНКА ИХ ПРОЧНОСТИ

В данной статье представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов багажной аэродромной тележки (БАТ), проведенного с применением метода конечных элементов (МКЭ). Рассмотрены два типовых сценария нагружения: вертикальная нагрузка, возникающая при размещении груза на платформе, и горизонтальная нагрузка, характерная для буксировочных операций.

Для проведения анализа построена конечно-элементная (КЭ) модель тележки с использованием программного комплекса SolidWorks Simulation, обладающего широким спектром возможностей для моделирования сложных механических систем. В рамках моделирования были определены поля напряжений и перемещений в различных сечениях конструкции, что позволило провести всестороннюю оценку прочностных и жесткостных характеристик БАТ.

Анализ результатов моделирования показал, что максимальные значения напряжений и перемещений не превышают предельно допустимых значений для конструкционной стали, используемой в изготовлении тележки. Это свидетельствует о высокой надежности и эксплуатационной пригодности конструкции БАТ, что подтверждается результатами прочностного расчета.

Кроме того, в статье детально рассмотрено усовершенствованное тормозное устройство, предназначенное для обеспечения надежной фиксации тележки как в поднятом, так и в опущенном положении дышла. Данное решение является важным элементом повышения безопасности эксплуатации БАТ и минимизации рисков аварийных ситуаций.

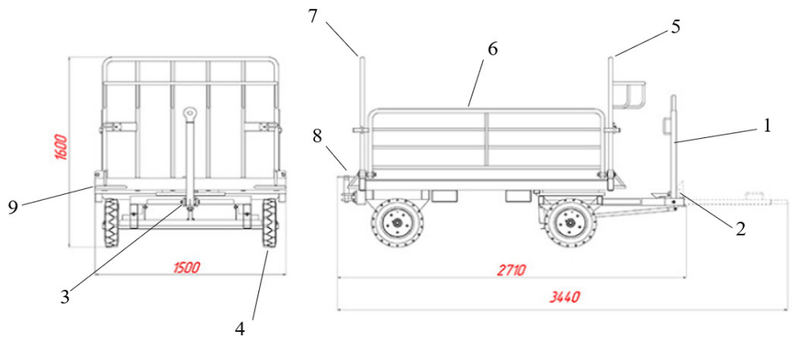
Таким образом, проведенное численное моделирование и анализ НДС элементов конструкции багажной аэродромной тележки позволили

подтвердить ее соответствие современным требованиям надежности и эксплуатационной безопасности, а также выявить потенциальные пути повышения эффективности и безопасности эксплуатации данного оборудования.

Ключевые слова: аэродромная тележка, напряженно-деформированное состояние, прочностной расчет, метод конечных элементов, SolidWorks Simulation, тормозное устройство, жесткость конструкции, транспортное оборудование.

Введение

Развитию аэродромной техники и оборудованию уделяют достаточно большое внимание, так как постоянно увеличиваются объемы авиаперевозок. Современные багажные аэродромные тележки (БАТ) перемещают значительные потоки различных грузов. Рациональное использование БАТ позволяют решать ряд производственных задач, осуществляя погрузку и выгрузку багажа различной массы и габаритов. К требованиям предъявляемым к БАТ являются прочность элементов конструкций, удобство в эксплуатации, безопасность, маневренность. Решение этих вопросов представляется актуальным. В данной работе представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкции БАТ, которые необходимы для прочностных расчетов. Общий вид БАТ представлен на рисунке 1.



1 – дышло; 2 – стояночное тормозное устройство; 3 – поворотное устройство; 4 – колеса; 5 –передняя стенка; 6 – боковые ограждения; 7 – задняя стенка; 8 – сцепное устройство; 9 – платформа.

Рисунок 1 – Общий вид БАТ

Материалы и методы

Разработка конструкции тормозного устройства двустороннего действия обеспечивают безопасность при эксплуатации БАТ и соответствуют техническим требованиям аэродромного оборудования. На указанную конструкцию тормозного устройства получен патент на полезную модель [1].

Известны тормозные устройства БАТ позволяющие осуществлять их неподвижное состояние (торможение) передних колес при поворотном поднятии в верхнее положение буксировочного дышла до 60° от горизонтали [2].

Недостатком таких тормозных устройств БАТ является отсутствие обеспечения торможения при опущенном состоянии буксировочного дышла, которое будет находиться в нижнем положении при соприкосновении с полом.

Предлагаемое тормозное устройство, показанное на рисунке 2, устраняет данный недостаток за счет того, что включает в себя буксировочное дышло 1, связанное с помощью основного шарнира 2, расположенного на расстоянии $\frac{9}{10}$ от начала буксировочного дышла 1 с рамой тележки 3, на конце дышла 1 установлен под углом 20° выше горизонтали вспомогательный шарнир 4, который соединяет буксировочное дышло 1 с тягой 5, другой конец тяги 5 соединен с центральной маятниковой проушиной 6, нижний конец, которой связан с тормозной колодкой 8, с тормозной колодкой 8, также жестко связаны две боковые маятниковые проушины 7.

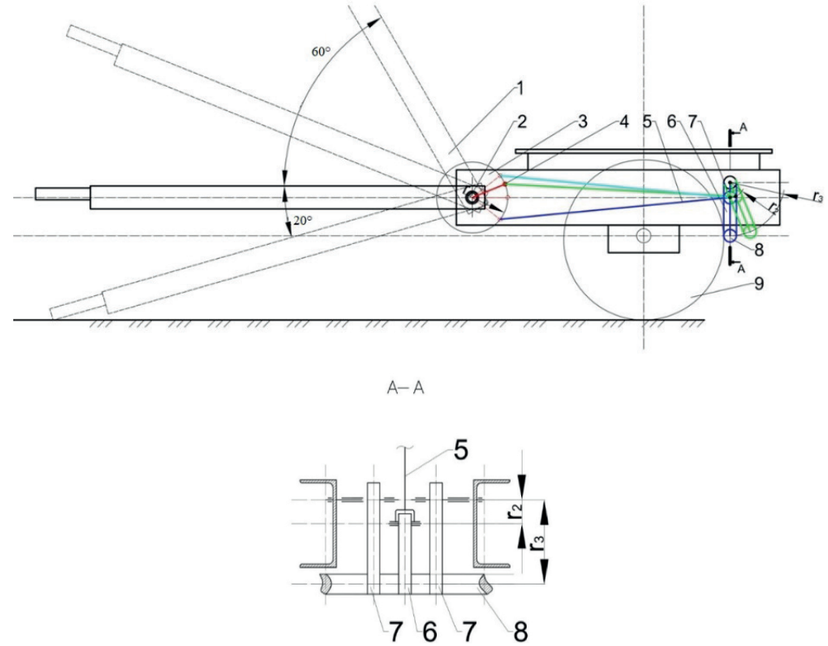


Рисунок 2 – Кинематическая схема тормозного устройства БАТ

Тормозное устройство работает следующим образом. При поднятии вверх до 60° от горизонтали буксировочного дышла 1, оно поворачивается вокруг

основного шарнира 2, одновременно центр вспомогательного шарнира 4 движется вниз по дуге окружности радиусе r_1„ при этом происходит плоско-параллельное движение тяги 5, поэтому другой конец тяги 5 перемещается влево по дуге окружности радиуса r_2 и прижимает тормозную колодку 8 с помощью центральной маятниковой проушины 6 вместе с двумя боковыми маятниковыми проушинами 7 к передним колесам 9, обеспечивая их торможение.

При опускании вниз буксировочного дышла 1 до 20° от горизонтали, оно поворачивается вокруг основного шарнира 2 (т.е. буксировочное дышло 1 передним концом касается пола), одновременно центр вспомогательного шарнира 4 уже движется вверх по той же дуге окружности радиуса r_1„ при этом конец тяги 5 перемещается по дуге окружности радиуса r_2, так же опять влево и вновь тормозная колодка 8 с помощью центральной маятниковой проушины 6 вместе с двумя боковыми маятниковыми проушинами 7 прижимается к передним колесам 9.

В горизонтальном положении буксировочного дышла 1, тормозная колодка 8 отклоняется по дуге по окружности радиуса r_3 вправо, обеспечивая свободное движение передним колесам 9.

В целом, конструкции БАТ классифицируют по грузоподъемности: 1) большой грузоподъемностью; 2) средней грузоподъемности; 3) малой грузоподъемности.

По габаритным размерам: 1) крупногабаритные; 2) среднегабаритные; 3) малогабаритные.

По типу ограждения: 1) закрытые; 2) складные; 3) открытые.

Основной несущей конструкции БАТ является рама, которая выполнена из отдельных стальных элементов в виде продольных и поперечных балок открытого профиля.

Исследование проводилось в среде SolidWorks Simulation [3; 4; 5; 6; 7; 8; 9]. Для исследования НДС элементов конструкции БАТ рассмотрены два варианта их нагружения, как наиболее невыгодные с точки зрения прочности. В первом варианте производится расчет элементов платформы на вертикальную нагрузку. Во втором варианте произведен расчет элементов конструкции БАТ на горизонтальную нагрузку.

Для проведения исследований была разработана трехмерная компьютерная модель БАТ в программном комплексе SolidWorks.

К основным характеристикам конструкции элементов относятся следующие. Масса тележки: 1321,8 кг. Габаритные размеры: длина 4259,7 мм, ширина 1486 мм, высота 1361,28 мм. Платформа, созданная из поперечных и продольных балок, в виде швеллера №8. Передний и задний мост, боковины и фаркоп созданы согласно конструкционным требованиям. Колеса и поворотный диск приняты из каталога. Диаметр колеса 300 мм. Для всех металлических элементов была использована сталь углеродистая простая по ГОСТ 380–94. Платформа, мост передний и задний, дышло и тормозное устройство.

Для первого и второго вариантов, для оценки прочности конструкции, была создана конечно-элементная модель из треугольных пластинчатых элементов,

включающая 955123 узла, 458160 элементов, с минимальным размерами элемента, составляющим 8,3 мм, и максимальным размером - 166,8мм, которые представлены на рисунке 3.

Рисунок 3 – Трехмерная конечно-элементная модель БАТ, выполненная в программе SolidWorks Simulation

В первом варианте проведен анализ грузоподъемности тележки с равномерным распределением груза массой 2 т. На элементы платформы БАТ действует направленная вертикально вниз равномерно распределенная нагрузка интенсивности q (показана красным цветом на рисунке 4).

$$q = \frac{P}{S} = \frac{2000 \cdot 9.81}{3.7} = 5302{,}7 \text{ Н/м}^2, \quad (1)$$

где P – действующая нагрузка, Н;

S – площадь поверхности, м^2.

Интенсивность нагрузки q составляет 5302,7 Н/м^2.

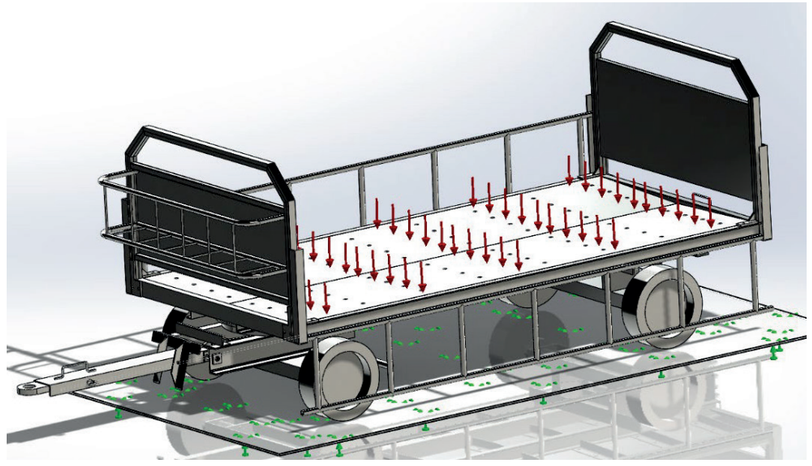


Рисунок 4 – Трехмерная модель нагружения БАТ, составленная в программе SolidWorks Simulation

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов НДС в первом варианте представлены в виде диаграммы напряжений по фон Мизесу и диаграммы перемещений. Результаты расчета грузоподъемности платформы в виде диаграмм, приходящиеся на передний мост, показаны на рисунках 5 и 6.

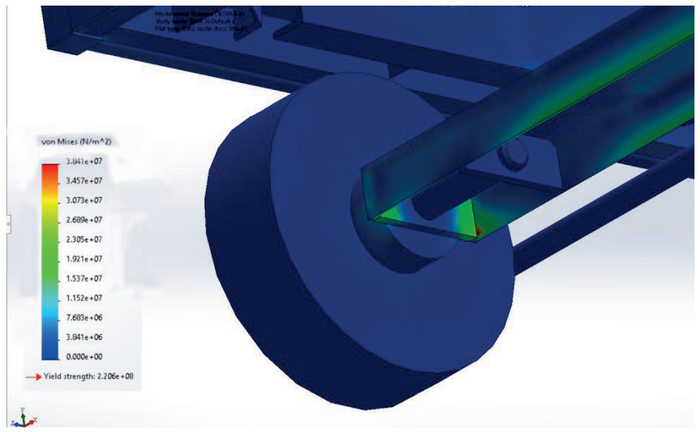


Рисунок 5 – Диаграмма напряжений по фон Мизесу расчета на грузоподъемность, выполненная в программе SolidWorks Simulation

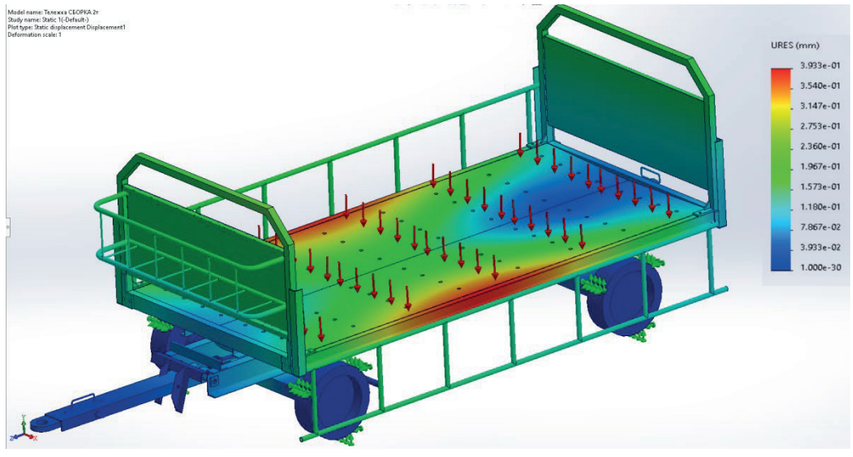


Рисунок 6 – Диаграмма перемещений расчета на грузоподъемность, выполненная в программе SolidWorks Simulation

Максимальные напряжения в переднем мосту составили 38.41 МПа и находились в зоне переднего моста.

На рис. 6 представлена диаграмма перемещений расчета на грузоподъемность платформы.

Результаты расчета на вертикальную нагрузку платформы показали, что максимальное перемещение составило 0.39 мм.

Во втором варианте рассмотрено НДС при растяжении-сжатии элементов конструкции БАТ. Расчет на растяжение-сжатие элементов БАТ проведен при буксировке шести БАТ. Сила тяги направлена вдоль дышла, при ее горизонтальном положении.

В расчетах учитываются сила тяжести системы mg, реакции опор N и сила трения F колес.

μ – коэффициент трения качения резины о сухой асфальтобетон (принимаем 0,01, как наиболее приемлемый приближенный вариант в данной расчетной схеме); R – радиус колеса, м. Их значения составляют.

$$m \cdot g = 1321.8 \cdot 9.81 = 12966.86 \text{ Н}; \quad (2)$$

$$N = 4 \cdot m \cdot g = 4 \cdot 1321.8 \cdot 9.81 = 51867.43 \text{ Н}; \quad (3)$$

$$F = N \cdot \frac{\mu}{R} = 51867.43 \cdot \frac{0.01}{0.203} = 2555.04 \text{ Н}. \quad (4)$$

На рисунке 7 представлена трехмерная модель при осевом нагружении.

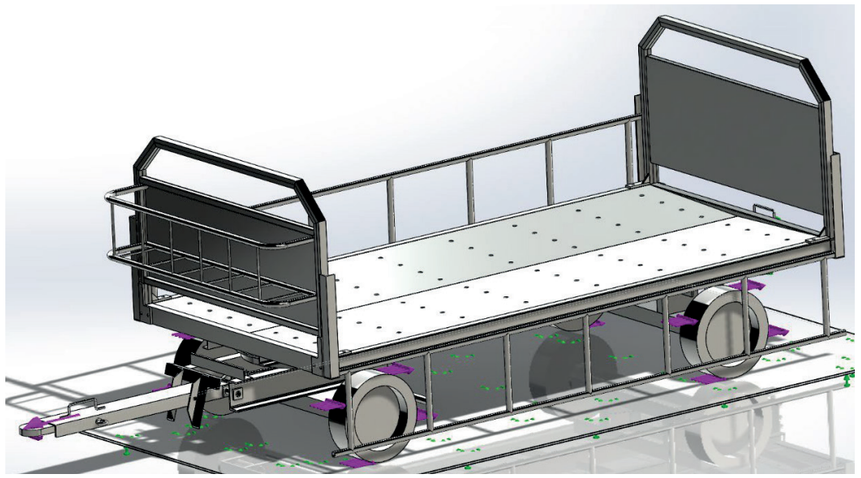


Рисунок 7 – Трехмерная модель БАТ при осевом нагружении, составленная в программе SolidWorks Simulation

Результаты расчета НДС по второму варианту нагружения при горизонтальной нагрузке, приложенной к дышлу, показаны на рисунках 8 и 9.

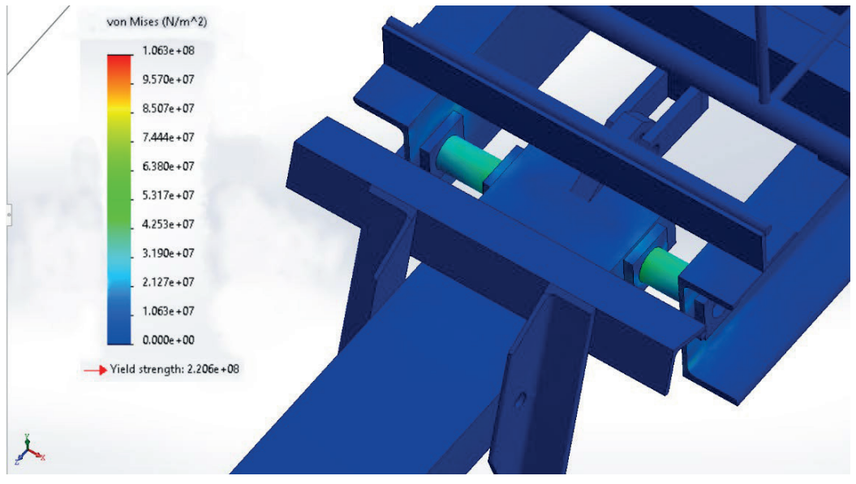


Рисунок 8 – Диаграмма напряжений по фон Мизесу расчета на растяжение-сжатие на дышле, составленная в программе SolidWorks Simulation

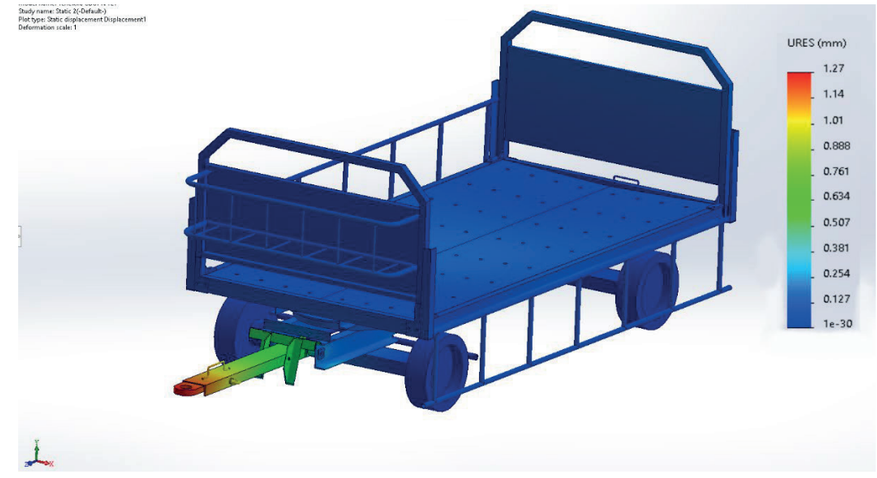


Рисунок 9 – Диаграмма перемещений расчета на растяжение-сжатие на дышле, составленная в программе SolidWorks Simulation

Диаграмма при осевом нагружении показала, что напряжения в дышле достигают 106 МПа, но не превышают предела упругости материала.

На рисунке 9 представлена диаграмма перемещений расчета на растяжение-сжатие дышла.

Результаты расчета на горизонтальную нагрузку дышла показали, что максимальное перемещение составило 1.27 мм, что следует из диаграммы.

Анализ расчета на грузоподъемность показал, что наиболее нагруженным узлом является передний мост. Эквивалентное напряжение в узле составило в соответствии с диаграммой напряжений 38.41 МПа, что не превышает допускаемого напряжения 220.5 МПа. Это говорит о том, что условия прочности соблюдаются.

Расчеты на жесткость связаны с определением перемещений элементов платформы, которые представлены на рисунке 6 в виде диаграммы перемещений элементов платформы. Что показывает наибольшее перемещение достигают 0.39 мм. Указанное обстоятельство доказывают о соблюдении допускаемых значений перемещений элементов платформы.

При расчете на растяжение-сжатие при горизонтальной нагрузке наиболее нагруженным узлом является палец дышла. Эквивалентное напряжение в узле составило в соответствии с диаграммой напряжений 106 МПа, что не превышает допускаемого напряжения 220.5 МПа. Это говорит о том, что условия прочности соблюдаются.

Расчеты на жесткость при горизонтальной нагрузке связаны с определением перемещений элементов дышла и тормозного устройства. На рис. 9 представлена диаграмма перемещений дышла платформы, наибольшее перемещение достигают

1.27 мм. Следовательно, наибольшее перемещение не превышают допускаемых значений перемещений элементов платформы.

Таким образом, общий анализ расчета на прочность и жесткость доказывают, что расчетные напряжения и перемещения не превышают допускаемых величин [10].

Выводы

Анализ НДС конструкций БАТ показал, что расчетные напряжения и перемещения не превышают допускаемых значений, предусмотренных пределом прочности применяемого материала (простая углеродистая сталь, $\sigma_p = 220{,}5$ МПа).

Максимальные напряжения, возникающие в переднем мосту (38.41 МПа) и буксировочном дышле (106 МПа), находятся в пределах допускаемых значений, что свидетельствует о достаточном запасе прочности конструкции.

Анализ жесткости элементов тележки показал, что максимальные перемещения (0.39 и 1.27 мм) также соответствуют допустимым нормам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Алимжанов, М. Д., Калиев, А. Б.** Тормозное устройство аэродромной тележки // Патент на полезную модель, № 9260, 2025.

2 **Канарчук, В. Е., Гелетуха Г. Н., Запорожец В. В. и др.** Авиационная наземная техника : Справочник. – М. : Транспорт, 1989. – 278 с.

3 **Агапов, В. П.** Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций : учебное пособие. – Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 248 с.

4 **Kotsovos, M. D.** Finite-element modelling of structural concrete: short-term static and dynamic loading conditions / Boca Raton; London; New York : CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015. – XV, 365 p.

5 **Батырбаев, К. С., Ибраев, К. С.** Прочностной анализ конструкций методом конечных элементов : учебное пособие. – Алматы : КазНТУ, 2017. – 204 с.

6 **Залесов, С. В., Папков, А. А.** Применение SolidWorks Simulation для анализа механических конструкций. – М. : Солон-Пресс, 2020. – 256 с.

7 **Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J.** Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 4th ed. – Wiley, 2002. – 735 p.

8 **Касымов, Е. А., Абдуллин, А. Т.** Исследование элементов подвижных транспортных систем с использованием методов численного моделирования. // Вестник КазНУ. Серия : Механика. – 2022. – №4(82). – С. 35–42.

9 **Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G.** Mechanical Engineering Design. 9th ed. – McGraw-Hill, 2010. – 1080 p.

10 **Фролов, В. А., Киселев, В. М.** Наземное обслуживание воздушных судов. – М. : Транспорт, 2004. – 360 с.

REFERENCES

1 **Alimzhanov, M. D., Kaliev, A. B.** Tormoznoe ustrojstvo aerodromnoj telezhki [Airfield trolley braking system] // Utility model patent, № 9260, 2025.

2 **Kanarchuk, V. E., Geletuha, G. N., Zaporozhec, V. V. and others.** Aviacionnaya nazemnaya tekhnika : Spravochnik [Aviation ground equipment: A reference book]. – Moscow : Transport, 1989. – 278 p.

3 **Agapov, V. P.** Metod konechnyh elementov v statike, dinamike i ustojchivosti konstrukcij: uchebnoe posobie. [The finite element method in statics, dynamics and structural stability : a textbook]. – Moscow: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nyh vuzov, 2004. – 248 p.

4 **Kotsovos, M. D.** Finite-element modelling of structural concrete : short-term static and dynamic loading conditions // Boca Raton; London; New York : CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015. – XV, 365 p.

5 **Batyrbaev, K. S., Ibraev, K. S.** Prochnostnoj analiz konstrukcij metodom konechnyh elementov: uchebnoe posobie [Strength analysis of structures by the finite element method : a textbook]. – Almaty : KazNTU, 2017. – 204 p.

6 **Zalesov S. V., Papkov A. A.** Primenenie SolidWorks Simulation dlya analiza mekhanicheskih konstrukcij [The use of SolidWorks Simulation for the analysis of mechanical structures]. – M. : Solon-Press, 2020. – 256 p.

7 **Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J.** Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 4th ed. – Wiley, 2002. – 735 p.

8 **Kasymov, E. A., Abdullin, A. T.** Issledovanie elementov podvizhnyh transportnyh sistem s ispol'zovaniem metodov chislennogo modelirovaniya [Investigation of the elements of mobile transport systems using numerical modeling methods] // Vestnik KazNU. Seriya : Mekhanika. – 2022. – № 4(82). – P. 35–42.

9 **Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G.** Mechanical Engineering Design. 9th ed. – McGraw-Hill, 2010. – 1080 p.

10 **Frolov, V. A., Kiselev V. M.** Nazemnoe obsluzhivanie vozdushnyh sudov [Aircraft ground handling]. – M. : Transport, 2004. – 360 p.

Поступило в редакцию 25.07.25.
Поступило с исправлениями 30.07.25.
Принято в печать 09.09.25.

Ә. Б. Қалиев[1], М. Д. Әлімжанов[2], Б. Р. Русланов[3],
Д. Қ. Балтабай[4], Ә. Ж. Аяганова[5]
[1,2,3,4]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[5]Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
25.07.25 ж. баспаға түсті.
30.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
09.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

БАГАЖДЫҚ ӘУЕАЙЛАҚ АРБАСЫНЫҢ КОНСТРУКЦИЯСЫ ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН ЖАЙ-КҮЙІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ БЕРІКТІГІН БАҒАЛАУ

Бұл мақалада ақырлы элементтер әдісін (АЭӘ) қолдана отырып жүргізілген багаж әуеайлақ арбасының (БӘТ) құрылымдық элементтерінің кернеулі-деформацияланған күйін (КДК) сандық модельдеу нәтижелері келтірілген. Жүктеменің екі типтік сценарийі қарастырылады: жүктемені платформаға орналастыру кезінде пайда болатын тік жүктеме және сүйреу операцияларына тән көлденең жүктеме.

Талдау жүргізу үшін күрделі механикалық жүйелерді модельдеуге арналған кең мүмкіндіктерге ие SolidWorks Simulation бағдарламалық кешенін қолдана отырып, арбаның ақырлы элементті моделі құрылды. Модельдеу шеңберінде құрылымның әртүрлі қималарындағы кернеулер мен орын ауыстыру өрістері анықталды, бұл БӘТ-тың беріктігі мен қаттылық сипаттамаларын жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді.

Модельдеу нәтижелерін талдау кернеулер мен қозғалыстардың максималды мәндері арба өндірісінде қолданылатын құрылымдық болат үшін рұқсат етілген шекті мәндерден аспайтынын көрсетті. Бұл бат дизайнының жоғары сенімділігі мен жарамдылығын көрсетеді, бұл беріктікті есептеу нәтижелерімен расталады.

Сонымен қатар, мақалада арбаны көтерілген және төмен тартылған күйде сенімді бекітуді қамтамасыз етуге арналған жетілдірілген тежегіш құрылғы егжей-тегжейлі қарастырылған. Бұл шешім БӘТ пайдалану қауіпсіздігін арттырудың және авариялық жағдайлар тәуекелдерін азайтудың маңызды элементі болып табылады.

Осылайша, багаждық әуеайлақ арбасының конструкциясы элементтерінің КДК-анализ сандық модельдеу және талдау оның сенімділік пен пайдалану қауіпсіздігінің заманауи талаптарына сәйкестігін растауға, сондай-ақ осы жабдықты пайдаланудың тиімділігі мен қауіпсіздігін арттырудың әлеуетті жолдарын анықтауға мүмкіндік берді.

Кілтті сөздер: аэродромдық арба, кернеулі деформацияланған күй, беріктікті есептеу, ақырлы элементтер әдісі, SolidWorks Simulation, тежегіш құрылғы, құрылымның қаттылығы, көлік жабдықтары.

A. B. Kaliyev[1], M. D. Alimzhanov[2], B. R. Ruslanov[3],
D. K. Baltabay[4], A. Zh. Ayaganova[5]
[1,2,3,4]L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[5]Karaganda University of Kazpotrebsoyuz,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 25.07.25.
Received in revised form 30.07.25.
Accepted for publication 09.09.25.

STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF A BAGGAGE AIRFIELD TROLLEY AND ASSESSMENT OF THEIR STRENGTH

This article presents the results of numerical simulation of the stress-strain state (VAT) of structural elements of an airfield baggage trolley (BAT), conducted using the finite element method (FEM). Two typical loading scenarios are considered: the vertical load that occurs when the load is placed on the platform, and the horizontal load typical for towing operations.

To carry out the analysis, a finite element (CE) model of a trolley was built using the SolidWorks Simulation software package, which has a wide range of capabilities for modeling complex mechanical systems. As part of the simulation, stress and displacement fields were determined in various sections of the structure, which allowed for a comprehensive assessment of the strength and stiffness characteristics of the BAT.

Analysis of the simulation results showed that the maximum values of stresses and displacements do not exceed the maximum permissible values for structural steel used in the manufacture of trolleys. This indicates the high reliability and operational suitability of the BAT design, which is confirmed by the results of the strength calculation.

In addition, the article discusses in detail an improved braking device designed to ensure reliable fixation of the trolley in both the raised and lowered position of the drawbar. This solution is an important element in improving the safety of BAT operation and minimizing the risks of emergency situations.

Thus, the numerical modeling and VAT analysis of the structural elements of the baggage airfield trolley allowed us to confirm its compliance with modern requirements for reliability and operational safety, as well as to identify potential ways to improve the efficiency and safety of operation of this equipment.

Keywords: airfield trolley, stress-strain state, strength calculation, finite element method, SolidWorks Simulation, braking device, structural rigidity, transport equipment.

МРНТИ 55.57.43

https://doi.org/10.48081/EYCM7626

Б. А. Молдаханов[1], М. В. Дудкин[2], А. И. Ким[3],
В. С. Яковлев[4], А. К. Айтказина[5]
[1,2]ТОО «Европлюс Восток», Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]«МИРАС» университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.;
[4,5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2977-693X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5732-0724
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9332-4279
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7315-4719
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6305-4696
*e-mail: bek_m78@mail.ru

БҰРАНДАЛЫ СЕКЦИЯЛАР ҚАДАМЫНЫҢ ӨСІМДІК ҚАЛДЫҚТАРЫН ЭКСТРУДТАУ ӨНІМДІЛІГІНЕ ӘСЕРІ

Бұл жұмыстың мақсаты экструдер шнегінің құрылымдық-технологиялық параметрлерін негіздей отырып, астық пен өсімдік шаруашылығы қалдықтарын ұнтақтау конструкциялары мен процесін жетілдіруге бағытталған.

Өсімдік шаруашылығы қалдықтары қосылған бастапқы астық қоспасын тиеу, қайта өңдеу және экструдерден жаңа құрама жем түрінде шығару үшін ол шнек тобының тиісті учаскелерінде орын алатын қажетті және дәйекті технологиялық әсердің регламенттелген кешенінен өтуі тиіс.

Шнек тобының корпусының ішіндегі жүктелген бастапқы қоспаның өтуіне және оның жаңа түпкілікті өнімнің сапасын жоғалтпай иіргіш арқылы шығуына сәйкес, оны шнек білігінің қысқа ұзындығында берілген сипаттамалармен алуға болады, бұл экструдтау процесінің жалпы уақытының қысқаруына және өнімділіктің өсуіне байланысты өсімдік қалдықтарының ингредиенттерімен жаңа құрама жем шығындарына әкелуі мүмкін.

Бұрандалы топтың секцияларын қайта құру арқылы тәжірибелі экструдердің өнімділігін арттыру мүмкіндіктері – бұл жұмыстардың толық циклі, соның ішінде өнімділік пен қуат шығындарының бұрын есептелген тәуелділіктерін қолдана отырып теориялық есептеулер, оларға конструктивті өзгерістердің әсерін және бұрандалы топ бөліктерінің өзгеруін зерттеу. Зертханалық экструдердің өнімділігі минералдар мен дәрумендердің құрамына бай, мысалы, ұсақталған күнбағыс пен оның сабақтары, сібір шыршасының қабығы сияқты өсімдік шаруашылығы мен ағаш кесудің қатаң мөлшерленген қалдықтарын қамтитын астық қоспасында сыналды.

Кілтті сөздер: азықтық экструдер, екі бұрандалы білік, бұрандалы бөліктер, бұрандалы бөліктің арақашықтығы, қоспаның қарсы ағыны, иіргіш.

Кіріспе

Әрбір азық өндіруші, өзі өндіретін өнімнің технологиялық процесін белгілі бір дәрежеде арзандатуға немесе жылдамдатуға септігін тигізетін әртүрлі жабдықтар мен машиналардың және технологиялардың бар екені жағынан құлақдар.

Көбінесе мұндай жабдықтарды пайдалану, аграрлық немесе мал шаруашылықтарының тиісті қорларын жеткілікті сапалы, қол жетімді жем-шөбімен қамтамасыз етуге және ұзақ уақыт сақтауға мүмкіндік береді. Әрбір жем-шөп өндіруші арзан азық өндіруге тырысады. Өйткені бәсекелестік бастапқы компоненттердің төмен бағасына байланысты, яғни өсімдік қалдықтары (күнбағыс сабақтары мен бастары) мен ағаш кесу қалдықтары (сібір шыршасының қабықтары) қажетсіз өнімдер болып табылғандықтан, оларды арзан бағаға сатып алуға болады. Ал оларды одан әрі пайдалы минералдар және дәрумендермен байыта отырып, жем-шөптің құрамына 20 % дейін өңдеп қосса, бұл жем қоспаларындағы бастапқы ингредиенттердің жалпы құнын төмендетеді.

Көптеген құрама жемдердің негізгі және қоректік толтырғышы астық болып табылады. Сондықтан астықты дайындау мен өңдеудің физикалық әдістері кең таралды және оны қайта өңдеуге арналған машиналарға қажеттілік артты: ұсатқыштар, диірмендер, араластырғыштар, ұсақтағыштар, экструдерлер және т.б. [1, 100-106-бб.], [2, 1276-б.], [3, 34-43-бб.], [4, 25-27-бб.], [5, 81-90-бб.].

Осы жұмыста ұсынылған зерттеулер ПЭ-150 жем-шөп (астық) экструдерінің конструкциясын жаңғыртуға (1-сурет), Қостанайдағы «АГРОТЕХСЕРВИС12» ЖШС ҚР өндірісіне арналған мақаласындағы баяндалған ережелерді сақтай отырып, экструдерлердің басқа конструкцияларына да жасауға болады. Жалпы, фермада жем экструдерін қолдану бір машинаның жұмыс процесі үшін құрғақ және дымқыл экструдтау операцияларының барлық ретін ұйымдастыруға мүмкіндік береді (тиеу, араластыру, ұстау, қысу, ұсақтау, ұсақтау, жылдам қыздыру, зарарсыздандыру, қалыптау және т.б.). Құрғақ деп өңделетін материалдың ылғалдылығы 15 % дейін экструдтау деп аталады, ал 15 % жоғары ылғалдылықта экструдтау ылғалды болып саналады. Ылғалды экструдтау Шығыс Қазақстанның шаруа қожалықтарында іс жүзінде кездеспейді, сондықтан ұсынылған жұмыста құрғақ экструдтауға баса назар аударылады. Өйткені бұл, өсімдік шаруашылығы қалдықтарының қоспалары бар, қайта өңдеуге дайын экструдерге түседі. Онда 1500С дейінгі температура мен 4 МПа қысымның әсерінен оны өңдеу жүреді. Бұл әдіс жеткілікті төмен энергия шығынымен сипатталады (90–120 кВт · сағ/т), бірақ сонымен бірге бұрандалы топ бөлшектерінің төмен жұмыс ресурсына ие. Мысалы, ПЭ-150 экструдері үшін ол 350–600 сағатқа тең, бұл ылғалды экструдтауға қарағанда 8000-10000 сағатқа дейін жұмыс істейді.

1-сурет – ПЭ-150 тәжірибелік экструдерінің сыртқы көрінісі

Көптеген ғалымдар шнек аймағындағы және әртүрлі экструдерлердегі жұмыс процестерін зерттеу мәселелерімен айналысты: А.В. Вавилов [6, 15-б.], B. Svihus [7, 250-256-бб.], V. Kushnir, T. Shkotova [8, 2133-2142-бб.], Z. Xiong [9, 43-б.], A. Kabdusheva [10, 492-497-бб.], J. Amft [11, 121-б.], М.И. Туманова [12] және басқалар. Мысалы, Salem Ali Karrab және Mohamed Ali Ballem (2020) (http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.1.1738) [13, 107-111-бб.] екі бұрандалы экструдердің бұрандалы біліктерінің себептері мен сынуын талдағаннан кейін, бұрандалы біліктің сынуына өндірістегі ескерілмеген бұралу және иілу күштерінің әсерінен болатын шаршау себеп болды деген қорытындыға келді. Бұрандалы білікті қалпына келтіргеннен кейін оны жасау және пайдалану бойынша ұсыныстар жасалды. Украин ғалымдары O.Lyashuk, Y.Pyndus, I.Lutsiv, Y.Vovk, L.Poberezhna, O.Tretiakov және R.Zolotyy (2019) (https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378) [14, 4449-4460-бб.] негізгі заңдылық-тарды талдап, экструдердің бұрандалы білігінің сыну себептерін анықтады. Үш өлшемді ақырлы-элементтік модельдеу әдісімен экструдер білігінің бекіту бөлігінің шекті рұқсат етілген кернеулі-деформацияланған күйі табылды, ойықтың шетіндегі кернеу қарқындылығының максималды мәндері есептелді. Зерттеулер негізінде бұрандалы біліктің геометриясы мен жұмыс режимдерін оңтайландыру бойынша ұсыныстар алынды. Shilong Li және Jun Lu (https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.162) (2014) [15, 162-165-бб.] бұрамдық шнегін зерттеу барысында оның соңғы элементтеріне сызықтық статикалық талдау жасады және қайта өңделетін қоспаның айналу көлемін ұлғайтудың орындылығын анықтады. Олар бұрамдық шнектің конструкциясын жаңғырту және өзгерту бойынша тиісті ұсыныстар жасады.

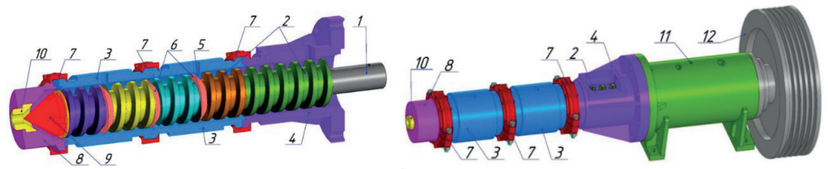
Бұл зерттеудің мақсаты астық экструдерінің шнек тобының конструкциясының құрылымдық-технологиялық параметрлерін таңдау және ғылыми негіздеу, өсімдік шаруашылығы қалдықтарын қосып, жем қоспаларын экструдтау процесін жетілдіру болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Өндіріс процесіне ең көп әсер ететін және жиі жөнделетін экструдердің негізгі элементтері-бұрандалы бөліктер, білік және бұрандалы корпус. Олар

ең мұқият қызмет көрсетуді және қайта өңделетін шикізаттың жай-күйіне қойылатын талаптарды сақтауды талап етеді. Өйткені ылғалды немесе шамадан тыс кептірілген бастапқы өнім, экструдер білігінің немесе шнектерінің сынуына және істен шығуына әкелуі мүмкін.

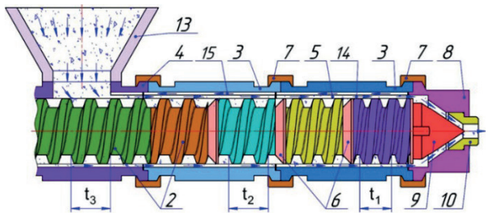
Бір бұрандалы экструдерлер, дизайнның қарапайымдылығына, энергияны аз тұтынуына және жем өнімінің бағасының айтарлықтай төмендеуіне байланысты, жем-шөп өнеркәсібінде кеңінен қолданылды. Астық экструдерінің бұрандалы тобының негізгі бөлшектерінің орналасуы 2-суретте схемалық түрде көрсетілген.



1 – мойынтірек бұрандалы білік; 2-шнекті қоректендіретін бастапқы бөлімдер; 3-шнек корпусы; 4 – корпусты тиеу бөлімі; 5 – корпустағы көлденең қарсы ойықтар; 6 – қысу болты; 7 – бекіту-жалғау муфтасы; 8 – матрицаның сыртқы басы; 9 – шнектің конустық ұшы; 10 – матрица иіргіштер; 11 – мойынтірек тірегі; 12 – жетек шкиві

2-сурет – Азықтық экструдердің бұрандалы тобының бөлшектерін (престеу блогы) құрастыру

Өңдеуге таңдалған жем қоспасының ингредиенттері бункердің төменгі жағындағы диспенсерден бұрандалы аймаққа келеді және экструдердің корпусы 3 пен шнегі 2 арасында итеріле бастайды. Онда біртіндеп қысылып, қызады. Сығымдау күшейткіші 1-ші біліктің әр аймағында кезектесіп жүреді. Тиісті бөлімдермен бөлінген 2-ші шнек бұрылыстарының белгілі бір қадамымен, қайта өңделетін қоспаның бір бөлігі 3-ші корпус пен 2-ші шнек бөлімдері арасындағы саңылау арқылы басылады, ал бір бөлігі қарсы ағынға сығылады және 3-ші корпустағы бойлық ойықтар 5 бойымен жаңа бөлікпен араласатын тиеу орнына мәжбүрлі түрде оралады. Қысу және үйкеліс күштері арқылы қайта қызады және 2 шнек бұрылыстарымен алға жылжиды (3-сурет).



5–ойық; 13-тиеу бункері; 14–престелетін жем қоспасының қозғалыс бағыты; 15-жем қоспасының корпустың ойығына қарсы ағынының қозғалысы.
3-сурет – ПЭ-150 пресс-экструдеріндегі жем қоспасын экструдтаудың технологиялық процесінің сызбасы

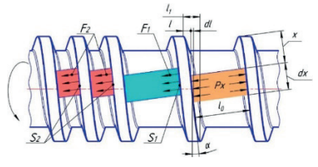
Қоспа шнек 2 бөлімдері мен корпус 3 арасындағы саңылау арқылы өткенде, ығысу кернеуі мен үйкеліс күштерінің әсерінен қоспаның материал құрылымы өзгереді, температура көтеріледі, материал ери бастайды. Дайын жем өнімі экструдердің бұрандалы аймағынан матрицаның 8 басындағы иіргіш 10 саңылауы арқылы шығады. Иіргіштің 10 өту қимасының диаметрі мен ауданын оны басқару бұралуымен өзгертуге болады. Жұмыс қысымы дайын жемшөп өнімінің балқымасының саңылауы 10 арқылы сығу үшін жеткілікті болуы керек, бұл ретте шығатын будың микрожарылыстары есебінен көлемі ұлғаяды. Аналитикалық және эксперименттік жұмыстардың нәтижесінде, экструдер білігіне орнатылған әрбір бұрандалы бөліктің аралық қашықтығы олар арқылы өтетін қоспаның пайда болған қысымы мен температурасының мәндеріне айтарлықтай әсер етеді деген болжам жасалды.

Экструдердің рационалды жұмыс параметрлерін (қысым, температура, өнімділік) есептеу үшін, модернизацияланған экструдер конструкциясының жұмыс процесін математикалық модельдейміз және тиімділігіне әсер ететін конструктивтік және технологиялық параметрлерін анықтаймыз.

Өсімдік қалдықтарынан қайта өңделетін жем-шөп қоспасының өтуіне арналған саңылау, иіргіштің 10 конустық беттері мен біліктің 9 конустық ұшы арасында түзіледі (3-сурет).

Гипотеза бойынша шнекпен басылған жем қоспасының температурасының жоғарылауына экструдер шнегіндегі үйкеліс беттерінің ұлғаюы ықпал етуі мүмкін. Бұл үйкеліс күштерінің жұмысын арттыру арқылы, шнек бұрылыстары арасындағы жем қоспасының массасы температураның жоғарылауын қамтамасыз етеді.

Бұрандадағы үйкеліс беттерінің ауданын біліктің айналасында айналатын екі параллель жолақ түрінде бұрандалы жоталарды екі рет бұрау арқылы көбейтуге болады (5-сурет).



F1-бір реттік бұрандада жем қоспасына әсер ететін күштер;
F2-қос бұранда кезінде жем қоспасына әсер ететін күштер;
S1-жем қоспасы мен бір реттік бұрандалы жотаның арасындағы байланыс аймағы
S2-жем қоспасы мен қос бұрандалы жотаның арасындағы байланыс аймағы
5-сурет – Екі және бір бұрандалы параметрлерді визуалды салыстыру схемасы

Осы өрнекті біріктіре отырып, біз шнектің бірінші бөліміндегі үйкеліс күштерінің жұмыс теңдеуін аламыз:

$$A_1 = \frac{l_1^2 \mu (2h_{v1}+l_{v1})(2P_{n1}+P_0)}{6sin\alpha_1 \cdot tg\alpha_1} \quad (11)$$

Аналогия бойынша шнектің басқа бөлімдері үшін үйкеліс күштерінің жұмысы анықталады:

$$A_2 = \frac{l_2^2 \mu (2h_{v2}+l_{v2})(2P_{n2}+P_{k1})}{3sin\alpha_2 \cdot tg\alpha_2} \quad (12)$$

$$A_3 = \frac{l_3^2 \mu (2h_{v3}+l_{v3})(2P_{n3}+P_{k2})}{3sin\alpha_3 \cdot tg\alpha_3} \quad (13)$$

мұндағы: α – шнектің тиісті секциясындағы беру бұрышы, градус;

h_v – шнектің тиісті секциясындағы шнек бұрылысы жотасының биіктігі, м;

l_v – шнектің әр бөліміндегі көршілес бұрылыстар арасындағы қашықтық, м;

P_0; $P_{к1}$; $P_{к2}$ – шнектің тиісті бөлігінің басындағы қысым, Па;

$Pn1$; $Pn2$; $Pn3$ – тиісті шнек бөлігінің соңындағы қысым, Па.

Үш секциялы құрама шнек білігінің үйкеліс күштерінің жиынтық жұмысы шнектің әр бөліміндегі үйкеліс күштерінің жұмысын қосу болып табылады(11)+(12)+(13):

$$\sum A = A_1 + A_2 + A_3 \quad (14)$$

$$\sum A = \frac{l_1^2 \mu (2h_{v1}+l_{v1})(2P_{n1}+P_0)}{6sin\alpha_1 \cdot tg\alpha_1} + \frac{l_2^2 \mu (2h_{v2}+l_{v2})(2P_{n2}+P_{k1})}{3sin\alpha_2 \cdot tg\alpha_2} + \frac{l_3^2 \mu (2h_{v3}+l_{v3})(2P_{n3}+P_{k2})}{3sin\alpha_3 \cdot tg\alpha_3} \quad (15)$$

Қоспаның температурасының өзгеруін үйкеліс күштерінің жұмысын шнек бұрылыстарындағы қоспаның массасына бөлу арқылы табамыз:

$$\Delta T(Q) = \frac{\sum A}{\sum M \cdot c} \quad (16)$$

мұндағы: ∑ М – шнек бұрылыстарымен алынған қоспаның массасы, кг;

с – меншікті жылу сыйымдылығы, $\frac{Дж}{кг} \cdot К$.

Қыздыруға жұмсалатын қуат жұмысты қоспаның шнек арқылы өту уақытына бөлу арқылы алынады [6, 7]:

$$N = \sum \frac{A \cdot \omega}{2\pi z} \quad (17)$$

мұндағы: ω – экструдердің бұрандалы білігінің бұрыштық жылдамдығы, $с^{-1}$

Шнек бұрылыстарындағы қоспаның жалпы массасы:

$$\sum M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (18)$$

мұндағы: М1; М2; М3 - сәйкесінше бірінші, екінші және үшінші шнектегі бұрылыстардағы экструдталған қоспаның массасы.

Біз бір бұранданың бұрылыстарында орналасқан қоспаның массасын табамыз:

$$M = \rho v z \quad (19)$$

мұндағы: ρ – қоспаның тығыздығы, кг/м3;

v – шнектің бір айналымындағы қоспаның көлемі, м3;

z – біліктегі бұрылыстар саны.

6–суреттегі диаграммаға сәйкес, біз қос бұрандалы бұранданың аралық кеңістігінде қоспаның көлемін табамыз [6, 7, 19]:

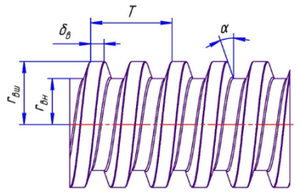
$$v = t\pi(r_{vH}^2 - r_k^2) - 2\delta_v(r_{vH} - r_k)t\sqrt{1 + ctg^2\alpha} \quad (20)$$

мұндағы: r_{vn} – шнек катушкасының сыртқы радиусы, м;

$r_к$ – шнек бұрылыстары арасындағы ойықтың радиусы, м;

t – бұрандалы бұрылыс қадамы;

δ_v – шнек бұрылысының ені, м.



6-сурет – Экструдер бұрандасының бір бөлімі

Тістің сыртқы радиусы r_{vn} арқылы шнек ойығының радиусы және шнек бұрылысының шыңының биіктігі h_v:

$$r_k = r_{vH} - h_v \quad (21)$$

(21)-ді (20) ауыстырғаннан кейін біз келесі теңдікті аламыз:

$$v = t\pi(2h_v r_{vH} - h_v^2) - 2\delta_v h_v t\sqrt{1 + ctg^2\alpha} \quad (22)$$

Түрлендірулерден кейін қоспаның массасын әрқайсысында табу формулаларын аламыз, мысалы, экструдердің үш бөлімі [6, 7, 20]:

$$M_1 = \rho\frac{l_1}{T_1}\left(t_1 \cdot \pi \cdot (2h_{v1}r_{vH1} - h_{v1}^2) - 2\delta_{v1}h_{v1}t_1\sqrt{1 + ctg\alpha_1}\right) \quad (23)$$

$$M_2 = \rho\frac{l_2}{T_2}\left(t_2 \cdot \pi \cdot (2h_{v2}r_{vH2} - h_{v2}^2) - 2\delta_{v2}h_{v2}t_2\sqrt{1 + ctg\alpha_2}\right) \quad (24)$$

$$M_3 = \rho\frac{l_3}{T_3}\left(t_3 \cdot \pi \cdot (2h_{v3}r_{vH3} - h_{v3}^2) - 2\delta_{v3}h_{v3}t_3\sqrt{1 + ctg\alpha_3}\right) \quad (25)$$

мұндағы: t_1; t_2; t_3 – экструдер бұрандасының тиісті бөлігіндегі қадам, м;

r_{vn1}; r_{vn2}; r_{vn3} – экструдер шнекінің тиісті бөліміндегі бұрылыс жотасының сыртқы радиусы, м;

δ_{v1}; δ_{v2}; δ_{v3} – шнектің тиісті бөлігінің бұрылыс жотасының ені, м.

(18) теңдікке (23)-(25) формулаларын ауыстырып алынған түрлендірулерден кейін біз шнек бұрылыстарындағы қоспаның жалпы массасының мәнін аламыз [6, 7, 21]:

$$\begin{aligned}\sum M = \rho\Big(&\frac{l_1}{t_1}\left(t_1 \cdot \pi \cdot (2h_{v1}r_{vH1} - h_{v1}^2) - 2\delta_{v1}h_{v1}t_1\sqrt{1 + ctg\alpha_1}\right) + \\ &\frac{l_2}{t_2}\left(t_2 \cdot \pi \cdot (2h_{v2}r_{vH2} - h_{v2}^2) - 2\delta_{v2}h_{v2}t_2\sqrt{1 + ctg\alpha_2}\right) + \\ &\frac{l_3}{t_3}\left(t_3 \cdot \pi \cdot (2h_{v3}r_{vH3} - h_{v3}^2) - 2\delta_{v3}h_{v3}t_3\sqrt{1 + ctg\alpha_3}\right)\Big)\end{aligned} \quad (26)$$

Жұмыс барысында иінді бұрап, иіргіштің өту қимасын өзгерту арқылы қысымды ғана емес, сонымен қатар бұрандалы аймақ ішіндегі қажетті температураны да реттеуге болады.

Жем қоспасының ингредиенттері бұрандалы аймаққа еніп, ұсақталады, тығыздалады, балқытылады және иіргіштің басынан шығуға қарай жылжиды.

Біз шнектің бірінші бөлігінің бір айналымындағы қоспаның массасын бір айналым уақытына көбейту арқылы өнімділікті табамыз [6, 21]:

$$Q_t = m \cdot \frac{\omega}{2\pi} \quad (27)$$

$$m = \rho \cdot v \quad (28)$$

мұндағы: m-шнектің бір айналымындағы қайта өңделетін қоспаның массасы, кг;

Q_t – экструдер бұрандасының теориялық өнімділігі, кг/с.

(27) мәндерін (20) және (28) ауыстыру арқылы біз астық экструдерінің теориялық өнімділігін табамыз:

$$Q_T = \rho \cdot \left(t\pi(2h_v r_{vH}) - 2\sigma_v h_v t\sqrt{1 + ctg^2\alpha}\right)\frac{\omega}{2\pi} \quad (29)$$

Астық экструдерінің өнімділігін есептегенде, барлық материал бір айналымда иіргішке жете бермейтінін ескеру керек, экструдтау процесі қоспаның мәжбүрлі қарсы ағынымен сипатталады, корпустағы ойықтар бойымен кері қайтарылады, содан кейін шнекпен қайта ұсталады.

Тәжірибелі экструдердің өнімділігі:

$$Q_e = Q_T \cdot \left(1 - \frac{P_{p1}}{P_{max}}\right) \quad (30)$$

$$P_{max} = \frac{\pi r_{vH}^2 \omega \eta z}{2(r_{vH} - r_k)T} \quad (31)$$

мұндағы: P_{max} – экструдер сүзгісі жабылған кезде қоспаның осьтік қозғалысы болмаған кезде шнек тудыратын ең үлкен қысым;

η – қоспаның тиімді тұтқырлығы.

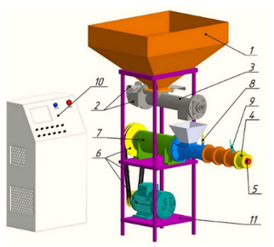
(31) және (29) теңдікті (30) ауыстырып, түрлендірулерден кейін біз тәжірибелі экструдердің қажетті өнімділігін аламыз:

$$Q_e = \rho\left(t\pi(2h_v r_{vH}) - 2\sigma_v h_v t\sqrt{1 + ctg^2\alpha}\right)\frac{\omega}{2\pi} \cdot \left(1 - \frac{P_{p1} 2(r_{vH} - r_k)t}{\pi r_{vH}^2 \omega \eta z}\right) \quad (32)$$

Жоғарыда айтылғандай, тасымалдау аймағындағы шнек қадамын өзгерту экструдердің өнімділігін арттыруы мүмкін, бірақ қадамды шамадан тыс ұлғайту, оны қысу, конустық болт сақинасы мен корпустың үстіндегі саңылауды азайту аймағын қоспамен бітеп тастауы мүмкін. Бұны болдырмас үшін бұранданың қадамын ұлғайтудың шегін дәл білу қажет.

Нәтижелер және талқылау

Математикалық тәуелділікті растау және экструдердің жұмыс процесінің нақты нәтижелерін алу үшін, тәжірибелік эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Ол үшін «Европлюс Восток» ЖШС-де арнайы зертханалық қондырғы әзірленді. Оның негізі ПЭ-150 астық экструдері болды (9-сурет, 1-сурет). Экструдталатын материал ретінде 87 % астық толтырғышы, 10 % ұсақталған өсімдік қалдықтары (күнбағыстың басы мен сабақтары) және 3 % ұсақталған сібір шыршасының қабығынан тұратын қалдықтар қоспасы пайдаланылды.



1 – тиеу бункері; 2 – бункерлік диспенсер; 3 – жылытқыш-араластырғыш;
4 – престеу бұрандалы тобы; 5 – матрица; 6 – күштік беріліс;
7-редуктор-вариатор; 8 – ылғалдылық датчигі; 9 – температура датчигі;
10 – басқару блогы; 11 – бекіту негізі
9-сурет – Экструдердің эксперименттік қондырғысы (моделі)

Экструдтау технологиясы келесідей (3-сурет): тиеу бункерінен 13 алынған жем қоспасының ингредиенттер шнектің 5 қоректендіру бөліміне дозаланған түрде беріледі, біртіндеп сығылады, престеледі және басқа бұрылыс қадамымен келесі шнек бөліміне тасымалданады. Содан кейін процесс келесі бөлімде қайталанады. Үйкеліс және қысу күштері арқылы тасымалдау кезінде қоспасы тегістеледі,

басылады және қызады. Бұрандалы бөлімдер тізбектей, сығымдалған қоспаның алға жылжуын және бұрандалы корпус ішіндегі қысымның жоғарылауын және температураның жоғарылауын қамтамасыз етеді. Білік конусының басы мен иіргіштің матрицасы арасындағы алшақтық, иіргіш саңылауы арқылы материалдың қысымын, температурасын және шығу жылдамдығын реттейді.

Теориялық талдаудың қорытындылары бойынша астық экструдерінің өнімділігіне шнектің айналу жиілігі, қадамы және шнектің бұрылыстарының радиусы (5, 6-сурет) айтарлықтай әсер етеді. Эксперимент жүргізу үшін әртүрлі ұзындықтағы шнек бөлімдері жасалды, олар сынған жағдайда оңай ауыстыруға мүмкіндік берді – қысқа шнек басқа қысқа немесе бір ұзын бөлік 1 ұзын немесе 2 қысқа (10-сурет). 11-суретте бұрандалы біліктің жинақталған фотосуреті көрсетілген.

10-сурет – Экструдер бұрандасының әртүрлі бөлімдерінің дизайны

11-сурет – Экструдердің жинақталған бұрандалы білігі

Бұрандалы топтың конструктивті және технологиялық параметрлерінің тиімділік көрсеткіштеріне әсерін эксперименттік тексеру көп факторлы эксперимент жоспарына сәйкес жүргізілді. Ол үшін бастапқыда кіріс және шығыс параметрлерінің тәуелділіктерін талдау үшін әзірленген 3 факторға арналған 2-ші ретті Бокс-Бенкиннің айналмалы 3 деңгейлі жоспары таңдалды. Бұранданың жұмыс жиілігі диапазоны (685–785) мин$^{-1}$ өнімнің болжамды шығысы үшін таңдалды (95–110) кг/сағ. Өту қимасының ауданы S_{otv} см^2 таңдалды. Шнек қадамы t=20 мм, шнек бұрылыстарының сыртқы радиусы мм. иіргіштің өту қимасының ауданы S_{otv} см^2 қабылданады, сонымен қатар температура 120–140 °С таңдалады.

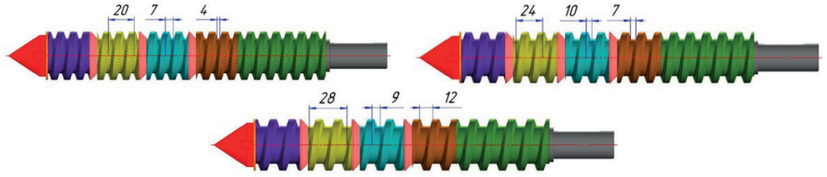
Эксперимент үшін бірнеше өлшемдердің ішінен 20, 24 және 28 мм қадамдармен бұрандалы бөлімдер таңдалады. 13-суретте бұрандалы біліктің суреттері келтірілген, олардың әрқайсысында барлық бұрандалы бөлімдерді жеке орау қадамы бар. Шнектің бұрылыстарының әртүрлі саны қадамның өзгеруімен бірдей шнек бөлігінің бірдей ұзындығында орналасқанын анық байқауға болады. Қадам неғұрлым аз болса, соғұрлым көп бұрылыстар болады. Қадам неғұрлым көп болса, соғұрлым аз бұрылыстар болады. Бұрылыстар мен жем қоспасының жоталарының жанасу аймағы бұрылыстардың санына байланысты.

Сынақтар белгіленген жұмыс режимдері үшін жасалған жоспарға сәйкес (келесідей параметрлеріне: температура, өнімділік, жұмсалған қуат) жүргізілді. Жоспар матрицасы мен эксперимент нәтижелері 1-кестеде келтірілген. Т (°С),

Q (kg/h), N (kVt) мәндері бірнеше (3) эксперименттердің нәтижелері бойынша деректердің тәжірибелік және орташа мәндері бойынша берілген.

1-кесте – Бокс-Бенкин жоспарының матрицасы және эксперимент нәтижелері

№	Деңгей			Табиғи мағыналар			Тэ, ^{0}C				Q, кг/с				N кВт			
	n	l	T	n, мин$^{-1}$	h, мм	t, мм	1	2	3	Ср.	1	2	3	Ср.	1	2	3	Ср.
1	1	1	0	785	12	24	125,7	131,8	126,8	128,1	126,7	127,3	123,0	125,6	2,56	2,56	2,48	2,54
2	-1	1	0	685	12	24	126,3	130,2	126,4	127,6	100,0	101,7	96,1	99,2	2,25	2,28	2,24	2,26
3	1	-1	0	785	4	24	111,7	115,2	111,1	112,8	163,3	165,8	161,6	163,5	2,05	2,07	2,04	2,06
4	-1	-1	0	685	4	24	110,3	115,6	111,5	112,6	135,7	142,8	136,7	138,3	1,81	1,85	1,81	1,83
5	1	0	1	785	8	28	117,6	118,9	116,4	117,5	160,4	161,9	158,3	160,2	2,26	2,24	2,23	2,25
6	-1	0	1	685	8	28	116,1	119,4	116,1	117,3	124,3	128,4	124,2	125,6	1,95	1,97	1,94	1,96
7	1	0	-1	785	8	20	123,4	122,2	117,1	120,8	123,7	122,8	117,6	121,8	2,43	2,36	2,30	2,37
8	-1	0	-1	685	8	20	120,4	122,8	118,1	120,6	102,0	104,3	99,9	102,3	2,08	2,08	2,03	2,07
9	0	1	1	735	12	28	127,7	129,2	126,7	127,7	105,0	106,3	103,8	105,4	2,35	2,33	2,32	2,34
10	0	-1	1	735	4	28	113,7	114,4	110,5	112,8	172,8	173,8	167,9	171,4	1,94	1,90	1,87	1,80
11	0	1	-1	735	12	20	134,4	131,8	129,5	131,9	101,4	99,9	97,4	100,8	2,56	2,47	2,45	2,48
12	0	-1	-1	735	4	20	114,7	116,7	112,2	114,7	119,3	122,0	116,8	120,2	1,98	1,98	1,93	1,95
13	0	0	0	735	8	24	119,6	124,0	118,4	120,6	133,4	139,0	132,9	134,7	2,12	2,16	2,09	2,11
14	0	0	0	735	8	24	121,1	123,5	118,7	121,1	134,1	139,8	132,6	135,4	2,10	2,14	2,07	2,09
15	0	0	0	735	8	24	117,2	125,2	118,3	120,4	133,3	138,7	131,8	134,6	2,08	2,12	2,05	2,07

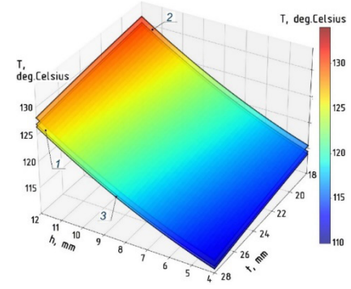


13-сурет – 3D бұрандалы біліктің әр жеке құрастыруында әр түрлі қадаммен бұрандалы бөліктердің модельдерін визуализациялау

Зерттеу нәтижелері бойынша жүргізілген көп факторлы регрессиялық талдау нәтижесінде экструдталатын қоспаның (T ^{o}C) температурасының тиісті факторларға тәуелділігі табылды: n, айн/мин (X_1) шнектің айналу жиілігі; h, мм (X_2) кірістіру болт сақиналарының ұзындығы; t, мм (X_3) тасымалдау шнек секциясының қадамы. Эксперименттердің бірнеше сериясы жүргізілді, факторлардың шамалы мәндері алынып тасталды, тұрақты көрсеткіштер бойынша α=0,05 мәнімен эксперимент нәтижелерін барабар жақындататын толық квадраттық модельді білдіретін регрессия теңдеуі жасалды:

$$T = -197{,}10 + 0{,}8427 \cdot X_1 + 0{,}6563 \cdot X_2 - 0{,}0535 \cdot X_3 - 0{,}00057 \cdot X_1^2 + 0{,}08125 \cdot X_2^2 - 0{,}00552 \cdot X_3^2 \quad (33)$$

Шнек аймағының температураға тәуелділігінің (T0C) шнектің тасымалдау бөлігінің қадамына және регрессиялық тәуелділік негізінде салынған қысу сақинасының ұзындығына (h) жауап беті 14-суретте берілген. Мұнда бұрандалы біліктің айналу айналымдарының әр түрлі саны үшін алынған үш графикалық жазықтық бірінің үстіне бірі қойылады: N=785 айн/мин жиілігі үшін жоғарғы жазықтық (1); ортаңғы жазықтық (2) N=735 айн/мин жиілігі үшін; төменгі жазықтық (3) N=685 айн/мин жиілігі үшін айн/мин. Барлық жазықтықтардың өзгеру сипаты ұқсас.



14-сурет – n (айн/мин) шнек білігінің айналу жиілігінің бекітілген мәні кезінде T (^{o}C) температурасының t (мм) көлік секциясының шнек бұрылыстарының қадамына және h (мм) болт сақинасының ұзындығына тәуелділік графигі

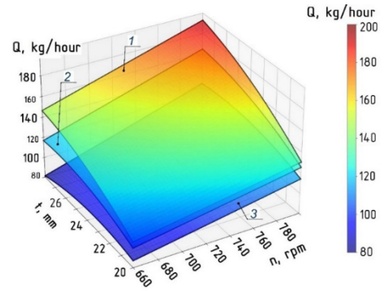
Бұл жерде ең тиімді технологиялық температура режимі (120–140 ^{o}C) шнек аймағында 20 мм шнек қадамын орнатқан кезде қол жеткізіледі. Шнек бұрылыстары қадамының жоғарылауы температураны аздап төмендетеді. Қарастырылған жағдайларда айналу жиілігі, бұрандалы аймақтың температурасына іс жүзінде әсер етпейді.

Қайта жүргізілген эксперименттің деректері, регрессиялық талдаудан кейін алынған келесі тәуелділіктерді α=0,05 болған деңгейінде барабар жақындатады. Елеусіз әсерлерді есепке алмаса және келесі факторлардың өзгеруімен Q, (кг/сағ) өнімділігінің өзгеруін сипаттайды: бұранданың айналу жиілігі (n, айн/мин) (X_1); қысу сақиналарының ұзындығы (h, мм) (X_2); тасымалдау шнек секциясының қадамы (t, мм) (X_3).

$$Q = -171.47 - 0{,}2228 \cdot x_1 + 14{,}5225 \cdot x_2 + 17.4487 \cdot x_3 + 0{,}000015 \cdot x_1^2 + 0{,}0015 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0{,}01888 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0{,}193 \cdot x_2^2 - 0{,}7344 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0{,}4539 \cdot x_3^2 \quad (34)$$

Сәйкес факторлардың өзгеруінен экструдердің өнімділігінің (Q) өзгеруін сипаттайтын жауап бетінің графикалық бейнесі – шнектің айналу жиілігі (n) және тасымалдау бөлімінің шнек қадамы (t) регрессиялық талдау нәтижелері бойынша

салынған, 15-суретте берілген. Онда үш беті де бірінің үстіне бірі қабаттасқан: жоғарғы жазықтық (1) - қақпаның ені үшін h = 14 мм; ортаңғы жазықтық (2) – қақпаның ені үшін h= 8 мм; төменгі жазықтық (3) – қақпаның ені үшін h = 4 мм.



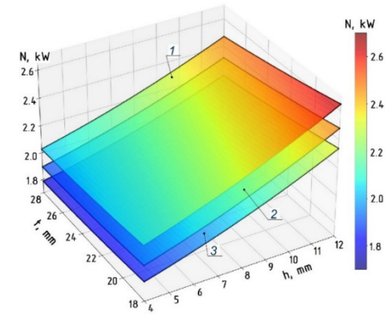
15-сурет – n (айн/мин) экструдер білігінің айналу жиілігінен және t (мм) көлік аймағының шнек қадамынан Q (кг/сағ)өнімділігінің өзгеру графигі

Графиктегі жазықтық беттерінің орналасуын талдау, максималды өнімділік шнек қадамының өзгеруіне және оның айналу жиілігіне байланысты екенін растайды. Бұранданың қадамын немесе жылдамдығын арттыру экструдердің өнімділігін арттырады. Конструктивті және технологиялық параметрлер анықталды, онда Q=135 кг/сағ максималды өнімділік қамтамасыз етілді, t=24 мм секция бұрандасының бұрылу қадамында жасалған процестің ұсынылған температурасы сақталды. Сол аралықта эксперименттің орташа өнімділік диапазоны 100–135 кг/сағ болды.

Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері бойынша жүргізілген көп факторлы регрессиялық талдау, сондай-ақ жем қоспасын экструдтау процесіне жұмсалған қуаттың (N, кВт) таңдалған факторларға тәуелділігін анықтады: шнектің айналу жиілігі (n, айн/мин) (X_1); қысу сақиналарының ұзындығы (h, мм) (X_2); тасымалдау шнек секциясының қадамы (t, мм) (X_3). Эксперимент нәтижелерінің көп факторлы регрессиялық талдауы оларды жеткілікті түрде жуықтайтын (α=0,05) регрессия теңдеуін алуға негіз болды:

$$N = 2{,}735654 - 0{,}004685 \cdot X_1 + 0{,}012739 \cdot X_2 - 0{,}004756 \cdot X_3 + \\ +0{,}000005 \cdot X_1^2 + 0{,}000062 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}000018 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ +0{,}001875 \cdot X_2^2 - 0{,}001287 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}000365 \cdot X_3^2 \quad (35)$$

Регрессиялық талдау нәтижелері бойынша салынған шнектің айналу жиілігі (n) мен қадамының (t) өзгеруінен эксперимент кезінде тұтынылатын қуаттың (N) өзгеруін сипаттайтын жауап беттері 16-суретте көрсетілген. Суретте көрсетілген үш жауап беті келесі ретпен қабаттасады: жоғарғы жазықтық (1) – бұранданың айналу жиілігі үшін N = 785 айн/мин; ортаңғы жазықтық (2) – жиілік үшін N=735 айн/мин; төменгі жазықтық (3) – жиілік үшін N=685 айн/мин.



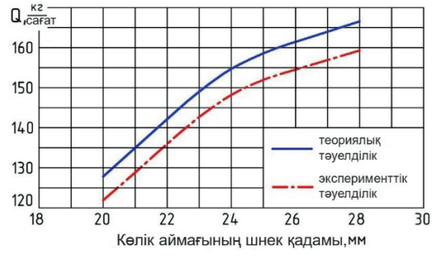
16-сурет – n (айн/мин) экструдер білігінің айналу жиілігінің белгіленген мәні кезінде h (мм) қысу сақинасының ұзындығынан және t (мм) көлік аймағы шнегінің қадамынан N (кВт) қуатының өзгеру графигі

Бұл графикте қуат шығындарының таңдалған факторларға теориялық тәуелділігін растайды, яғни айналу жиілігі (n) және бұранданың қадамы (t) шнек қадамының өсуі (t), қуат шығындарын азайтады. Бұранданың айналу жиілігінің (n) өсуі қуат шығындарын арттырады. Тәжірибе барысында қуат шығындары 1,94 кВт-тан 2,53 кВт-қа дейін өзгерді.

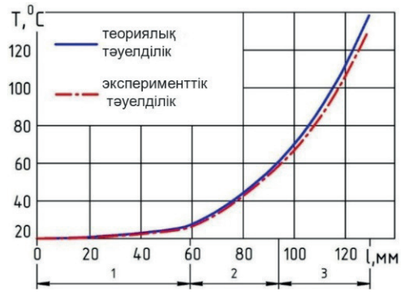
Экструдердің бұрандалы аймағындағы температураны анықтау үшін математикалық модельдердің сәйкестігін салыстыру талдауы жүргізілген эксперименттер сериясы негізінде жасалды.

1-кестеде теориялық есептеулер және эксперименттер арқылы алынған температура, өнімділік және қуат шығындарының көрсеткіштерін жалпы салыстыру орындалды.

Экструдердің бұрандалы тобының құрылымдық параметрлерінің оның жұмыс процесіне әсерін зерттеу теориялық және тәжірибелік жолмен алынған өнімділік мәндерінің сәйкестігін растады (17-сурет). Деректердің салыстырмалы қателігі 5 %-дан аспайды, сондықтан алынған математикалық модельдің көмегімен экструдердің өнімділігін жеткілікті дәлдікпен есептеуге болады.



17-сурет – Теориялық және эксперименттік жолмен алынған Q_e өнімділік мәндерін салыстыру



18-сурет – Ұзындығы бойынша шнек
секцияларындағы температура көрсеткіштері

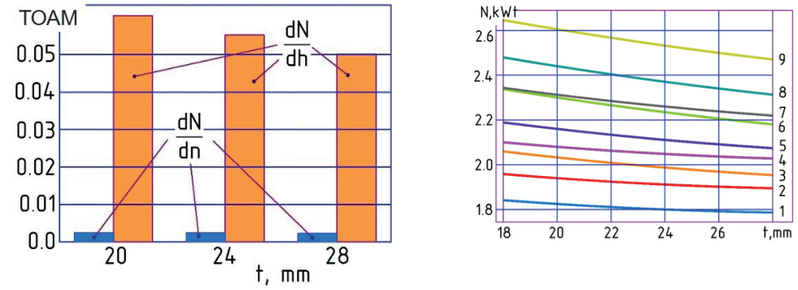
Эксперименттік зерттеулер сонымен қатар алынған математикалық қуат шығындарының эксперимент нәтижелерімен сәйкестігін тексеру үшін жүргізілді. Теориялық және эксперименттік нәтижелерді салыстыру олардың жақсы конвергенциясын көрсетті, максималды қателік шегі 4,9 %. Демек, процеске жұмсалған қуатты анықтаудың математикалық моделі оны өте жоғары дәлдікпен табады.

Біз шнек тобының әр түрлі бөлімдерінде температураның өсуіне сәйкестік графигін саламыз: 1-тиеудің тасымалдау бөлімі; 2 – тығыздау бөлімі; 3-пластикалық ағын аймағы (18-сурет). 18-суреттің деректері теориялық және эксперименттік әдістермен алынған. Деректердің қателігі 5%-дан аспайды.

Материалдың қозғалыс барысы бойынша шнектің құрамдас бөлімдеріндегі температураның өзгеруінің графикалық көрінісін талдау бірінші секциядан кейін (6 °С қыздыру) температураның негізгі көтерілуі екінші секцияда (33 °С қыздыру) басталып, үшінші секцияда (73 °С дейін қыздыру) жалғасатынын көрсетеді. Бірінші бөлімдегі температураның көтерілуі ондағы барлық процестердің басталуына байланысты шамалы. Мұнда қоспаны ұстап алу, оның бастапқы қысылуы, үйкеліс күштерінің жұмысы басталады, қысым көтеріледі. Келесі бөлімдерде қоспаның көп мөлшері айдалады, демек қысым да, температура да жоғарылайды.

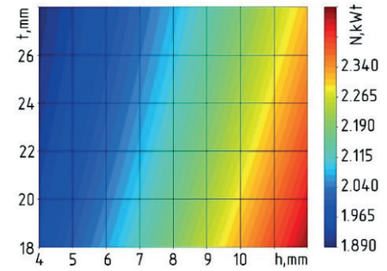
Жем қоспасын экструдтау процесіне жұмсалған N (кВт) қуатының үш параметрден тәуелділігінің қысқаша қорытынды талдауын қарастырайық: 1) n-шнек білігінің айналу жиілігі, айн/мин; 2) h-қысу сақинасының ұзындығы, мм; 3) t-көлік секциясының шнек қадамы, мм.

19,а-суретте n және h туындысының орташа абсолюттік мәні (TOAM) түрінде n-ге әр түрлі t кезінде әсер ету диаграммасы келтірілген. 19,б - суретте N қуатының t параметріне тәуелділігі талданады: 1) n = 685 айн/мин; h = 4 мм; 2) N = 735 айн/мин; h = 4 мм; 3) n = 685 айн / мин; h = 8 мм; 4) n = 785 айн / мин; h = 4 мм; 5) n = 735 айн / мин; h = 8 мм; 6) n = 685 айн/мин; h = 12 мм; 7) n = 785 айн / мин; h = 8 мм; 8) n = 735 айн/мин; h = 12 мм; 9) n = 785 айн/мин; h = 12 мм

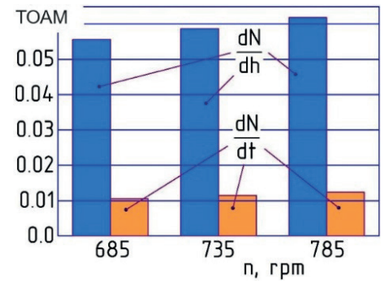


19-сурет – а) n және h-тың N-ге әсерін әр түрлі t мәндерінде салыстыру;
б) N-нің әр түрлі n және h мәндерінде t параметріне тәуелділігі

20-суретте t және h өзгерген кезде N=735 айн/мин тұрақты мәні үшін N өзгерісінің жылу картасы, ал 21-суретте туынды (TOAM) орташа абсолюттік мәні (N әртүрлі n кезіндегі) түріндегі t және h әсер ету диаграммасы келтірілген.



20-сурет – N жылу картасы n=735 айн/мин әртүрлі t және h



21-сурет – h және t-дің N-ге әсерін әртүрлі n-мен салыстыру

Қаржыландыру туралы ақпарат

Осы жұмыстарға байланысты зерттеулерді ҚР Ғылым және Жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (AP26102017 – «Өнімділігі жоғары өсімдік қалдықтарын қайта өңдеудің инновациялық технологиясы үшін параметрлерді негіздеу және жабдықтарды әзірлеу» гранты).

Қорытынды

1) Астық экструдері шнек тобының конструктивтік-технологиялық параметрлерінің теориялық және эксперименттік расталған негіздемесі оны жаңғырту кезінде ұтымды параметрлерді болжамды және жоғары дәлдікпен таңдауға мүмкіндік береді;

2) t параметрінің жоғарылауымен N қуатының орташа мәні төмендейді.

3) Қуаттың N мәні, қақпа сақиналарының биіктігі h параметрінің өзгеруіне тікелей байланысты, яғни қақпаның диаметрі неғұрлым үлкен болса, корпус пен бұрандалы бөліктердің бұрылыстары арасындағы алшақтық қашықтығы аз болса, соғұрлым көп күш жұмсалады. Сондықтан жұмсалатын қуатты оңтайландыру үшін алдымен h параметрін, содан кейін t параметрін және соңғы n параметрін реттеу ұсынылады.

N максималды қуаты h=12 мм, t=28 мм және n=600 айн/мин, ал минимум h=4 мм, t=20 мм және n=785 айн/мин кезінде жетеді.

3) N параметрінің жоғарылауымен N қуатының орташа мәні төмендейді.

4) N қуатының максималды мәндеріне h және t максималды мәндерінде қол жеткізіледі.

5) Экструдер конструкциясының тасымалдау аймағында ұлғайтылған қадамы бар екі бұранданы және конустық қысу сақиналарын қолданған жөн.

6) Азықтың ең жоғары сапасы байқалатын өңдеудің неғұрлым оңтайлы режимдеріне мынадай конструктивтік параметрлерде қол жеткізіледі: радиусы $r_{вн1}$ = 18 мм, тістің биіктігі 4 мм, шнектің қадамы t=28 мм, тасымал аймағының ұзындығы 60 мм, тығыздау аймағы 35 мм, престеу аймағы 35 мм, біліктің айналу жиілігі n=785 мин$^{-1}$. Қоспаны өңдеу температурасын өзгерту үшін иіргіштің өту аймағын өзгерткен жөн.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Mironov, K. E., Obolenskiy, N., Goeva, V., Grishin, N.** Development and study of the grain crushing working process of shocking and reflective crusher // Vestnik of Kazan state agrarian university, 2019. – Volume 14. – № 1. – P. 100–106. – https://doi.org/10.12737/article_5cceddbcce1e93.58919071.

2 **Mu, X., Li, H., Wang, Z., Wang, Q., Geng, D., Zhu, J.** Comparison of crushing effect of differently shaped crushing rollers on whole-plant silage maize // Agriculture, 2023. – 13(7). – 1276. – https://doi.org/10.3390/agriculture13071276

3 **Chuikov, V. E., Konovalov, V. V., Dontsova, M. V., Petrova S. S.** Justification of a promising functional scheme of a grain crusher. Bulletin Samara State Agricultural Academy, 2024. – 2, P. 34–43. – https://doi.org/10.55170/1997-3225-2024-9-2-34-43.

4 **Bulatov, S. Yu.** Modeling of work process of grain crusher ejector. May 2015. Tractors and Agricultural Machinery. 82(5): P. 25–27. – https://doi.org/10.17816/0321-4443-65437

5 **Doudkin, M., Kim, A., Yakovlev, I., Vasilkov, D., Asangaliev, Ye., Moldakhanov, B.** Analysis of experimental studies on the efficiency of a new mixer for molding mixtures components for the production of premix lick blocks and the final product effect // Production engineering archives, 2025. – 31(1). – P. 81–90. – https://doi.org/10.30657/pea.2025.31.8

6 **Doudkin, M., Kim, A., Vavilov, A., Guryanov, G., Yakovlev, V., Varavin, Ye.** Justification of the efficiency of modernizing a grain extruder for the production of feed additives using crop residues // Engineering, Technology & Applied Science Research. Vol. 15. – № 5. – October, 2025.

7 **Kraugerud, O. F.** Effects of online pretreatment of plant ingredients on processing responses and physical properties in extruded fish feed / O. F. Kraugerud, B. Svihus // Animal feed science and technology, 2011. – Sci. 168. – № 3–4. – P. 250 – 256.

8 **Kushnir, V.** Improvement of the extruder construction / V.Kushnir, N.Gavrilov, T.Shkotova // Livestock science. – 2019. – № 9783319956299. – P. 2133–2142.

9 **Li, H.** Optimization of the extrusion process for the development of extruded snacks using peanut, buckwheat, and rice blend / H. Li, Z. Xiong, X. Li // Journal of food processing and preservation, 2019. – Sci. 43. – № 12. P. 14264.

10 The effect of parameters on the performance efficacy of a single screw feed extruder using a design experiments and response surface methodology / Kabdusheva A. [and etc.] // Bulgarian journal of agricultural science. – 2020. – Sci. 26. – № 2. – P. 492–497.

11 Effect of water addition on the microstructure, lipid incorporation, and lipid oxidation of corn extrudates / J. Amft [and etc.] // European journal of lipid science and technology. – 2019. – Sci. 121. – № 9. P. 1800433.

12 **Frolov, V. Y.** Theoretical aspects of the working process of a press extruder with a variable step auger for preparation of concentrated feed / V. Y. Frolov, E. A. Kotelevskaya, M. I. Tumanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – P. 52003.

13 **Salem Ali Karrab and Mohamed Ali Ballem.** Failure Analysis and Repair of a Broken Extruder Shaft: A Case Study. EJERS, European Journal of Engineering Research and Science, January 2020. – Vol. 5. – № 1. – P. 107–111. – http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.1.1738

14 **Lyashuk, O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O., Zolotyy R.** Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, Volume 13. – Issue 1. – P. 4449–4460. – March 2019. – https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378

15 **Shilong, Li, Jun, Lu.** Finite Element Analysis of Worm Auger in Meat Grinder. Advanced Materials Research, 2014. – Vol. 945–949. – P. 162–165. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.162

REFERENCES

1 **Mironov, K. E., Obolenskiy, N., Goeva, V., Grishin, N.** Development and study of the grain crushing working process of shocking and reflective crusher // Vestnik of Kazan state agrarian university, 2019. – Volume 14. – № 1. – P. 100–106. – https://doi.org/10.12737/article_5cceddbcce1e93.58919071.

2 **Mu, X., Li, H., Wang, Z., Wang, Q., Geng, D., Zhu, J.** Comparison of crushing effect of differently shaped crushing rollers on whole-plant silage maize // Agriculture, 2023. – 13(7). – 1276. – https://doi.org/10.3390/agriculture13071276

3 **Chuikov, V. E., Konovalov, V. V., Dontsova, M. V., Petrova S. S.** Justification of a promising functional scheme of a grain crusher. Bulletin Samara State Agricultural Academy, 2024. – 2, P. 34–43. – https://doi.org/10.55170/1997-3225-2024-9-2-34-43.

4 **Bulatov, S. Yu.** Modeling of work process of grain crusher ejector. May 2015. Tractors and Agricultural Machinery. 82(5): P. 25–27. – https://doi.org/10.17816/0321-4443-65437

5 **Doudkin, M., Kim, A., Yakovlev, I., Vasilkov, D., Asangaliev, Ye., Moldakhanov, B.** Analysis of experimental studies on the efficiency of a new mixer for molding mixtures components for the production of premix lick blocks and the final product effect // Production engineering archives, 2025. – 31(1). – P. 81–90. – https://doi.org/10.30657/pea.2025.31.8

6 **Doudkin, M., Kim, A., Vavilov, A., Guryanov, G., Yakovlev, V., Varavin, Ye.** Justification of the efficiency of modernizing a grain extruder for the production of feed additives using crop residues // Engineering, Technology & Applied Science Research. Vol. 15. – № 5. – October, 2025.

7 **Kraugerud, O. F.** Effects of online pretreatment of plant ingredients on processing responses and physical properties in extruded fish feed / O. F. Kraugerud, B. Svihus // Animal feed science and technology, 2011. – Sci. 168. – № 3–4. – P. 250 – 256.

8 **Kushnir, V.** Improvement of the extruder construction / V. Kushnir, N. Gavrilov, T. Shkotova // Livestock science. – 2019. – № 9783319956299. – P. 2133–2142.

9 **Li, H.** Optimization of the extrusion process for the development of extruded snacks using peanut, buckwheat, and rice blend / H. Li, Z. Xiong, X. Li // Journal of food processing and preservation, 2019. – Sci. 43. – № 12. P. 14264.

10 The effect of parameters on the performance efficacy of a single screw feed extruder using a design experiments and response surface methodology / Kabdusheva A. [and etc.] // Bulgarian journal of agricultural science. – 2020. – Sci. 26. – № 2. – P. 492–497.

11 Effect of water addition on the microstructure, lipid incorporation, and lipid oxidation of corn extrudates / J. Amft [and etc.] // European journal of lipid science and technology. – 2019. – Sci. 121. – № 9. P. 1800433.

12 **Frolov, V. Y.** Theoretical aspects of the working process of a press extruder with a variable step auger for preparation of concentrated feed / V. Y. Frolov, E. A. Kotelevskaya, M. I. Tumanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – P. 52003.

13 **Salem Ali Karrab and Mohamed Ali Ballem.** Failure Analysis and Repair of a Broken Extruder Shaft: A Case Study. EJERS, European Journal of Engineering Research and Science, January 2020. – Vol. 5. – № 1. – P. 107–111. – http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.1.1738

14 **Lyashuk, O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O., Zolotyy R.** Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, Volume 13. – Issue 1. – P. 4449–4460. – March 2019. – https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378

15 **Shilong, Li, Jun, Lu.** Finite Element Analysis of Worm Auger in Meat Grinder. Advanced Materials Research, 2014. – Vol. 945–949. – P. 162–165. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.162

06.10.25 ж. баспаға түсті.
18.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
25.10.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Б. А. Молдаханов[1], М. В. Дудкин[2], А. И. Ким[3], В. С. Яковлев[4], А. К. Айтказина[5]
[1,2]ТОО «ЕВРОПЛЮС ВОСТОК», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Университет «МИРАС», Республика Казахстан, г. Шымкент;
[4,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 06.10.25.
Поступило с исправлениями 18.10.25.
Принято в печать 25.10.25.

ВЛИЯНИЕ ШАГА ШНЕКОВЫХ СЕКЦИИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Цель данной работы направлена на совершенствование конструкций и процесса измельчения зерновых и растениеводческих отходов с обоснованием конструктивно-технологических параметров шнека экструдера.

Для погрузки, переработки и выпуска исходной зерновой смеси с растениеводческими отходами из экструдера в виде нового комбикорма она должна пройти регламентированный комплекс необходимого и последовательного технологического воздействия, происходящего на соответствующих участках шнековой группы.

В соответствии с прохождением загруженной исходной смеси внутри корпуса шнековой группы и ее выходом через спиннер без потери качества нового конечного продукта, ее можно получить с заданными характеристиками на короткой длине вала шнека, что может привести к сокращению общего времени процесса экструдирования и затратам на новые комбикормы с ингредиентами растительных отходов из-за увеличения урожайности.

Возможности повышения производительности опытного экструдера путем реконструкции секций винтовой группы-это полный цикл работ,

включающий теоретические расчеты с использованием ранее рассчитанных зависимостей производительности и затрат на мощность, изучение влияния на них конструктивных изменений и изменений деталей винтовой группы. Производительность лабораторного экструдера была испытана на зерновой смеси, которая богата минералами и витаминами, такими как измельченный подсолнечник и его стебли, а также строго дозированные отходы растениеводства и лесозаготовок, такие как хвоя пихты сибирской.

Ключевые слова: кормоэкструдер, двухзаходный шнековый вал, шнековые секции, межвитковое расстояние, противоток смеси, фильера.

B. A. Moldakhanov[1], M. V. Doudkin[2], A. I. Kim[3], V. S. Yakovlev[4], A. K. Aitkazina[5]
[1,2]EUROPLYUS VOSTOK, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
3Universitety «MIRAS», Republic of Kazakhstan, Shymkent;
[4,5]East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 06.10.25.
Received in revised form 18.10.25.
Accepted for publication 25.10.25.

THE EFFECT OF THE PITCH OF SCREW SECTIONS ON THE PRODUCTIVITY OF EXTRUSION OF CROP WASTE

The purpose of this work is aimed at improving the structures and the process of crushing grain and crop waste with the justification of the structural and technological parameters of the extruder screw.

To load, process and release the initial grain mixture with crop waste from the extruder in the form of a new compound feed, it must undergo a regulated complex of necessary and consistent technological effects occurring in the relevant sections of the screw group.

According to the passage of the loaded feedstock inside the screw group housing and its exit through the spinner without loss of quality of the new final product, it can be obtained with specified characteristics on a short length of the screw shaft, which can lead to a reduction in the total time of the extrusion process and the cost of new compound feeds with vegetable waste ingredients due to increased yields.

The possibility of increasing the productivity of an experimental extruder by reconstructing sections of the screw group is a full cycle of work, including theoretical calculations using previously calculated dependencies of productivity and power costs, studying the impact of structural changes and changes in the details of the screw group. The performance of the laboratory extruder was tested on a grain mixture that is rich in minerals and vitamins, such as crushed sunflower and its stems, as well as strictly dosed crop and logging waste, such as Siberian fir needles.

Keywords: feed extruder, two-way screw shaft, screw sections, inter-turn distance, counterflow of the mixture, spinnerets.

МРНТИ 55.30.03
https://doi.org/10.48081/SMDB4537

З. З. Момынкулов[1], О. М. Олжаев[2], А. Т. Турсынова[3], А. К. Тулешов[4], С. М. Ибраев[5]
[1,2,3]Международный университет информационных технологий,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[1,2,3,4,5]Институт механики машиноведения имени академика
У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6196-1395
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9930-8990
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1918-065X
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9775-3049
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-5745
*e-mail: mrjohnnyunited@gmail.com

ПОСТРОЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИИ ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ DDPG

Целью данной работы является исследование эффективности алгоритма глубокого обучения с подкреплением Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) для генерации и оптимизации траекторий агента в задачах с непрерывными пространствами управления. Исследование направлено на демонстрацию возможностей DDPG в условиях ограниченного количества эпизодов и усложнённых задач с препятствиями и множественными целевыми точками. Основное внимание уделяется построению функции награды, учитывающей расстояние до цели, избегание препятствий и успешное достижение целей, а также визуализации полученных траекторий.

Показано, что применение алгоритма DDPG позволяет агенту адаптивно обучаться и успешно находить как одиночную, так и множественные цели, формируя эффективные траектории. При этом демонстрируется устойчивость поведения агента к изменениям условий задачи, а также высокая способность к избеганию препятствий. Несмотря на ограниченное число эпизодов, агент в большинстве случаев способен стабильно достигать целей по оптимальным траекториям.

Результаты подтверждают перспективность использования DDPG в задачах планирования и управления траекторией, включая робототехнические приложения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение среды, увеличение числа целей и внедрение более сложных функций награды.

Ключевые слова: обучение с подкреплением, DDPG, генерация траектории, функция награды, непрерывное пространство, робототехника, навигация, планирование движения.

Введение

Обучение с подкреплением (RL, Reinforcement Learning) является одной из ключевых технологий в области машинного обучения, позволяющей агентам учиться взаимодействовать с окружающей средой через пробу и ошибки. Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) – это один из эффективных алгоритмов RL, который используется для задач с непрерывными пространствами действий. В данной статье рассматривается подход к генерации и нахождению оптимальных траекторий с помощью DDPG, а также анализируется эффективность метода для задач управления и планирования. Алгоритм DDPG особенно эффективен для задач, где агенту необходимо генерировать оптимальные траектории в многомерном непрерывном пространстве. Примером может служить задача навигации или планирования движения робота. В данной работе были рассмотрены основные элементы алгоритма DDPG и его применение в генерации траектории агентом. Информация о пространстве задается функцией награды.

Алгоритмы глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) играют ключевую роль в современных интеллектуальных системах. Среди них алгоритм Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), предложенный в работе [1], доказал свою высокую эффективность при обучении агентов в непрерывных пространствах управления, что делает его особенно актуальным для робототехники, автоматизации и автономных систем.

В отличие от дискретных методов, DDPG позволяет агенту принимать непрерывные действия, что критично в управлении реальными физическими системами – манипуляторами, дронами, автомобилями и промышленными установками [2;3]. Благодаря архитектуре Actor-Critic, буферу воспроизведения и целевым сетям, DDPG демонстрирует устойчивое и стабильное обучение, даже в условиях сложных и шумных сред.

Одной из ключевых областей применения DDPG является робототехника. В задачах управления манипуляторами с несколькими степенями свободы, алгоритм способен генерировать оптимальные траектории движения, обходить препятствия и достигать целевых точек с высокой точностью [4]. Его применение охватывает как симуляционные среды (MuJoCo, Webots, Isaac Gym), так и физические платформы, включая UR5, Franka Emika и Baxter [5].

В автономном транспорте DDPG активно применяется для рулевого управления, планирования пути, адаптивного торможения и других задач, требующих непрерывного управления в реальном времени. Ряд исследований продемонстрировал успешное использование алгоритма в обучении агентов, способных к безопасной навигации в городских условиях и адаптации к неожиданным ситуациям [6].

Не менее важной является роль RL-агентов в системах автоматизации производственных процессов. Современные производства становятся всё более гибкими и интеллектуальными, что требует адаптивных систем управления. DDPG позволяет обучать агентов, которые способны регулировать параметры (температуру, давление, скорость подачи и др.) в зависимости от текущих условий

среды и целевых показателей [7]. В отличие от классических ПИД-регуляторов, такие агенты способны самостоятельно вырабатывать стратегию управления, минимизируя ошибки и потери энергии [8].

Реальная эффективность RL-агентов подтверждена рядом промышленных кейсов. Например, в системах управления HVAC (отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха), агенты на базе DDPG снижали энергопотребление до 20 % по сравнению с традиционными регуляторами [9]. В нефтехимической промышленности RL использовался для оптимизации процессов дистилляции и каталитического крекинга, демонстрируя прирост производительности и снижение затрат [10].

Также стоит отметить эффективность DDPG в финансовой индустрии, где агенты обучаются стратегиям управления инвестициями, минимизируя риски и максимизируя прибыль. Использование DDPG позволяет учитывать динамику рынка и мгновенно адаптироваться к изменениям, что невозможно в рамках традиционных моделей [11].

Таким образом, алгоритм DDPG представляет собой универсальный инструмент, способный эффективно решать задачи в реальном мире – от автономного управления транспортом до промышленной автоматизации и финансовых решений. Его адаптивность, способность работать в непрерывных пространствах и обучаться на основе взаимодействия с окружающей средой делает его ценным элементом в разработке современных интеллектуальных систем.

Материалы и методы

Современные методы глубокого обучения с подкреплением находят всё более широкое применение в инженерных задачах машиностроения, обеспечивая новые возможности по адаптивному управлению сложными многозвенными системами. Одним из наиболее эффективных подходов является алгоритмы, позволяющие строить оптимальные стратегии управления в непрерывных пространствах состояний и действий. Потенциал особенно ярко проявляется при решении задач, связанных с управлением промышленными манипуляторами, автоматизированными мехатронными узлами, ЧПУ-станками и транспортно-технологическим оборудованием, где требуется высокая точность, надёжность и способность адаптироваться к динамическим условиям производственного процесса.

Современные методы глубокого обучения с подкреплением находят всё более широкое применение в инженерных задачах машиностроения, обеспечивая новые возможности для адаптивного управления сложными многозвенными системами особенно важен при решении задач, связанных с управлением промышленными манипуляторами, автоматизированными мехатронными узлами, ЧПУ-станками и транспортно-технологическим оборудованием, где требуется высокая точность, надёжность и способность адаптироваться к динамическим условиям производственного процесса. Использование DDPG в системах управления роботизированными манипуляторами позволяет достигать плавного и безопасного планирования траекторий, избегать столкновений и обеспечивать

быстрое приближение к целевым точкам даже при ограниченном числе обучающих эпизодов. Применение алгоритма эффективно при управлении промышленными механизмами в условиях неопределённости, когда заранее невозможно учесть все внешние возмущения и динамические ограничения, что делает возможным создание более гибких и автономных производственных систем.

Не менее важной частью задач машиностроения является построение оптимальных траекторий движения механизмов — как для стационарных манипуляторов, так и для мобильных платформ и транспортных узлов. Методы планирования траекторий включают использование полиномиальных кривых, эволюционных и кинодинамических алгоритмов, которые позволяют учитывать динамические ограничения механизмов, минимизировать время цикла и снижать износ исполнительных узлов. Эти подходы успешно применяются для программирования движения ЧПУ-станков, транспортных роботов и сборочных манипуляторов, обеспечивая высокую точность и надёжность производственных операций (рисунок 1).

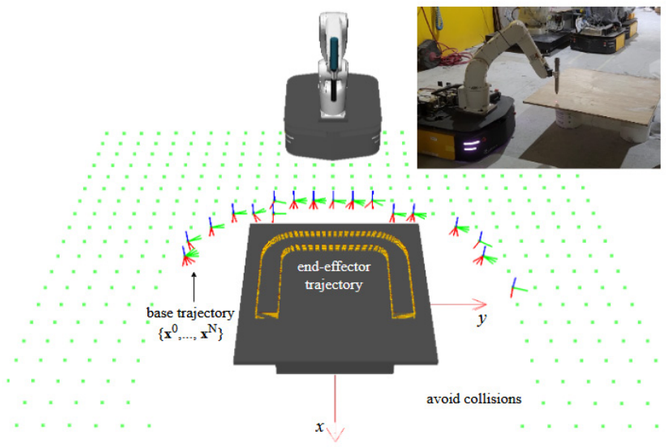


Рисунок 1 – Демонстрация планирование оптимальных траекторий для мобильных манипуляторов с учетом ограничения непрерывности траектории рабочего органа

Интеграция DDPG с методами классического траекторного планирования объединяет преимущества традиционных алгоритмов и адаптивного обучения. Такой подход позволяет формировать оптимальные движения на основе как заранее рассчитанных моделей, так и данных, получаемых от симуляций или операторских демонстраций. В процессе эксплуатации система может самостоятельно дообучаться, учитывая непредвиденные изменения среды или геометрии рабочего пространства, что делает её более устойчивой и универсальной.

Применение подобных технологий в машиностроительном производстве открывает путь к созданию интеллектуальных систем управления, способных самостоятельно выстраивать оптимальные траектории, адаптироваться к изменению условий и эффективно взаимодействовать с другими роботами и людьми. Это соответствует современным тенденциям Индустрии 4.0, ориентированным на гибкость, автономность и максимальную эффективность производственных процессов.

В свою очередь, DDPG является улучшением алгоритма Deterministic Policy Gradient (DPG) и использует глубокие нейронные сети для представления акторов и критиков. Основные особенности:

1. Архитектура Actor-Critic: Actor (актор) оптимизирует стратегию, выдавая действия, а Critic (критик) оценивает качество действий через функцию Q.

2. Оптимизация стратегий в непрерывных пространствах: в отличие от Q-learning, DDPG работает с непрерывными пространствами, что делает его подходящим для задач управления.

3. Использование реплей-буфера: Обучение стабилизируется за счет хранения прошлых опытов в буфере.

4. Целевые сети: Для предотвращения расхождения весов используются копии основных сетей с более медленным обновлением. DDPG основывается на концепции Q-обучения, где функция ценности Q(s,a) оценивает ожидаемую совокупную награду при выполнении действия a из состояния s (1.1).

$$Q^{\pi}(s_t, a_t) = E[\sum_{k=0} \gamma^k r_{t+k} \mid s_t = s, a_t = a, \pi)] \quad (1.1)$$

$\gamma \in [0,1]$ – коэффициент дисконтирования, контролирующий влияние будущих наград. r_t – награда в момент времени t. В DDPG используются две сети:

Actor $\pi(s \mid \theta^{\pi})$ – определяет стратегию, выдавая действие a Critic $Q(s, a \mid \theta^{Q})$ – оценивает качество действия Стратегия Actor представлена детерминированной функцией (1.2). Critic оценивает действие (1.3).

$$a_t = \pi(s_t, \theta^{\pi}) + Noise_t \quad (1.2)$$

$$Q(s_t, a_t \mid \theta^{Q}) \quad (1.3)$$

В DDPG для обновления используется градиентный спуск. Для того чтобы посчитать градиентный спуск требуется определить функцию потерь для Critic и целевым значением y_i. Функция потерь для Critic будет (1.4).

$$L(\theta^{Q}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Q(s_i, a_i \mid \theta^{Q}) - y_i)^2 \quad (1.4)$$

Целевое значение тогда станет (1.5).

$$y_t = r_t + \gamma Q(s_{t+1}, \pi(s_{t+1}|\theta^{\pi})|\theta^{\pi})$$

Градиентный спуск в таком случае можно объявить (1.6).

$$\theta^{Q} \leftarrow \theta^{Q} - \alpha \nabla \theta_{Q} L(\theta^{Q}) \quad (1.6)$$

где a – скорость обучения. Теперь определим для Actor сети. Actor обновляется для максимизации j ожидаемой функции ценности. Градиенты вычисляются с использованием правила цепочки (chain rule) (1.7).

$$\nabla_{\theta^{\pi}} J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \nabla_{a} Q(s, a\,|\theta^{Q})|_{a=\pi(s)} \nabla_{\theta^{\pi}} \pi(s \mid \theta^{\pi}) \quad (1.7)$$

Параметры сети будут обновляться по градиентному спуску (1.8).

$$\theta^{\pi} \leftarrow \theta^{\pi} + \alpha_{\pi} \nabla_{\theta^{\pi}} J \quad (1.8)$$

Чтобы стабилизировать обучение, DDPG использует целевой сети для Actor и Critic. Параметры целевой сети обновляются медленно (1.9).

$$\theta^{\pi'} \leftarrow \tau\theta^{\pi} + (1 - \tau)\theta^{\pi'} \quad (1.9)$$

где τ – коэффициент медленного обновления.

Для повышения стабильности и устранения корреляции между последовательными опытами $s_t, a_t, r_t, s_{(t+1)}$ в DDPG используется буфер воспроизведения D. Данные хранятся в виде (1.10)

$$D = \{(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})\} \quad (1.10)$$

Во время обучения мини-батчи B будут выбраны случайно из D (1.11).

$$B = \{(s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) \mid t = 1, \ldots, N\} \quad (1.11)$$

Применение DDPG к задаче генерации траекторий.

В непрерывных пространствах будут определены две точки. Начальная точка и конечная точка. Изначальной точки должна будет построена траектория, которая дойдет до конечной точки наикратчайшим образом. Для этого из определения философии обучения с подкрепления мы должны задать ему функцию награды, которая будет выдавать ему награду в виде положительного значения (задача максимизации). Для большего усложнения задачи, можно установить несколько точек которые будут преграждать ему цель. Итого получается две задачи:

1. Задача с одной целью.
2. Задача с множеством целей.

Также для второй задачи можно использовать кубический сплайн для визуализации идеальной траектории между целевыми точками. В текущем подходе используются три компонента функции награды.

Первый компонент, это дистанция агента до цели. Агенту начисляется штраф, равный отрицательному расстоянию до текущей цели. Это побуждает агента минимизировать расстояние до цели. Чем ближе агент к цели, тем меньше штраф, следовательно, тем выше награда (2.1).

$$R_{dist} = -\|position - obstacle\| \quad (2.1)$$

где position – текущая позиция агента, a goal— координаты текущей цели.

Во втором нужно учитывать поведение агента с препятствием. Для нашего эксперимента мы взяли следующие переменные как dist_to_obstacle и penalty_dist_to_obstacle. Первая отвечает за значение расстояния агента с преградой, а вторая за значение, штрафа которое получит агент. Мы присвоим первой переменной значение в 0.2, а второй 10. То есть, если агент приближается к препятствию на расстояние менее 0.2 единицы, он получает штраф в размере 10 единиц. Это предотвращает столкновение с препятствиями, формируя «отталкивающее» поведение (2.2).

$$R_{obst} = \begin{cases} -10, & if\ \|position - obstacle\| < 0.2 \\ 0, & else \end{cases} \quad (2.2)$$

Теперь следует задать награду за достижение цели. Зададим две переменные goal_distance и goal_reward и присвоим им значения 0.1 и 10 соответственно. Так как мы подразумеваем что целей может быть много, стоит заранее задать значение. Это будет означать, что, если агент достигает текущей цели (на расстояние менее 0.1 единицы), он получает награду в 10 единиц. Это стимулирует агента успешно завершать задачи (2.3).

$$R_{goal} = \begin{cases} +10, & if\ \|position - goal\| < 0.1 \\ 0, & else \end{cases} \quad (2.3)$$

Итоговая функция награды выглядит следующим образом (2.4).

$$R_{total} = -\|position - obstacle\| + \sum_{obstacle} R_{obst} + R_{goal} \quad (2.4)$$

Результаты и обсуждение

Обучение производилось в два этапа. Для репрезентативности, у агентов есть лишь 200 эпизодов. Для первого эксперимента у агента лишь одна цель, и его задача, лишь обойдя препятствия достичь цели. Тестирование проходило на видеокарте NVIDIA RTX 4070 с использованием CUDA, тем самым время на обучение заняло около 2-х часов. Из визуализации видно, как первые эпизоды агент пытается понять в какую сторону двигаться и получать положительную награду. Начиная с 60-го эпизода видно, как агенту удается найти идеальную траекторию. На 100-ом эпизоде агент также сохраняет тенденцию идеальной прямой. Однако с 144 по 156-е эпизоды агент пытается найти и другой путь до

цели, однако к итоговому 200-му эпизода он возвращается к прямой траектории (рисунок 1).

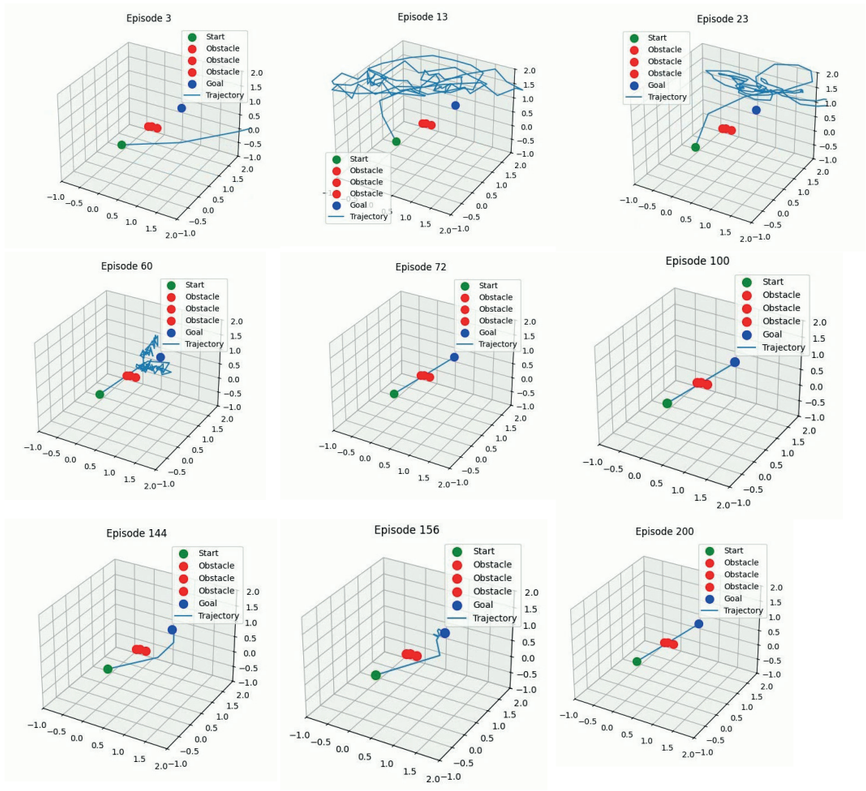


Рисунок 2 – Демонстрация генерация траектории агента для одной целевой точки

Для второго эксперимента было увеличено количества наград, тем самым агенту теперь стоит пройтись по всем целевым точкам. Для простоты визуализации угол обзора был изменен (рисунок 2).

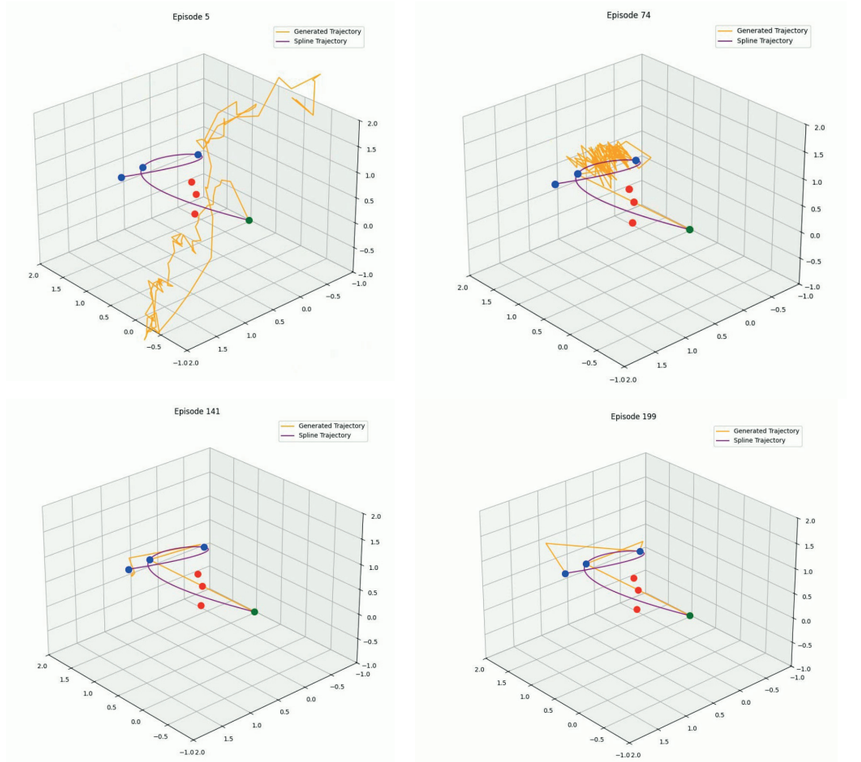


Рисунок 3 – Демонстрация генерация траектории агента для множества целевых точек

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (номер гранта: BR24992947).

Выводы

В данной работе был продемонстрирован алгоритм DDPG и его применение в задаче поиск траектории по целям. Стоит отметить, что полученные результаты являются демонстративными для будущих работ связанными с обучением роботов или отдельных манипуляторов. В ходе эксперимента агент смог достичь одной или множество целей хоть и не всегда по оптимальной траектории. К вниманию также полагается интерпретация результатов: средняя длина траектории уменьшается с увеличением числа эпизодов, среднее время достижения цели также снижается по мере обучения и частота коллизий с преградами практический отсутствует после первых 10 эпизодов. Тем не менее, для повышения производительности необходимо учитывать ограничения метода и адаптировать параметры под

конкретную задачу, а также задавать функцию награды способную пройтись по оптимальной траектории.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Lillicrap, T. P., Hunt, J. J., Pritzel, A., Heess, N., Erez, T., Tassa, Y., Silver, D., Wierstra, D.** Continuous control with deep reinforcement learning [Text] // arXiv preprint arXiv:1509.02971. – 2015. – 20 p.

2 **Duan, Y., Chen, X., Houthooft, R., Schulman, J., Abbeel, P.** Benchmarking deep reinforcement learning for continuous control [Text] // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning (ICML). – 2016. – P. 1329–1338.

3 **Henderson, P., Islam, R., Bachman, P., Pineau, J., Precup, D., Meger, D.** Deep reinforcement learning that matters [Text] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 32. – № 1.

4 **Popov, I., Heess, N., Lillicrap, T., Hafner, R., Barth-Maron, G., Vecerik, M., Riedmiller, M.** Data-efficient deep reinforcement learning for dexterous manipulation [Text] // arXiv preprint arXiv:1704.03073. – 2017. – 13 p.

5 **Gu, S., Holly, E., Lillicrap, T., Levine, S.** Deep reinforcement learning for robotic manipulation with asynchronous off-policy updates [Text] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2017. – P. 3389–3396.

6 **Kiran, B. R., Sobh, I., Talpaert, V., Mannion, P., Al Sallab, A. A., Yogamani, S., Pérez, P.** Deep reinforcement learning for autonomous driving: A survey [Text] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22. – № 6. – P. 3346–3365.

7 **Wei, T., Wang, Y., Zhu, Q.** Deep reinforcement learning for building HVAC control [Text] // Proceedings of the 54th Annual Design Automation Conference (DAC). – 2017. – P. 1–6.

8 **Haarnoja, T., Zhou, A., Abbeel, P., Levine, S.** Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor [Text] // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2018. – P. 1861–1870.

9 **Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., et al.** Human-level control through deep reinforcement learning [Text] // Nature. – 2015. – Vol. 518. – № 7540. – P. 529–533.

10 **Mikheenkov, M. A., Sheshukov, O. Yu., Egiazar'yan, D. K., Nekrasov, I. V., Lobanov, D. A., Zuev, M. V.** Unit ladle-furnace: slag forming conditions and stabilization [Text] // KnE Materials Science. – 2017. – Vol. 2. – № 1. – P. 345–352.

11 **Fischer, T.** Deep reinforcement learning in financial markets [Text] // Bachelor Thesis, University of Mannheim. – 2018. – 35 p.

REFERENCES

1 **Lillicrap, T. P., Hunt, J. J., Pritzel, A., Heess, N., Erez, T., Tassa, Y., Silver, D., Wierstra, D.** Continuous control with deep reinforcement learning [Text] // arXiv preprint arXiv:1509.02971. – 2015. – 20 p.

2 **Duan, Y., Chen, X., Houthooft, R., Schulman, J., Abbeel, P.** Benchmarking deep reinforcement learning for continuous control [Text] // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning (ICML). – 2016. – P. 1329–1338.

3 **Henderson, P., Islam, R., Bachman, P., Pineau, J., Precup, D., Meger, D.** Deep reinforcement learning that matters [Text] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 32. – № 1.

4 **Popov, I., Heess, N., Lillicrap, T., Hafner, R., Barth-Maron, G., Vecerik, M., Riedmiller, M.** Data-efficient deep reinforcement learning for dexterous manipulation [Text] // arXiv preprint arXiv:1704.03073. – 2017. – 13 p.

5 **Gu, S., Holly, E., Lillicrap, T., Levine, S.** Deep reinforcement learning for robotic manipulation with asynchronous off-policy updates [Text] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2017. – P. 3389–3396.

6 **Kiran, B. R., Sobh, I., Talpaert, V., Mannion, P., Al Sallab, A. A., Yogamani, S., Pérez, P.** Deep reinforcement learning for autonomous driving: A survey [Text] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22. – № 6. – P. 3346–3365.

7 **Wei, T., Wang, Y., Zhu, Q.** Deep reinforcement learning for building HVAC control [Text] // Proceedings of the 54th Annual Design Automation Conference (DAC). – 2017. – P. 1–6.

8 **Haarnoja, T., Zhou, A., Abbeel, P., Levine, S.** Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor [Text] // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2018. – P. 1861–1870.

9 **Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., et al.** Human-level control through deep reinforcement learning [Text] // Nature. – 2015. – Vol. 518. – № 7540. – P. 529–533.

10 **Mikheenkov, M. A., Sheshukov, O. Yu., Egiazar'yan, D. K., Nekrasov, I. V., Lobanov, D. A., Zuev, M. V.** Unit ladle-furnace: slag forming conditions and stabilization [Text] // KnE Materials Science. – 2017. – Vol. 2. – № 1. – P. 345–352.

11 **Fischer, T.** Deep reinforcement learning in financial markets [Text] // Bachelor Thesis, University of Mannheim. – 2018. – 35 p.

Поступило в редакцию 23.07.25.
Поступило с исправлениями 30.07.25.
Принято в печать 02.09.25.

***З. З. Момынкулов*[1], *О. М. Олжаев*[2], *А. Т. Турсынова*[3],**
***А. К. Тулешов*[4], *С. М. Ибраев*[5]**
[1,2,3]Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[1,2,3,4,5]Академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
23.07.25 ж. баспаға түсті.
30.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

DDPG КҮШЕЙТУДІ ОҚЫТУ АЛГОРИТМІ АРҚЫЛЫ ОҢТАЙЛЫ ТРАЕКТОРИЯЛАРДЫ ҚҰРУ ЖӘНЕ ГЕНЕРАЦИЯЛАУ

Осы жұмыстың мақсаты – үздіксіз басқару кеңістіктеріндегі тапсырмаларда агенттің траекториясын генерациялау және оңтайландыру үшін Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) тереңдетілген күшейтумен оқыту алгоритмінің тиімділігін зерттеу. Зерттеу шектеулі эпизодтар саны және кедергілер мен бірнеше мақсатты нүктелері бар күрделі тапсырмалар жағдайында DDPG алгоритмінің мүмкіндіктерін көрсетуге бағытталған. Негізгі назар агент пен мақсат арасындағы қашықтықты, кедергілерден жалтаруды және мақсатқа сәтті жетуді ескеретін марапаттау функциясын құруға, сондай-ақ алынған траекторияларды визуализациялауға аударылған.

Зерттеу нәтижесінде DDPG алгоритмін қолдану агентке бейімделе отырып оқуға және бір немесе бірнеше мақсатты сәтті табуға мүмкіндік беретіні көрсетілді, сонымен қатар тиімді траекторияларды қалыптастыру қабілеті дәлелденді. Агенттің тапсырма шарттарының өзгеруіне тұрақты реакциясы мен кедергілерден жалтару қабілетінің жоғары деңгейде екені байқалады. Эпизодтар саны шектеулі болса да, агент көп жағдайда мақсатқа тұрақты түрде жетіп отырады.

Нәтижелер DDPG алгоритмінің траекторияны жоспарлау мен басқару тапсырмаларында, соның ішінде робототехникалық қолданбаларда болашағы зор екенін растайды. Алдағы зерттеулер ортаны кеңейтуге, мақсаттар санын көбейтуге және күрделірек марапаттау функцияларын енгізуге бағытталуы мүмкін.

Кілтті сөздер: күшейтумен оқыту, DDPG, траектория генерациясы, марапаттау функциясы, үздіксіз кеңістік, робототехника, навигация, қозғалысты жоспарлау.

***Z. Z. Momynkulov*[1], *O. M. Olzhayev*[2], *A. T. Tursynova*[3],**
***A. K. Tuleshov*[4], *S. M. Ibrayev*[5]**
[1,2,3]International IT University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[1,2,3,4,5]Institute of Mechanics and Engineering named after Academician U. A. Dzholdasbekova, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 23.07.25.
Received in revised form 30.07.25.
Accepted for publication 02.09.25.

CONSTRUCTION AND GENERATION OF OPTIMAL TRAJECTORIES USING THE DDPG REINFORCEMENT LEARNING ALGORITHM

The aim of this study is to investigate the effectiveness of the Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) reinforcement learning algorithm for generating and optimizing agent trajectories in tasks with continuous control spaces.

The research focuses on demonstrating the capabilities of DDPG under a limited number of episodes and in complex environments with obstacles and multiple target points. Particular attention is given to the design of the reward function, which accounts for the distance to the target, obstacle avoidance, and successful goal achievement, as well as the visualization of the generated trajectories.

It is shown that the application of the DDPG algorithm enables the agent to adaptively learn and successfully reach both single and multiple targets while forming efficient trajectories. The agent exhibits stable behavior in response to changes in task conditions and demonstrates a high ability to avoid obstacles. Despite the limited number of episodes, the agent is able to consistently reach goals along near-optimal paths in most cases.

The results confirm the potential of using DDPG in trajectory planning and control tasks, including applications in robotics. Further research may focus on expanding the environment, increasing the number of targets, and introducing more complex reward functions.

Keywords: reinforcement learning, DDPG, trajectory generation, reward function, continuous space, robotics, navigation, motion planning.

SRSTI 55.01.11

https://doi.org/10.48081/YLCD8197

***Z. K. Musina[1], **M. Z. Aubakirova[2], L. R. Musina[3], N. K. Tursunov[4]**

[1,2,3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

[4]Tashkent State Transport University, Republic of Uzbekistan, Tashkent.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2233-4947

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3676-6638

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0243-8826

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7910-3980

*e-mail: mussina_zhanara@mail.ru

**e-mail: malika.kanatova.03@bk.ru

CONCEPTUAL APPROACHES TO IMPROVING THE SYSTEM OF CERTIFICATION OF THE ORIGIN OF GOODS AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES IN THE PAVLODAR REGION: BARRIERS, CHALLENGES, AND DEVELOPMENT PROSPECTS

The article analyses the impact of origin certification on the export activity and competitiveness of Kazakhstani machine-building enterprises in the Pavlodar region.

Based on an online survey of representatives from 16 enterprises, it was found that most of them recognise the strategic role of confirming the origin of machine parts and components. Certification is used to strengthen trust on the part of foreign partners, simplify customs procedures and expand participation in international tenders.

At the same time, systemic problems have been identified that are related not only to administrative barriers, but also to the need to increase the transparency and traceability of engineering and technical products. It is noted that the origin of the materials used directly affects the quality and safety of the final machine-building structures, and traditional paper certificates are losing credibility in the global market.

Based on the data obtained, measures have been proposed to modernise the mechanisms for certifying origin, which will reduce the administrative burden and turn this process into a tool for increasing the competitiveness of domestic manufacturers of machine-building products in foreign markets.

Keywords: certification, origin, export, mechanical engineering, traceability, technical goods, trade barriers.

Introduction

In the context of international trade, one of the key concepts is «country of origin of goods», defined by the Ministry of Trade and Integration of the Republic of Kazakhstan as «the country in which the goods were wholly produced or sufficiently processed or transformed». Accordingly, certification of origin is the process of confirming the country of origin, during which the competent authority certifies that the goods meet the established criteria [1; 2].

The main document in this process is the certificate of origin, which certifies that the products are manufactured in the territory of a specific state and also serves as the basis for obtaining preferential terms under preferential trade agreements and minimising risks when crossing customs borders [3]. For technologically complex and responsible industries such as mechanical engineering [4], the concept of 'origin' goes far beyond a formal geographical characteristic. It becomes synonymous with quality, reliability and, most importantly, the safety of the final product. Engineering products – from automotive components to complex industrial equipment – consist of hundreds and thousands of parts, the failure of any of which can lead to catastrophic consequences. In this context, the origin of raw materials, materials and components directly determines the performance and durability of the product.

In the present day, traditional paper certificates are increasingly proving insufficient for building trust with international partners. The complexity and multi-level nature of supply chains, as well as the sophistication of counterfeit manufacturers' methods, lead to a 'crisis of confidence' where buyers demand not just a document, but verifiable, data-based confirmation of the entire history of the product. This means that Kazakhstani exporters need to move from a document-centric model of verification to a data-centric one, where origin is proven not by paper but by irrefutable digital data, which is why this study is so relevant.

Materials and methods

A sociological survey methodology was chosen for the study, as it allows for the collection of generalised and structured data directly from economic entities. The study was applied and empirical in nature, with the aim of establishing real correlations between the use of certificates of origin and indicators of export activity and competitiveness of manufacturing enterprises.

The survey was conducted in electronic format using the Google Forms platform. A link to the survey was sent by email to enterprises operating in the field of production and sale of goods, and was also provided in specialised WhatsApp groups. The data collection period was from May to June 2025.

Sixteen enterprises from the Pavlodar region took part in the survey, the main activities of which are shown in Figure 1. The dominant industry in this survey is mechanical engineering, accounting for 47 % of the total number of respondents (figure 1).

The machine-building sector in the Pavlodar region includes the production of railway wheel sets, metal structures, rolled pipes, cables, spare parts for agricultural machinery, and car wheels. Key enterprises include «Prommashkomplekt», «KSP Steel», «Imstalcon», and «Kazenergokabel». The industry plays an important role in the region›s industrial structure, supplying the domestic market and supporting exports.

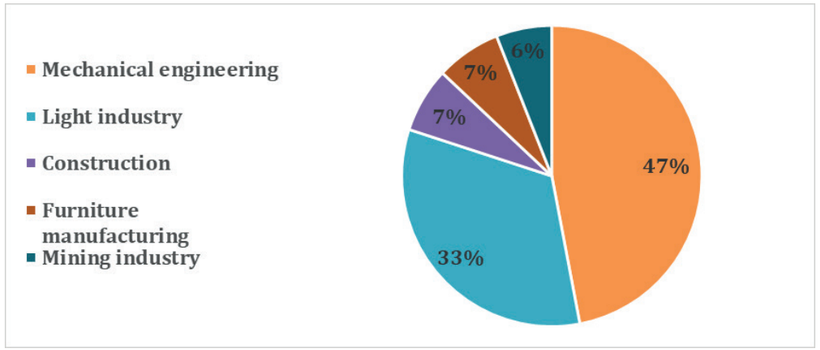


Figure 1 – Main activities of respondents who participated in the survey

The questionnaire included 14 questions, both closed and open-ended. The questions were grouped into the following thematic blocks (Figure 2):

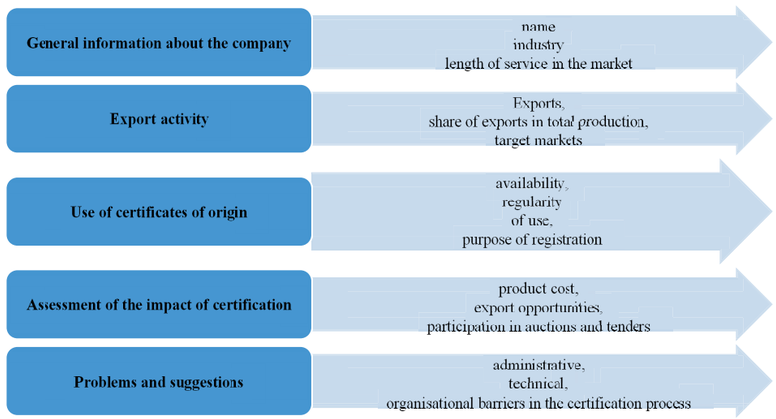


Figure 2 – Survey blocks of the study

After data collection was completed, the data was exported to Excel and subjected to sequential processing.

Frequency analysis using standard Microsoft Excel functions was applied to analyse closed questions, which allowed dominant trends to be identified. Thematic coding was used to analyse open questions, where respondents provided free-form answers. This qualitative analysis allowed hidden problems to be identified and specific recommendations to be formulated based on the opinions of business representatives.

Results and discussion

One of the key factors influencing strategic decisions of enterprises, including entering foreign markets and preparing product documentation, is the length of time that respondent enterprises have been in business (Figure 3).

Analysis of the data showed that more than 60 % of the enterprises surveyed have been operating in the market for over 10 years, which indicates the maturity of the sample and the respondents' considerable practical experience in the field of production and export activities. This creates a solid basis for a reliable analysis of the impact of certification of origin.

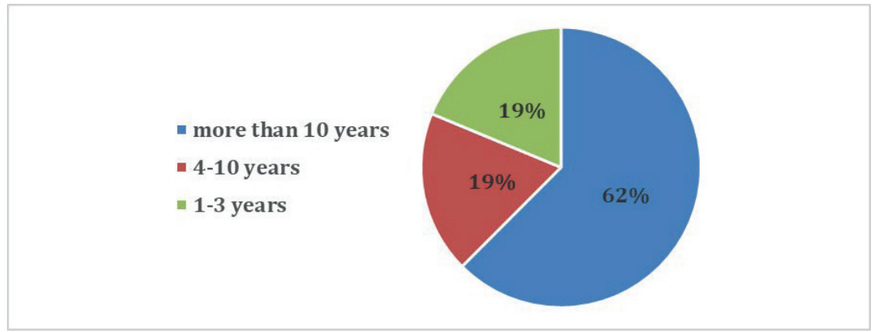


Figure 3 – Activity duration of respondents' companies

A study of the practice of issuing certificates of origin revealed a high degree of involvement of enterprises in this process (Figure 4). The vast majority of respondents (81,30 %) use certification regularly or occasionally, which confirms its demand in export-oriented activities. It is important to note that none of the surveyed enterprises completely rejected the expediency of certification, which indicates a high level of business awareness of its importance in the modern foreign economic environment. This demonstrates that certification of origin has become firmly established in the business practices of most companies and is an indicator of business maturity.

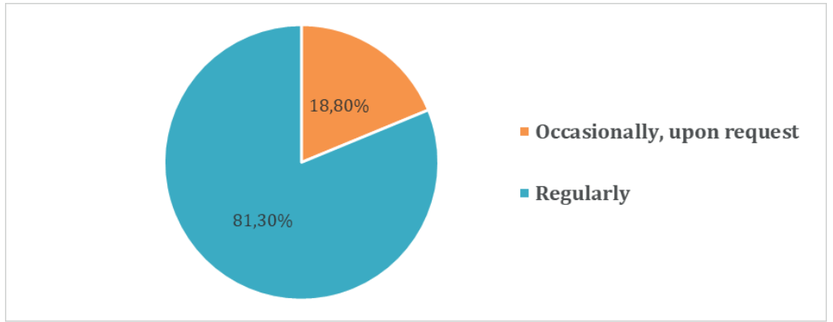


Figure 4 – Degree of involvement in product origin certification

The certificate of origin plays a multifunctional role in the foreign economic activity system [3].

An analysis of the reasons for obtaining the certificate showed that the main incentive is foreign economic activity. The main reasons cited were «simplification of customs procedures for exports and requirements of foreign partners». At the same time, a significant proportion of enterprises (more than 40 %) use certificates to participate in domestic tenders and public procurement, as well as a marketing tool to confirm the Kazakh origin of goods (Figure 5).

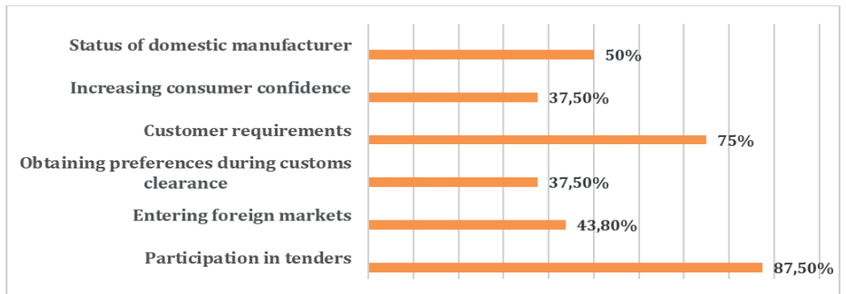


Figure 5 – Objectives of obtaining a certificate of origin for goods

The main export destination for the surveyed enterprises is the Eurasian Economic Union market, which is explained by the absence of customs barriers and close economic ties (Table 1).

Table 1 – Product realisation structure

Geographical market	Number of mentions	Note
Domestic market	13	Base market
Eurasian Economic Union	9	Main external direction
European Union	2	A relatively rare direction

At the same time, almost half of respondents (43,75 %) operate primarily in the domestic market, while 56,25 % engage in export deliveries (Table 2). Of these, one-third of companies export significant volumes (more than 75 % of production), which highlights the presence of competitive industries in the region that are focused on foreign markets (Table 2).

Table 2 – Distribution of enterprises by share of exports to foreign markets

Category by share of external supplies	Number of enterprises	Percentage of total
Not available for international delivery	7	43,75
Up to 25 % of production goes abroad	2	12,50
25–50 %	1	6,25
50–75 %	1	6,25
Over 75 %	5	31,25

According to the results obtained, 5 out of 16 surveyed enterprises (31,25 %) noted that the availability of a certificate allowed them to significantly increase their export volume (by more than 50 %), and another 4 enterprises (25 %) reported a moderate increase in export deliveries within the range of 10-50 %. In addition, 2 respondents (12,5 %) indicated a slight increase in exports (less than 10 %) (Figure 6).

At the same time, 5 enterprises (31 %) noted that they do not export and, accordingly, did not record any impact of certification on external sales volumes.

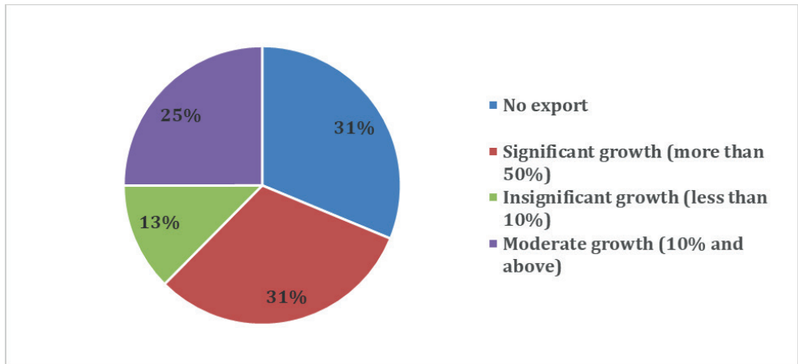


Figure 6 – Impact of certificates of origin on export volumes (based on companies' self-assessment)

Despite recognition of the importance of certification, analysis of respondents' open answers revealed a number of systemic barriers that reduce the effectiveness of this procedure. These problems can be viewed not as isolated administrative shortcomings, but as symptoms of an outdated, document-oriented system that struggles to cope with the complexity of modern production processes.

The most frequently mentioned problem was excessive bureaucracy and excessive documentation requirements. Respondents noted: «We would like to see fewer requirements for raw materials and supply contracts« and «Reduce the amount of documentation required and speed up the process». This indicates that the process of collecting and providing proof of origin – the list of documentation approved by Order № 257 of the Deputy Prime Minister of Industry and New Technologies of the Republic of Kazakhstan dated as of July 8 2014 year «On the approval of the list of documents confirming the origin of goods», is labor-intensive and resource-intensive, especially for small and medium-sized enterprises.

The second significant problem was the uncertainty and inflexibility of the criteria for origin [5]. One of the survey participants pointed out: «The criteria of origin for a number of products need to be specified. Many criteria are not adapted to the characteristics of the products and the production process itself». This is particularly relevant for mechanical engineering, where the final product may consist of components

manufactured in different countries, which complicates the application of the ‘sufficient processing’ rule.

The third problem that creates practical difficulties for businesses is the inconsistency of the codes in the Commodity Nomenclature for Foreign Economic Activity (CN FEA). Companies are faced with a situation where certification bodies and public procurement platforms use different codes for the same products.

Some enterprises have pointed out problems related to discrepancies in the HS codes used by different certification bodies and the public procurement platform, as follows: «Different certification bodies and public procurement platforms assign different HS codes... This leads to discrepancies and further difficulties when participating in public procurement».

Respondent enterprises in the machine-building industry identified this problem as fundamental to the current product certification mechanisms.

Table 3 shows cases of inconsistency in HS codes in the machine-building industry. Such situations often arise precisely because of the complex classification of equipment and spare parts, which leads to problems with the export of Kazakhstani machine-building products outside Kazakhstan.

Table 3 – Examples from mechanical engineering

Goods	Possible options for the HS code (at the 4-digit level)
Rolling bearings	8482 (bearings) 8708 (parts of machines)
Crane gearbox	8483 (gearboxes) 8428 (part of lifting equipment)
Electric motors for pumps	8501 (electric motors) 8413 (parts of pumps)
Hydraulic cylinders	8412 (other engines and motors) 8431 (parts of construction machinery)

The fourth problem is insufficient digitalisation of the industry. Foreign customers increasingly prefer suppliers who can provide not just a certificate, but access to the digital history of the product [6]. The inability to meet this demand automatically reduces the competitiveness of Kazakhstani manufacturers, limiting their access to high-margin markets in Europe and developed Asian countries and forcing them to compete mainly on price in markets with less stringent requirements. This, in turn, hinders the technological development of the industry and limits its export potential.

According to the survey results, small business representatives expressed scepticism about the real benefits of certification, with the exception of formal access to public procurement. The phrases «The current rules are useful for large businesses, but do not offer any obvious advantages for small businesses» and «In essence, we obtain certification because it is necessary. We don’t see any particular advantages» point to a gap between the stated goals of the system and its practical value for small companies. This suggests that the current administrative costs for small and medium-sized businesses may outweigh the benefits.

However, despite the above-mentioned problems with the current mechanism for determining the country of origin of goods and the certificate, most enterprises (12 out of 14, or 86 %) consider the certificate of origin to be highly or significantly important for the development of foreign economic activity (Figure 7).

This indicates that the certificate is recognised as a key tool for entering foreign markets, obtaining preferences under agreements, and participating in tenders and public procurement. Only two enterprises (14 %) gave a rating below 4, which may indicate a specific industry focus and orientation towards the domestic market.

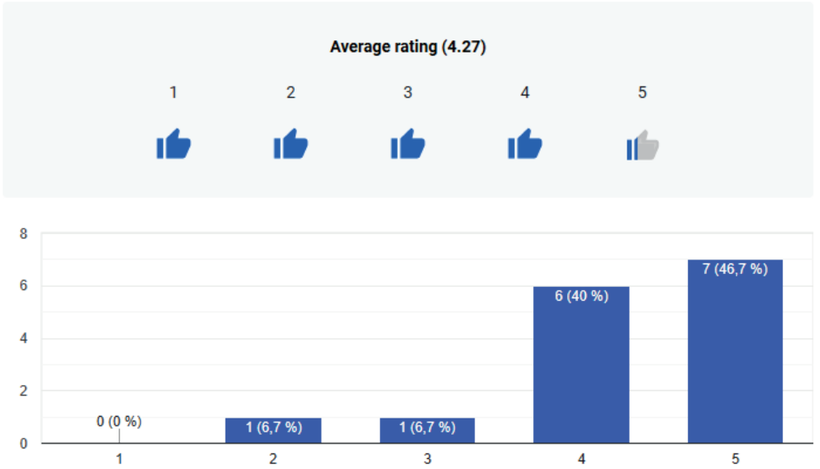


Figure 7 – Respondents’ opinion on the importance of certificates of origin in export activities

The problems identified in the survey – bureaucracy, unclear criteria, discrepancies in codes and low value for small and medium-sized businesses – are the result of a fundamental flaw in the existing system: its reliance on paper documents and manual verification [7]. An effective response to these systemic challenges could be a transition to a model of technological assurance, which replaces stacks of paper with verifiable digital data. This approach includes several key elements proposed by the author:

1) Traceability of parts using serialisation. The introduction of tracking systems at the level of individual components using unique identifiers (barcodes, QR codes or RFID tags) makes it possible to create a digital ‘passport’ for each unit of production [8]. Serialisation makes it possible to track the path of each part from the supplier to its installation in the final product, automatically forming an irrefutable evidence base about its origin and history. This not only simplifies the confirmation of origin for external bodies, but also provides the enterprise itself with a powerful tool for quality control and product recall management [9, 10].

2) Control of input materials and supplier certification. Technological assurance of reliability involves shifting the focus from checking product documentation to checking the quality systems of the suppliers themselves [11]. Similar to the automotive industry, where manufacturers require their suppliers to comply with strict standards such as IATF 16949, Kazakhstani enterprises can implement audit and certification systems for their partners in the supply chain. This ensures that not only the final product, but also all its components are manufactured under controlled conditions, which automatically confirms their quality and origin. The key aspects of this solution are the identification of characteristics that distinguish different sources of origin, a database of these characteristics from reliable reference samples, and a data evaluation strategy adopted for the intended application scenario [12].

3) Integration of metrological calibration with the origin system. The reliability of origin is closely linked to the reliability of quality. One practical example of technological integration is the linking of data on metrological verification and calibration of measuring equipment with production batches through enterprise resource planning (ERP) systems [13].

When an ERP system records that a specific production batch was manufactured and inspected using equipment that has been calibrated in a timely manner, this creates an additional layer of digital evidence of the product's compliance with the declared specifications. Such integration transforms disparate quality data into a unified, traceable product history [14].

The implementation of such technological solutions can radically change the perception of certification. For small and medium-sized businesses, which currently see it as nothing more than a costly obligation, it becomes a tool for improving internal efficiency. Investments in traceability and digitalisation pay off by reducing defects, optimising inventory, reducing waste and increasing productivity. Thus, certification of origin ceases to be an expense for compliance and becomes a driver for creating additional value.

Conclusions

The results of a survey of 16 Kazakhstani enterprises showed that more than 85 % of respondents consider a certificate of origin to be a necessary condition for entering export markets and participating in international tenders. However, 63 % of enterprises noted that the process of obtaining it remains overly bureaucratic and costly, and more than 40 % reported inconsistencies between national and international criteria of origin.

The main problems were:

a) the complexity of confirming the origin of components in multi-stage supply chains;

b) duplication of procedures between certification bodies and customs;

c) lack of a unified digital database of certified suppliers.

To address these issues, a transition from a paper-based to a digital approach to confirming the origin of goods is necessary. Practical areas for modernisation include:

a) Creation of a unified national digital platform for certification of origin, linked to the databases of the Customs Union and the Ministry of National Economy of the

Republic of Kazakhstan. This will reduce processing times by 30-40 % and eliminate duplication of documents.

b) Integration of certification requirements into the quality management system of enterprises so that data on origin is automatically generated during internal quality control.

c) Introduction of traceability based on QR codes or RFID tags, ensuring verification of the origin of each component or part.

d) Simplification of procedures for small and medium-sized businesses, including standard forms of proof of origin and the possibility of electronic self-declaration at low risk.

The implementation of these measures will make it possible to:

a) reduce the administrative costs of certification for enterprises by an average of up to 25 %;

b) increase the confidence of foreign partners and access to export markets;

c) transform certification of origin from a formal requirement into a tool for increasing the transparency and competitiveness of products.

Certification of origin should therefore be viewed not as a bureaucratic obligation, but as an element of Kazakhstan's industrial policy aimed at supporting exporters, developing mechanical engineering and integrating into global supply chains.

REFERENCES

1 Республика Казахстан. Послание Президента. Выступление Главы государства Касым-Жомарта Токаева на расширенном совещании по вопросам социально-экономического развития страны. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.akorda.kz/ru/vystuplenie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-na-rasshirennom-zasedanii-pravitelstva-2801458 (дата обращения: 19.04. 2023].

2 Республика Казахстан. Приказы. Приказ Министра торговли и интеграции Республики Казахстан от 13 июля 2021 года № 454-НҚ «Об утверждении Правил по определению страны происхождения товара, статуса товара Евразийского экономического союза или иностранного товара, выдаче сертификата о происхождении товара и отмене его действия, установлении форм сертификата по определению страны происхождения товара» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 28.04.2024 г.) // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100023514 (дата обращения: 29.10.2025).

3 **Аубакирова, М. Ж., Мусина, Ж. К., Сапинов, Р. В., Мусина, Л. Р.** Актуальные проблемы идентификации страны происхождения товара / М. Ж. Аубакирова, Ж. К. Мусина, Р. В. Сапинов, Л. Р. Мусина // Материалы международной научной конференции «XXV Сатпаевские чтения», посвящённая 65-летию Торайгыров университета. – Павлодар: Торайгыров университет, 2025. – Т. 15. – 2025. – С. 405–412.

4 **Шумейко, И. А., Касенов, А. Ж., Абишев, К. К.** Роль машиностроения и особенности развития отрасли в Казахстане / И. А. Шумейко, А. Ж. Касенов, К. К. Абишев // Наука и Техника Казахстана. – 2019. – № 4. – С. 81–88.

5 Отчет Евразийской экономической комиссии за 2020-2023 годы. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/807/EEC-Book-2020_2023.pdf) (дата обращения: 10.06.2025).

6 **Qianxiao, Z., Yixue, D.** How Digitalization Shapes Export Product Quality: Evidence from China / Q. Zhang, Y. Duan // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – Iss. 8. – Art. 6376. – https://doi.org/10.3390/su15086376.

7 **Абдикаримова, С., Кузембаева, А.** Время говорить Atameken Business. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=-VbWF-xuAuQ). (дата обращения: 16.06.2025).

8 **Триполева, Д. В.** Современные методы поддержки принятия решений в управлении товарными запасами с применением RFID-технологий / Д. В. Триполева // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2025. – Т. 27. – № 4 – С. 35–54

9 Study on the Digitalization of the Certificate of Origin / World Customs Organization. – June 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wcoomd.org (дата обращения: 11.11.2025).

10 **Dietrich, V., Melcher, F.** Mineral Raw Material Supply Chain Transparency and Traceability: Does Provenance Matter in the Supply Chain?/ D. Valentina, M. Frank// BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. – 2022. – № 12. – P. 594–597. – https://doi.org/10.1007/s00501-022-01274-8.

11 **Сироткин, А. А., Четверов, Д. А.** Обзор логистических онлайн-платформ / А. А. Сироткин, Д. А. Четверов // Транспорт и логистика : актуальные вопросы, проектные решения и инновационные достижения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Красноярск, 22 октября 2021 г.). – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. – С. 84–87.

12 **Melcher, F., Dietrich, V., Gäbler, H.-E.** Analytical Proof of Origin for Raw Materials // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – № 5 – Art. 461. – https://doi.org/10.3390/min11050461.

13 **Журавлева, О. В.** Обзор рынка ERP-систем и возможностей программ / О. В. Журавлева // Стратегия устойчивого развития и экономическая безопасность страны, региона, хозяйствующих субъектов : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 25 ноября 2021 г.). – Барнаул: Изд-во Алтайского филиала Финуниверситета, 2021. – С. 17–19.

14 **Arnold, M., Bellamy, R. K. E., Hind, M.** FactSheets: Increasing Trust in AI Services through Supplier's Declarations of Conformity/ Arnold M., Bellamy R. K. E., Hind M., Houde S., Mojsilović A., Nair R., Ramamurthy K. N., Olteanu A., Varshney K. R. // IBM Journal of Research and Development. – 2019 – Vol. 63. – №4/5 – P. 1-13 – https://doi.org/10.1147/JRD.2019.2942288.

REFERENCES

1 Respublika Kazakhstan. Vy`stuplenie Glavy` gosudarstva Kasy`m-Zhomarta Tokaeva na rasshirennom soveshhanii po voprosam social`no-e`konomicheskogo razvitiya strany`. [Speech by President Kassym-Jomart Tokayev at an expanded meeting on the socio-economic development of the country] – [Electronic resource]. – Available at: https://www.akorda.kz/ru/vystuplenie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-na-rasshirennom-zasedanii-pravitelstva-2801458 (Accessed: 19.04. 2023].

2 Respublika Kazakhstan. Prikazy`. Prikaz Ministra torgovli i integracii Respubliki Kazaxstan ot 13 iyulya 2021 goda № 454-NQ «Ob utverzhdenii Pravil po opredeleniyu strany` proisxozhdeniya tovara, statusa tovara Evrazijskogo e`konomicheskogo soyuza ili inostrannogo tovara, vy`dache sertifikata o proisxozhdenii tovara i otmene ego dejstviya, ustanovlenii form sertifikata po opredeleniyu strany` proisxozhdeniya tovara» (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 28.04.2024 g.) [On approval of the Rules for determining the country of origin of goods, the status of goods of the Eurasian Economic Union or a foreign product, the issuance of a certificate of origin and the cancellation of its validity, the establishment of forms of a certificate for determining the country of origin of goods] // Informacionno-pravovaya sistema normativny`x pravovy`x aktov Respubliki Kazaxstan «Ədilet». – [Electronic resource]. – Available at: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100023514 (Accessed: 29.10.2025).

3 **Aubakirova, M. Zh., Musina, Zh. K., Sapinov, R. V., Musina, L. R.** Aktual`ny`e problemy` identifikacii strany` proisxozhdeniya tovara [Actual problems of identification of the country of origin of goods] / M. Zh. Aubakirova, Zh. K. Musina, R. V. Sapinov, L. R. Musina // Materialy` mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «XXV Satpaevskie chteniya», posvyashhyonnaya 65-letiyu Torajgy`rov universiteta. – Pavlodar: Torajgy`rov universitet, 2025. – T. 15. – 2025. – P. 405–412

4 **Shumejko, I. A., Kasenov, A. Zh., Abishev, K. K.** Rol` mashinostroeniya i osobennosti razvitiya otrasli v Kazaxstane [The role of mechanical engineering and the specifics of the industry's development in Kazakhstan] / I. A. Shumejko, A. Zh. Kasenov, K. K. Abishev // Nauka i Texnika Kazaxstana. – 2019. – № 4. – P. 81–88.

5 Otchet Evrazijskoj e`konomicheskoj komissii za 2020-2023 gody` [Report of the Eurasian Economic Commission for 2020-2023] – [Electronic resource]. – Available at: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/807/EEC-Book-2020_2023.pdf) (Accessed: 10.06.2025).

6 **Qianxiao, Z., Yixue, D.** How Digitalization Shapes Export Product Quality: Evidence from China / Q. Zhang, Y. Duan // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – Iss. 8. – Art. 6376. – https://doi.org/10.3390/su15086376.

7 **Abdikarimova, S., Kuzembaeva, A.** Vremya govorit` Atameken Business [Time to Talk Atameken Business] [Electronic resource]. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=-VbWF-xuAuQ). (Accessed: 16.06.2025).

8 **Tripoleva, D. V.** Sovremenny`e metody` podderzhki prinyatiya reshenij v upravlenii tovarny`mi zapasami s primeneniem RFID-texnologij [Modern methods of decision support in inventory management using RFID technologies] / D. V. Tripoleva // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN. – 2025. – T. 27. – № 4. – P. 35–54.

9 Study on the Digitalization of the Certificate of Origin / World Customs Organization. – June 2024. – [Electronic resource]. – https://www.wcoomd.org (дата обращения: 11.11.2025).

10 **Dietrich, V., Melcher, F.** Mineral Raw Material Supply Chain Transparency and Traceability: Does Provenance Matter in the Supply Chain?/ D. Valentina, M. Frank// BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. – 2022. – № 12. – P. 594–597. – https://doi.org/10.1007/s00501-022-01274-8.

11 **Sirotkin, A. A., Chetverov, D. A.** Obzor logisticheskix onlajn-platform [Overview of online logistics platforms] / A. A. Sirotkin, D. A. Chetverov // Transport i logistika: aktual`ny`e voprosy`, proektny`e resheniya i innovacionny`e dostizheniya : materialy` Vseros. nauch.-prakt. konf. (Krasnoyarsk, 22 oktyabrya 2021 g.). – Krasnoyarsk : SibGU im. M. F. Reshetneva, 2021. – P. 84–87.

12 **Melcher, F., Dietrich, V., Gäbler, H.-E.** Analytical Proof of Origin for Raw Materials // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – № 5 – Art. 461. – https://doi.org/10.3390/min11050461.

13 **Zhuravleva, O. V.** Obzor ry`nka ERP-sistem i vozmozhnostej program [Overview of the ERP systems market and software features] / O. V. Zhuravleva // Strategiya ustojchivogo razvitiya i e`konomicheskaya bezopasnost` strany`, regiona, xozyajstvuyushhix sub``ektov : materialy` XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Barnaul, 25 noyabrya 2021 g.). – Barnaul : Izd-vo Altajskogo filiala Finuniversiteta, 2021. – P. 17–19.

14 **Arnold, M., Bellamy, R. K. E., Hind, M.** FactSheets: Increasing Trust in AI Services through Supplier's Declarations of Conformity/ Arnold M., Bellamy R. K. E., Hind M., Houde S., Mojsilović A., Nair R., Ramamurthy K. N., Olteanu A., Varshney K. R. // IBM Journal of Research and Development. – 2019 – Vol. 63. – №4/5 – P. 1–13. – https://doi.org/10.1147/JRD.2019.2942288.

Received 26.10.25.
Received in revised form 30.10.25.
Accepted for publication 17.11.25.

***Ж. К. Мусина[1], *М. Ж. Аубакирова[2], Л. Р. Мусина[3], Н. К. Турсынов[4]**
[1,2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[4]Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ.
26.10.25 ж. баспаға түсті.
30.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
17.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ПАВЛОДАР ОБЛЫСЫНЫҢ МАШИНА ЖАСАУ КӘСІПОРЫНДАРЫНДА ТАУАРДЫҢ ШЫҒУ ТЕГІН СЕРТИФИКАТТАУ ЖҮЙЕСІН ЖЕТІЛДІРУДІҢ ТҰЖЫРЫМДАМАЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІ: КЕДЕРГІЛЕР, СЫН-ТЕГЕУРІНДЕР ЖӘНЕ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Мақалада Павлодар облысының Қазақстандық машина жасау кәсіпорындарының экспорттық қызметі мен бәсекеге қабілеттілігіне шығу тегі сертификаттауының әсері талданады.

16 кәсіпорын өкілдерінің онлайн-сауалнамасы негізінде олардың көпшілігі машина жасау өнімдерінің шығу тегін растаудың стратегиялық рөлін мойындайтыны анықталды. Сертификаттау шетелдік серіктестердің сенімін нығайту, кедендік рәсімдерді жеңілдету және халықаралық тендерлерге қатысуды кеңейту үшін қолданылады.

Әкімшілік кедергілерге және машина жасау өнімдерінің ашықтығы мен қадағалануын арттыру қажеттілігіне байланысты жүйелік проблемалар анықталды. Қолданылатын материалдардың шығу тегі түпкілікті машина жасау құрылымдарының сапасы мен қауіпсіздігіне тікелей әсер етеді, ал дәстүрлі қағаз сертификаттары әлемдік нарықта сенімін жоғалтады.

Алынған мәліметтер негізінде әкімшілік жүктемені азайтуға және қолданыстағы процесті сыртқы нарықтарда отандық машина жасау өнімдерін өндірушілердің бәсекеге қабілеттілігін арттыру құралына айналдыруға мүмкіндік беретін шығу тегін сертификаттау тетіктерін жаңғырту бойынша шаралар ұсынылды.

Кілтті сөздер: сертификаттау, шығу тегі, экспорты, машина жасау, қадағалау, техникалық тауарлар, сауда кедергілері.

***Ж. К. Мусина[1], *М. Ж. Аубакирова[2], Л. Р. Мусина[3], Н. К. Турсынов[4]**
[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[4]Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМЫ СЕРТИФИКАЦИИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ТОВАРА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПАВЛОДАРСКОЙ ОБЛАСТИ: БАРЬЕРЫ, ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В статье анализируется влияние сертификации происхождения на экспортную деятельность и конкурентоспособность казахстанских машиностроительных предприятий Павлодарской области.

На основе онлайн-опроса представителей 16 предприятий было установлено, что большинство из них признают стратегическую роль подтверждения происхождения машиностроительной продукции. Сертификация используется для укрепления доверия со стороны иностранных партнеров, упрощения таможенных процедур и расширения участия в международных тендерах.

Выявлены системные проблемы, связанные с административными барьерами и с необходимостью повышения прозрачности и отслеживаемости машиностроительной продукции. Отмечается, что происхождение используемых материалов напрямую влияет на качество и безопасность конечных машиностроительных конструкций, а традиционные бумажные сертификаты теряют доверие на мировом рынке.

На основе полученных данных предложены меры по модернизации механизмов сертификации происхождения, которые позволят снизить административную нагрузку и преобразовать действующий процесс в инструмент повышения конкурентоспособности отечественных производителей машиностроительной продукции на внешних рынках.

Ключевые слова: сертификация, происхождение, экспорт, машиностроение, прослеживаемость, технические товары, торговые барьеры.

МРНТИ 55.24.99
https://doi.org/10.48081/POGA9794

Б. Мырзахмет[1], *К. Т. Шеров[2], С. Ш. Магавин[3], А. А. Сагитов[4], А. К. Шеров[5]
[1,2,3,4,5]С. Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7311-4776
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0209-180X
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0920-1442
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3835-9353
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1433-957X
*e-mail: shkt1965@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НАСОСА ШЕСТЕРЕННОГО СНАБЖЕННОГО С РАЗЖИМНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Известно, что самым распространённым видом гидравлических машин в условиях отечественного машиностроения является насосы шестеренные (НШ). Были выявлены, что существует проблема обеспечения качества изготовления НШ, в результате чего НШ не всегда обеспечивают требуемую мощность, и рабочие органы НШ изнашиваются довольно быстро, который приводит к недопустимому возрастанию утечек и падению объемного КПД.

Для решения этих проблем проводится научные исследования направленные на совершенствование конструкции НШ. В данной статье приводятся результаты исследования новой конструкции НШ с двухосным соединением с разжимными элементами изготовленными из резиновой смеси. Экспериментальные исследования технических параметров НШ с двухосным соединением проводились на специальном стенде монтированном на базе токарного станка. Измерение температуры масла осуществлялось с помощью термометра для измерения температуры масла. Для изготовления разжимного элемента в виде твердого тела использовалась сырая резиновая смесь 7-В 14.

Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением оборотов вращения вала у НШ с двухосным соединением производительность возрастает но при этом резкое повышение температуры нагрева масла не наблюдается. Полученные значения рабочего давления, создаваемого в предлагаемой конструкции насоса НШ с двухосным соединением с разжимными элементами при различных положениях задвижки показали, что их величина совпадает с величиной рабочего давления стандартного НШ.

Ключевые слова: насос шестеренный, опорные втулки, двухосное соединение, разжимный элемент, производительность, температура, резиновая смесь.

Введение

В различных отраслях машиностроения, в частности в сельскохозяйственном машиностроении, наряду с другими типами гидравлических насосов широко применяются шестеренные насосы (НШ). В значительной мере этому способствует эксплуатационная надежность НШ, невысокая требовательность в отношении ухода за ними, простота реверсирования, компактность, малый вес и небольшая стоимость, что выгодно отличает их от других типов объемных гидронасосов [1, 35 с; 2, 80 с; 3, 19–20 с; 4, 29 с; 5, 57 с].

Однако в ряде случаев дальнейшее расширение области использования НШ встречает серьезные затруднения. Не найдены еще достаточно удовлетворительные конструктивные решения, отвечающие конкретным требованиям и условиям эксплуатации в приводах сельскохозяйственных машин.

Отличительной особенностью насосов типа НШ является то, что внутри корпуса насоса четыре опорные втулки и две вал-шестерни не имеют фиксированного относительно корпуса насоса положений [5, 35 с; 6, 18 с; 7, 44 с; 8, 25 с]. Все упомянутые детали монтируются один относительно другого с гарантированным зазором. То есть вал-шестерня, устанавливаемый на опорных втулках, в сборе установлен в корпусе насоса с гарантированными зазорами [9, 78 с; 10, 118 с; 11, 67 с; 12, 157 с; 13, 59 с; 14,32 с; 15, 101 с].

В процессе работы насоса шестеренного между деталями возникают контактные усилия взаимодействия, что приводит к относительным движениям всех деталей внутри корпуса насоса в пределах зазоров в соединениях. Предусмотреть величину и направление относительных перемещений внутри насоса НШ практически весьма сложно. Влияние относительных смещений можно определить косвенно по таким из показателей как шум работы насоса, температура нагрева корпуса насоса, износ сопрягаемых деталей и др. превышение допускаемых величин по каждому из показателей является не желательным. На основании допусков и отклонений размеров контактируемых поверхностей корпуса насоса, опорных втулок и вал-шестерен можно рассчитать максимальную величину относительных смещений по направлению межосевого расстояния и в направлении перпендикулярных к ним. Такое решение позволит судить только о числовых значениях относительных смещений. Судить о качественных показателях будет сложно.

Одной из задач повышения качественных показателей на наш взгляд явилось частичное ограничение относительных перемещений отдельно взятых деталей. Таким решением явилось предложение установить между опорными втулками раздвижные элементы, которые раздвигали бы опорные втулки до непосредственного контакта цилиндрической поверхности опорной втулки и поверхностью цилиндрического отверстия в корпусе насоса [16, с. 156; 17, с. 160].

На рисунке 1 показано соединение опорных втулок с разжимными элементами в отверстиях корпуса насоса.

а – положения втулок в корпусе НШ; б, в – варианты разжимных соединений; г – разжимное соединение с элементом виде твердого тела из мягкого материала

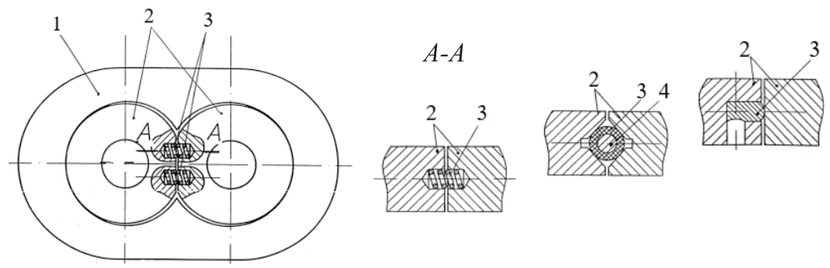


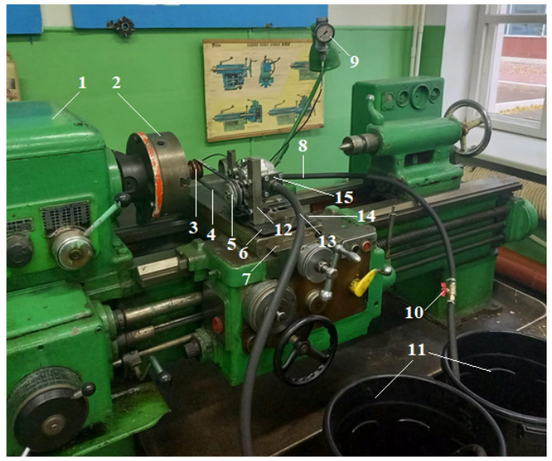
Рисунок 1 – Соединение опорных втулок с разжимными элементами в отверстиях корпуса насоса

На рисунке 1а показаны: 1 – корпус насоса; 2 – опорные втулки; 3 – разжимные элементы. На рисунке 1б, в, и г показаны варианты разжимных соединений. На этих рисунках показаны: 1 – опорные втулки; 2 – разжимные элементы. Так на рисунке 1б показаны разжимные элементы в виде пружин. На рисунке 1в разжимной элемент представляет собой тело с жестким сердечником, расположенным между V – образных впадин. На рисунке 1г показан разжимной элемент виде твердого тела из мягкого материала, который за счет деформации через отверстие в торцовой части опорной втулки выбирает имеющийся зазор между опорными втулками. На конструкцию НШ с двухосным соединением был получен патент [18].

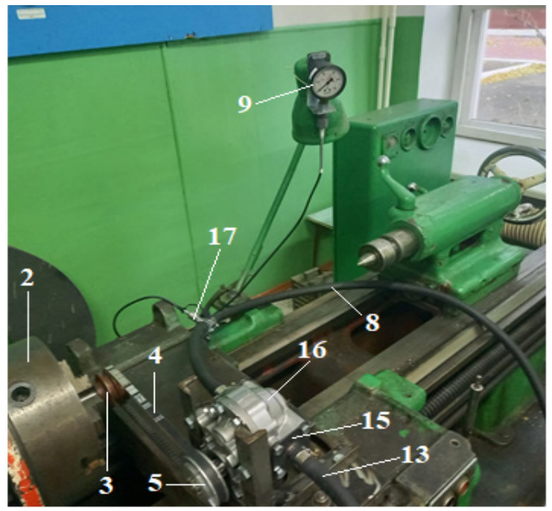
Материалы и методы

Методы исследования, используемые в работе базируются на основных положениях таких наук, как технология машиностроения, основы конструирования деталей гидравлических машин, материаловедение, теория и расчет размерных цепей, допуски и посадки. Экспериментальные исследования технических параметров НШ с двухосным соединением проводились на специальном стенде монтированной на базе токарного станка. Измерение температуры масла осуществлялось с помощью термометра для измерения температуры масла. Для изготовления разжимного элемента в виде твердого тела использовалась сырая резиновая смесь 7-В 14. Это многокомпонентное сырье, произведенное из каучука, с различными добавками (наполнители, стабилизаторы, пластификаторы и пр.). Данная марка резиновой смеси широко применяется в различных отраслях промышленности: строительство, автомобилестроение, химическое производство и пр. Из неё изготавливают уплотнительные изделия, кольца, колпачки, манжеты для гидравлики, сальники, трубки, грязе- и маслосъемные изделия.

На рисунке 2 показано смонтированное устройство для испытания шестеренчатых насосов на базе токарного станка.



а)



б)

а – вид спереди; б – вид сверху; 1 – токарный станок; 2 – трехкулачковый патрон; 3 – шкив ведущий; 4 - клиновая ремень; 5 – шкив ведомый; 6 – плита; 7 – суппорт; 8 – шланг; 9 – монометр; 10 – краник (задвижка); 11 – баки; 12 – кронштейн; 13 – шланг; 14 – болты; 15 – фланец; 16 – НШ с двухосным соединением

Рисунок 2 – Смонтированное устройство для испытания шестеренчатых насосов на базе токарного станка

Экспериментальное исследование показателей качества НШ с двухосным соединением и с разжимными элементами в виде твердого тела из мягкого материала.

На рисунке 3 показаны опорные втулки с выполненными V – образными пазами.

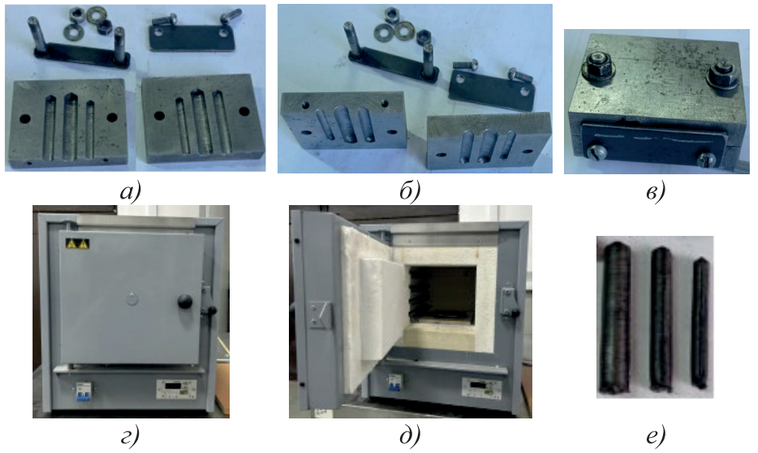
а) *б)*

а – опорные втулки с V – образными пазами; б – НШ в сборе

Рисунок 3 – Опорные втулки с выполненными V – образными пазами

Для изготовления разжимных элементов с различными диаметрами из мягкого материала был подготовлен разъемный штамп с различными выемками.

На рисунке 4 показаны оборудование и оснастки использованные для изготовления разжимных элементов в виде твердого тела из резиновой смеси.



а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

а,б – деталировка разъёмного штампа; в – штамп в сборе; г,д – муфельный печь; е – изготовленные разжимные элементы из резиновой смеси

Рисунок 4 – Оборудование и оснастки использованные для изготовления разжимных элементов в виде твердого тела из резиновой смеси

Результаты и обсуждение

Перед началом проведения экспериментальных исследований тщательно были проверены надежность закрепления деталей и узлов специального устройства на базе токарного станка.

Для проверки надежности работы экспериментального устройства на малых оборотах был обкатан испытуемый насос, при этом создавалось искусственное давление в системе с помощью задвижки 10. В ходе проверки не было обнаружено утечки масла и скапления воздуха в шлангах 6, манометр 9 работал исправно.

Были произведены сравнения технологических показателей стандартного насоса НШ-50У3 с НШ с двухосным соединением в которой установлены разжимные элементы на одних и тех же рабочих режимах. Экспериментальные исследования проводились в следующем порядке. Запускали токарный станок 1, задав вращение на 200 об/мин фиксируем время начала, и окончания слива масла в пустую половинку емкости 11, в трех различных положениях (открытий, полузакрытый и чуть открытий) задвижки 10 и производим запись показаний манометра 9. Повторяем последовательность проведения эксперимента, задав обороты из ряда: 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000. Высокие обороты были получены за счет смены шкива. По этой методике были определены рабочее давление в системе и температура нагревания масла. На рисунке 5 показано график влияния частоты вращения на температуру нагрева масло.

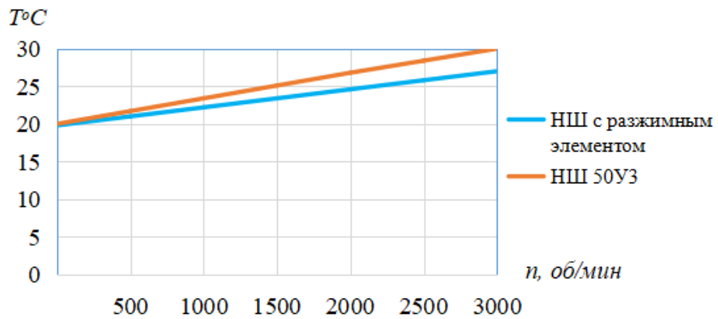
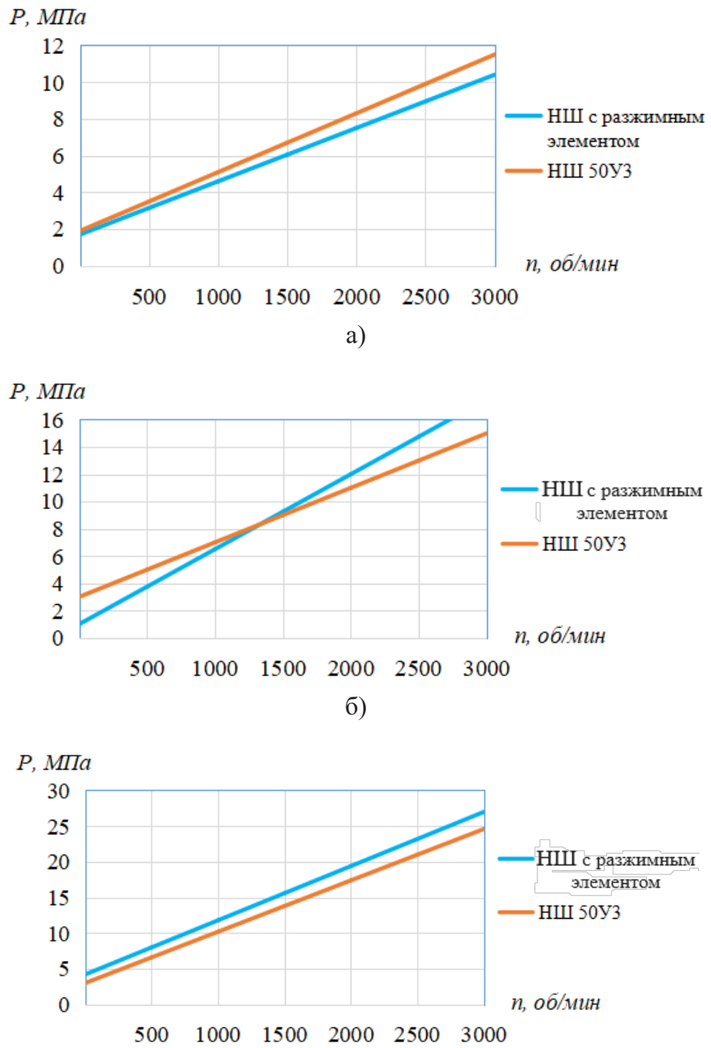


Рисунок 5– График влияния частоты вращения на температуру нагрева масло в системе

На рисунке 6 показано график влияние частоты вращения на давление в системе при различных положениях краника.



а)

б)

в)

а – график влияние частоты вращения на давление в системе при полном открытом положении краника (задвижки); б – график влияние частоты вращения на давление в системе при полузакрытом положении краника (задвижки); в – график влияние частоты вращения на давление в системе при слегка приоткрытом положении краника (задвижки)

Рисунок 6 – График влияние частоты вращения на давление в системе при различных положениях краника

Выводы

Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением оборотов вращения вала у НШ с двухосным соединением производительность возрастает но при этом резкое повышение температуры нагрева масла не наблюдается.

Полученные значения рабочего давления, создаваемого в предлагаемой конструкции насоса НШ с двухосным соединением с разжимными элементами при различных положениях задвижки показали, что их величина совпадает с величиной рабочего давления стандартного НШ.

В целом результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность конструкции НШ с двухосным соединением с разжимными элементами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Лепешкин, А. В., Михайлин, А. А., Шейпак, А. А.** Гидравлика и гидропневмопривод: Учебник, Ч.2. Гидравлические машины и гидропневмопривод. под ред. А. А. Шейпака. – [Текст] // М. : МГИУ, 2003. – 352 с.

2 **Башта, Т. М., Руднев, С. С., Некрасов, Б. Б. и др.** Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : Учебник для машиностроительных вузов – 2-е изд., перераб. [Текст] // М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

3 **Сырицын, Т. А.** Эксплуатация и надежность гидро- и пневмопривода. [Текст] // М. : Машиностроение, 1990. – 315 с.

4 **Стесин, С. П.** Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. [Текст] // М. : Издательство : Академия, 2005. – 336 с.

5 **Пархоменко, В. И., Шамгунов, С. М.** Основы ремонта и эксплуатации тракторов. Учебное пособие. – [Текст] // Павлодар, 2008. – 130 с.

6 **Малышев, В. Н.** Повышение качества зубчатых зацеплений шестеренных насосов [Текст] // Проблема качества механических передач и редукторов. Точность и контроль зубчатых колес и передач : Материалы Всесоюзн. науч.-техн. конф. – Л., 1991. – С. 17–18.

7 **Аликулов, Д. Е.** Двухосное соединение «вал-отверстия». [Текст] // Ташкент : Издательство «Молия». – 2007, 131 с.

8 **Thorns, R., Bom- have-Beins, R., Schmidt, B.** The noise control of external gear pumps. [Text] // Pr. Nauk. Inst. Konstr. i Elcsploat. Macz. Pwof. Ser. Wspofepr. – 1991. – № 4. – P. 179–188.

9 **Лезин, П. П.** Основы надежности сельскохозяйственной техники [Текст] // Саранск : Изд-во МУ, 1997. – 223 с.

10 **Жабо, В. В., Уваров, В. В.** Гидравлика и насосы : Учебник для техникумов. 2-е изд., перераб. [Текст]. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 328 с.

11 **Фрумкис, И. В.** Гидравлическое оборудование тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин. [Текст]. – М. : Колос, 1971. – 280 с.

12 **Звездов, В. П., Лунев, А. В.** О стабилизации бокового зазора в зубчатом зацеплении шестеренного масляного насоса АМЗ [Текст]. // Сб. докладов 4 международной конференции «Измерение, контроль и автоматизация производственных процессов», Барнаул. – 20–21 октября 1997 г. – Т. 2. – Барнаул, – С. 156–158.

13 **Аникин, Ю. В., Царев, Н. С., Ушакова, Л. И.** Насосы и насосные станции: учеб. пособие [Текст]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 138 с.

14 **Басистов, Н. И.** Ремонт шестеренного насоса методом коррекции зацепления. [Текст]. – Уфа, 1991. – 44 с.

15 **Башта, Т. М.** Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем [Текст]. – М. : Машиностроение, 1994. – 606 с.

16 **Sherov, A. K., Myrzakhmet, B., Sherov, K. T., Sikhimbayev, M. R., Absadykov, B. N.** Gear pump quality improving by changing the design and size of the support bushings. [Text] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2021. – Volume 6. – Number 450(2021), P. 155–162. – https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.132

17 **Sherov, A. K., Myrzakhmet, B., Sherov, K. T., Absadykov, B. N., Sikhimbayev, M. R.** Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection. [Text] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2022. – Vol. 1. – 451(2022), P. 159–166. – https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.153

18 **Шеров, К. Т., Бердимуратова, Д. И., Турусбекова, А. С., Мырзахмет, Б., Мусаев, М. М., Сагитов, А. А., Мендалиева, С. И., Магавин, С. Ш., Таттимбек, Г.** Насос шестеренный с двухосным соединением / Патент №11069 РК на полезную модель. Опубликовано 29.08.2025. Бюл. №35

REFERENCES

1 **Lepeshkin, A. V., Mikhaylin, A. A., Sheypak, A. A.** Gidravlika i gidropnevmoprivod [Hydraulics and Hydropneumatic Drive]: Uchebnik, CH.2. Gidravlicheskiye mashiny i gidropnevmoprivod. pod red. A.A. Sheypaka. [Text]. – M. : MGIU, 2003. – 352 p.

2 **Bashta, T. M., Rudnev, S. S., Nekrasov, B. B. i dr.** Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody [Hydraulics, Hydraulic Machines, and Hydraulic Drives]: Uchebnik dlya mashinostroitel'nykh vuzov – 2-ye izd., pererab. [Text]. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1982. – 423 p.

3 **Syritsyn, T. A.** Ekspluatatsiya i nadezhnost' gidro- i pnevmoprivoda [Operation and Reliability of Hydraulic and Pneumatic Drives]. [Text]. – Moscow : Mashinostroyeniye, 1990. – 315 p.

4 **Stesin, S. P.** Gidravlika, gidromashiny i gidropnevmoprivod. [Hydraulics, hydraulic machines and hydropneumatic drive] [Text] // Moscow : Izdatel'stvo : Akademiya, 2005. – 336 p.

5 **Parkhomenko, V. I., Shamgunov, S. M.** Osnovy remonta i ekspluatatsii traktorov. Uchebnoye posobiye. [Fundamentals of repair and operation of tractors. Study guide], [Text]. – Pavlodar, 2008. – 130 p.

6 **Malyshev, V. N.** Povysheniye kachestva zubchatykh zatsepleniy shes terennykh nasosov [Improving the quality of gear engagement of gear pumps] [Text]. – Problema kachestva mekhanicheskikh peredach i reduktorov. Tochnost' i kontrol' zubchatykh koles i peredach: Materialy Vsesoyuzn. nauch.-tekhn. konf. – L., 1991. – P. 17–18.

7 **Alikulov, D. Ye.** Dvukhosnoye soyedineniye «val-otverstiya» [Biaxial «shaft-holes» connection]. – [Text]. – Tashkent : Izdatel'stvo «Moliya». – 2007. – 131 p.

8 **Thorns, R., Bom-have-Beins, R., Schmidt, B.** The noise control of external gear pumps. [Text]. – Pr. Nauk. Inst. Konstr. i Elcsploat. Macz. Pwof. Ser. Wspofepr. – 1991. – № 4. – P. 179–188.

9 **Lezin, P. P.** Osnovy nadezhnosti sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Fundamentals of Reliability of Agricultural Machinery] [Text]. – Saransk : Izd-vo MU, 1997. – 223 p.

10 **Zhabo, V. V., Uvarov, V. V.** Gidravlika i nasosy [Hydraulics and Pumps] : Uchebnik dlya tekhnikumov. 2-ye izd., pererab. [Text]. – M. : Energoatomizdat, 1994. – 328 p.

11 **Frumkis, I. V.** Gidravlicheskoye oborudovaniye traktorov, avtomobiley i sel'skokhozyaystvennykh mashin [Hydraulic equipment of tractors, automobiles and agricultural machinery] // [Text]. – M. : Kolos, 1971. – 280 p.

12 **Zvezdov, V. P., Lunev, A. B.** O stabilizatsii bokovogo zazora v zubchatom zatseplenii shesterennogo maslyanogo nasosa AMZ [On stabilization of lateral clearance in the gear engagement of the AMZ gear oil pump] [Text]. – Sb. dokladov 4 mezhdunarodnoy konferentsii «Izmereniye, kontrol' i avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov», Barnaul, 20–21 oktyabrya 1997g. – Vol. 2. – Barnaul, 1997. – P. 156–158.

13 **Anikin, Yu. V., Tsarev N. S., Ushakova L. I.** Nasosy i nasosnyye stantsii: ucheb. posobiye [Pumps and pumping stations : Textbook. Manual] [Text]. – Yekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2018. – 138 p.

14 **Basistov, N. I.** Remont shesterennogo nasosa metodom korrektsii zatsepleniya [Gear Pump Repair Using Engagement Correction], [Text]. – Ufa, 1991. – 44 p.

15 **Bashta, T. M.** Ob"yemnyye nasosy i gidravlicheskiye dvigateli gidrosistem [Positive Displacement Pumps and Hydraulic Motors of Hydraulic Systems] [Text]. – M. : Mashinostroyeniye, 1994. – 606 p.

16 **Sherov, A. K., Myrzakhmet, B., Sherov, K. T., Sikhimbayev, M. R., Absadykov, B. N.** Gear pump quality improving by changing the design and size of the support bushings. [Text]. – News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2021. – Volume 6. – Number 450(2021), P. 155–162. – https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.132

17 **Sherov, A. K., Myrzakhmet, B., Sherov, K. T., Absadykov, B. N., Sikhimbayev, M. R.** Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection. [Text]. – News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2022, Vol 1. – 451(2022), P. 159–166. – https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.153

18 **Sherov, K. T., Berdimuratova, D. I., Turusbekova, A. S., Myrzakhmet, B., Musayev, M. M., Sagitov, A. A., Mendaliyeva, S. I., Magavin, S. Sh., Tattimbek, G.** Nasos shesterennyy s dvukhosnym soyedineniyem [Gear pump with biaxial connection], [Tekst]. // Patent №11069 RK na poleznuyu model'. Opublikovano 29.08.2025. Byul. № 35.

Поступило в редакцию 21.11.25.
Поступило с исправлениями 28.11.25.
Принято в печать 29.11.25.

Б. Мырзахмет[1], *К. Т. Шеров[2], С. Ш. Магавин[3], А. А. Сагитов[4], А. К. Шеров[5]
[1,2,3,4,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.
21.11.25 ж. баспаға түсті.
28.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
29.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КЕРУШІ ЭЛЕМЕНТТЕРМЕН ЖАБДЫҚТАЛҒАН ТІСТЕГЕРГІШ СОРҒЫНЫҢ САПА КӨРСЕТКІШТЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Тістегеріште сорғылар (ТС) отандық машина жасау өнеркәсібінде гидравликалық машинаның ең көп таралған түрі болып табылады. ТС-да сапаны қамтамасыз ету мәселелері анықталды, нәтижесінде ТС әрқашан қажетті қуатты бере бермейді, ал ТС жұмыс бөлшектері салыстырмалы түрде тез тозып, ағып кетудің жол берілмейтіндей артуына және көлемдік тиімділіктің төмендеуіне әкеледі.

Осы мәселелерді шешу үшін ТС құрылымын жақсарту бойынша зерттеулер жүргізілуде. Бұл мақалада екі осьті қосылысы және резеңке қосылыстан жасалған керуші элементтері бар жаңа ТС құрылымын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Екі осьті қосылысы бар ТС техникалық параметрлерін эксперименттік зерттеулер токарлық станогқа орнатылған арнайы қондырғыда жүргізілді. Май температурасы май температурасы термометрін пайдаланып өлшенді. Керіп тұрушы элементті жасау үшін 7-В 14 шикі резеңке қосылысы қолданылды.

Эксперименттік зерттеулер білік жылдамдығының артуымен екі осьті қосылысы бар тістегеріште сорғының өнімділігі артатынын, бірақ майды қыздыру температурасының күрт жоғарылауы байқалмайтынын көрсетті. Әртүрлі клапан позицияларындағы екі осьті қосылымы және кеңейту элементтері бар тістегеріш сорғысының ұсынылған құрылымымен жасалған жұмыс қысымының алынған мәндері олардың мәндерінің стандартты беріліс сорғысының жұмыс қысымымен бірдей екенін көрсетті.

Кілтті сөздер: Тістегеріште сорғысы, тірек втулкалары, екі осьті қосылыс, керуші элемент, өнімділік, температура, резеңке қоспасы.

***B. Myrzakhmet*[1], **K. T. Sherov*[2], *S. Sh. Magavin*[3],**
***A. A. Sagitov*[4], *A. K. Sherov*[5]**
[1,2,3,4,5]S. S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 21.11.25.
Received in revised form 28.11.25.
Accepted for publication 29.11.25.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE QUALITY INDICATORS OF A GEAR PUMP EQUIPPED WITH EXPANSION ELEMENTS

Gear pumps (GPs) are the most common type of hydraulic machine in the domestic mechanical engineering industry. Quality assurance issues have been identified in GPs, resulting in GPs not always delivering the required power, and the GP working parts wearing out relatively quickly, leading to an unacceptable increase in leakage and a drop in volumetric efficiency.

To address these issues, research is being conducted to improve GP design. This article presents the results of a study of a new GP design with a biaxial joint and expansion elements made of a rubber compound. Experimental studies of the technical parameters of a GP with a biaxial joint were conducted on a special rig mounted on a lathe. Oil temperature was measured using an oil temperature thermometer. A 7-B 14 raw rubber compound was used to manufacture the solid expansion element.

Experimental studies showed that with increasing shaft speed, the performance of the gear pump with a biaxial connection increases, but no sharp increase in oil heating temperature is observed. The obtained values for the operating pressure generated by the proposed design of the gear pump with a biaxial connection and expansion elements at various valve positions showed that their values are the same as the operating pressure of a standard gear pump.

Keywords: Gear pump, support bushings, biaxial connection, expansion element, performance, temperature, rubber compound.

FTAMP 55.57.33
https://doi.org/10.48081/RQPR6425

****К. Т. Утеулов*[1], *М. А. Адуов*[2], *С. А. Нукушева*[3]**
[1,2,3]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8906-9204
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2190-8582
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0619-6943
*e-mail.ru: kanat-uteulov@mail.ru

КЕҢ АЛЫМДЫ СЕПКІШТІҢ ТҰҚЫМ ЕНГІЗУ БӨЛІГІНДЕГІ ЖҰМЫС ОРГАНДАРЫНЫҢ ОРНАЛАСУЫН ЕСЕПТЕУ ЖӘНЕ НЕГІЗДЕУ

Мақалада, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасуы есептеліп негізделді. Анықталған көрсеткіштер тұқым енгізу бойынша қойылатын агротехникалық талаптарды толығымен орындауға, тарту кедергісі мен отын шығының азайтуға мүмкіндік береді.

Біріншіден, кең алымды сепкіштің құрылысы, негізгі бөліктері, тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органдары мен оның түрлері қарастырылды. Сондай-ақ, кең алымды сепкіштерді жобалау кезінде, осы техниканы қолдану жоспарланған өңірдің топырақ-климаттық жағдайларының ерекшеліктері зерттелді. Топырақ-климаттық жағдайларының ерекшеліктері ескеріліп, агротехникалық талаптарды толығымен орындайтын тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органы таңдалды.

Екінші ретте, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасуы үшін қажетті есептеу парметрлері анықталды. Сонымен, есептеулерден алынған мәліметтер бойынша, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасу схемасы негізделді.

Соңғы кезекте, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым және минералды тыңайтқышты әртүрлі тереңдікке саралап енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасуын есептеу және негіздеу нәтежиелері бойынша кең алымды сепкіштің 3-Д моделі мен эксперименталды нұсқасы жасалып, оның жұмыс істеу барысын және технологиялық операцияны орындау сапасын тексеру үшін далалық сынақтар жүргізілді.

Далалық сынақтар барысында сепкіштің агротехникалық және энергетикалық көрсеткіштері бағаланды. Агротехникалық көрсеткіштерді бағалау МЕСТ 31345 бойынша, ал энергетикалық көрсеткіштер МЕСТ Р 52777 жүргізілді.

Кілтті сөздер: кең алымды сепкіш, тұқым енгізу бөлігі, жел эрозиясы, алым ені, жұмыс органдарының саны, бүйірлік секция, ныгыздаушы жұмыс органы, орналасу схемасы.

Кіріспе

Ауыл шаруашылығы өндірісінің міндеті – жоғары өнімді алу, оның негізі тұқымды себу кезінде қаланады. Тұқымды себу – тұқымның өсуі мен өнуі үшін оңтайлы қоректену аймағын қамтамасыз ететін және егістік аймағы бойынша белгілі бір тереңдікке тұқымның біркелкі таралуы. Ол егілетін ауыл шаруашылығы дақылының түріне, жұмыс принципіне қарай бөлінетін сепкіштердің әртүрлі түрлерімен жүзеге асырылады. Өнімділігі жоғары дақылдарды қол жеткізу, қолданылатын егу әдістеріне де тікелей байланысты.

Тұқым енгізу бөлігіндегі жұмыс органдарының орналасуын есептеу және негіздеу бойынша бірнеше зерттеулер қарастырылған [1, 2]. Берілген зерттеулердегі [1, 1-б.] негізгі мақсат ретінде - жобаланған жұмыс органдарын ауыл шаруашылық машинасының қаңқасында оңтайлы орналастыру болып табылған. Жұмыс органдарын оңтайлы орналастыру бойынша есептеулер жүргізілген. Өйткені, жұмыс органдарының оңтайлы орналасуы тарту кедергісінің мәніне айтарлықтай әсер етеді. Келесі бір зерттеуде [2, 1-б.], Strip-Till технологиясын қолдана отырып, топырақ өңдеу кезінде қолданылатын ресурс үнемдейтін әдістің артықшылықтары және осы технологияны қолдану барысында жұмыс органдарының орналасуының ерекшеліктері қарастырылған. Алыс шет елдерде жұмыс органдарының оңтайлы орналасуы негізінде, кішігірім сепкіштер жасалуда [3]. Олардың конструкция ерекшеліктеріне байланысты жұмыс органдарының орналасуы алуан түрлі.

Сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі жұмыс органдарының орналасуымен қатар жұмыс органдарының топыраққа ену бұрышы [4] мен оның ұштау бұрышы [5] жайлы зерттеулер жүргізілген. Өйткені, бұл параметрлер тарту кедергісінің мәніне әсер етеді. Сондықтан, кең алымды сепкішті жобалау барысында, оның тұқым енгізу бөлігіндегі жұмыс органдарының орналасуын есептеу және негіздеу кезінде, жоғарыда қарастырылған зерттеулердің нәтежиелерін ескеру керек.

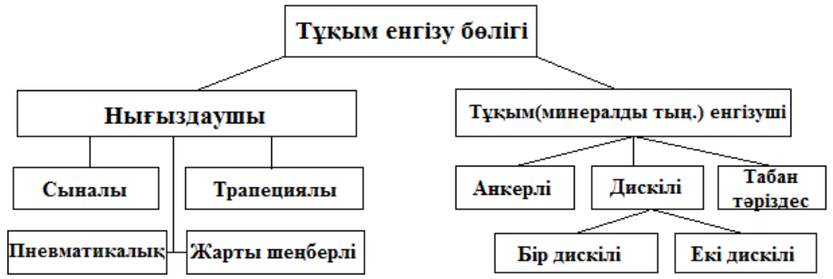
Кең алымды сепкіш - бұл әртүрлі ауылшаруашылық машиналарға тән бірнеше технологиялық операцияларды бір уақытта орындай алатын ауылшаруашылық машинасы [6]. Оның алым ені 6 м-ден 18 м-ге дейін болады [7, 105-б.]. Ол екі негізгі бөліктен тұрады: мөлшерлеп себу (бункер-тіркеме) және тұқым енгізу бөлігі (қопсытқыш) [7, 97-б.].

Мөлшерлеп себу бөлігі арнайы қаңқаға (тіркеме) орнатылған мөлшшерлеу құрылғысы және оның жетегі бар бункерден тұрады. Тіркеменің алдыңғы бөлігінде ауа өткізгіш түтіктері мен оны бағыттау құрылғысы бар желдеткіш орнатылған. Себу бөлігінде тұқымдар бункерден мөлшерлеу құрылғысына келіп, ауа өткізгішке беріледі. Әрі қарай, олар ауа ағынымен тұқым енгізу бөлігінде орнатылған таратқыш бастиекке және онда жалғанған тұқым өткігіштер арқылы жұмыс органдары (сіңіргіштер) көмегімен топыраққа енгізіледі [7, 97-б.].

Тұқым енгізу бөлігі сіңіргіштердің көмегімен тұқым мен минералды минералды тыңайтқыштарды әр түрлі тереңдікте, топырақтың ылғалды қабатына тікелей енгізіп, содан кейін нығыздаушы жұмыс органдары арқылы (катоктар) нығыздауға арналған. Ол танаптың рельефін біркелкі қайталауды қамтамасыз ететін, бір-бірімен топсалы бекітілген жеке секциялардан тұрады. Әр секцияның

түрлі механизмдері мен орнатылмалы құрылғылары бекітілген жеке қаңқасы бар [7, 97-б.].

Кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіне әртүрлі тұқым енгізуші және нығыздаушы жұмыс органдары орнатылады. Олардың негізгі түрлері төмендегі суретте келтірілген (сурет 1).



1-сурет – Тұқым енгізу бөлігінің жұмыс органдары

Сондай-ақ, кең алымды сепкіштерді жобалау кезінде, осы техниканы қолдану жоспарланған өңірдің топырақ-климаттық жағдайларының ерекшеліктері ескеру қажет [7, 105-б.].

Жобаланатын кең алымды сепкіш Зерттеу 217 «Ғылымды дамыту»: AP08856407 «Тұқым себуге және минералды тыңайтқыштарды әр түрлі тереңдікке саралап енгізуге арналған кең алымды сепкіш әзірлеу» грант жобасы аясында 2020-2022 жылдар аралығында және «BR24892784» 1336 ғылыми-техникалық бағдарламасы шеңберінде жүргізілді [8, 9, 4-б.]. Ол Қазақстанның астық егетін солтүстік және орталық аймақтарында пайдаланылуы жоспарлануда. Бұл өңірдегі климат, негізінен Батыс Сібір климаттық аймағына жататын күрт континенталды, жазы жылы, бірақ кейде құрғақ болатын өңірге жатады. Жауын-шашынның ең көп мөлшері аймақтың солтүстік бөлігінде түсіп (Петропавл, 356 мм), кейін оңтүстікке қарай баяу азаяды (Астана, 342 мм). Еліміздің солтүстік-батысында атап баяу азайып (Қостанай, 331 мм), ал шығысқа қарай жауын-шашын мөлшері мүлде тез азаяды (Павлодар 268 мм) [10, 19-б.]. Солтүстік Қазақстан аумағында құрамы біртекті емес дала топырақтары басым, олар жел эрозиясына ұшырайтын механикалық құрамы бойынша жеңіл болып табылады. Солтүстік Қазақстан аумағындағы эрозия процестеріне 777,6 мың га., оның ішінде: Ақмола облысы-562 мың га, Қостанай облысы – 158,7 мың га, Солтүстік Қазақстан облысы 56,0 мың га, Павлодар облысы -0,9 мың га [11, 318-б.]. Сондықтан, бұл аймақта топырақты аудармай өңдеу әдісі қолданылады.

Топырақты аудармай өңдеу әдісі кезінде топырақ бетіндегі өсімдік қалдықтары сақталады және топырақ қабатын аудару жүргізілмейді. Бұл әдіс топырақ қабатының жел эрозиясына төзімділігін арттырады, қыста қардың танап бетінде сақталуына, жылы мезгілде ылғалдың жақсы сіңіуіне ықпал етеді және

гумустың сақталуына қолайлы жағдайлар жасайды. Сондай-ақ, бұл әдісте топырақ құрылымы аз бұзылады, бұл әсіресе қуаты төмен қарашіріктері бар құнарсыз топырақтарға оң әсер етеді.

Жел эрозиясы жауын-шашыны аз, көктемгі және жазғы ауа температурасы мен жел белсенділігі жоғары, топырақтың өзара байланысы төмен және өсімдік жамылғысы әлсіз ауылшаруашылық алқаптарында көрінеді [Материал Википедиадан алынған, еркін энциклопедия – Қазақстан климаты].

Жоғарыдағы мәселелерді ескере отырып, жел эрозиясынан топырақты қорғау талаптарын толық қанағаттандыратын жұмыс органы ретінде «Әртүрлі берілген тереңдікке тұқым мен тыңайтқыш себуге арналған сіңіргіш [12]» жобаланып қолданылды.

Кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасуы маңызды рөл атқарады. Өйткені, бұл тұқым енгізу бойынша қойылатын агротехникалық талаптарды толығымен орындауға, тарту кедергісі мен отын шығының азайтуға мүмкіндік береді.

Тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым енгізуші жұмыс органдарын оңтайлы орналастыру үшін кең алымды сепкіштерде олардың орналасу схемаларын ескеру қажет [7, 95-б.].

Кең алымды сепкіштерде тұқым енгізуші жұмыс органдарының орналасу схемаларының негізгі 4 типі зерттелген [7, 102-б.]. Олар:

– жетек дөңгелектері раманың (секцияның) ішкі бөлігіне орнатылған кезде және технологиялық операцияны жүргізуге қатысады;

– жетек дөңгелектері раманың (секцияның) ішкі бөлігіне орнатылған кезде және технологиялық операцияны жүргізуге қатыспайды;

– жетек дөңгелектері рамадан тыс (секциядан тыс) орнатылған кезде және технологиялық операцияға қатыспайды;

– жетек дөңгелектері болмаған кезде және олардың функцияларын пневматикалық тірек-дөңгелектеріорындайды [7, 103-б.].

Жоғарыдағы көрсетілген зерттеуді негізге ала отырып, тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органдары мен жұмыс органдарының қатар арасындағы арақашықтықтың өсімдік қалдықтарымен бітеліп қалуын болдырмау және олардың арасындағы топырақтың деформациясының таралу аймағын есепке алып, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасуын есептеу және негіздеу қажеттілігі туындайды.

Сонымен, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасуы үшін келесі парметрлер анықталады:

– қатар аралығындағы минималды арақашықтық;

– қатардағы көршілес жұмыс органдарының арасындағы арақашықтық;

– жұмыс органдарының саны;

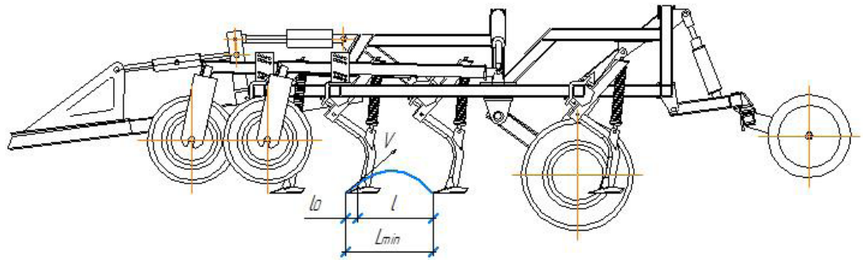
– тұқым енгізу бөлігінің ұзындығы;

– нығыздаушы жұмыс органын орналастыру арақашықтығы.

Материалдар мен әдістері

Тұқым енгізуші жұмыс органдары мен жұмыс органдарының қатар аралығындағы арақашықтық, технологиялық процестің сенімділігі мен оның энергия сыйымдылығын анықтайтын негізгі технологиялық параметрлердің бірі болып табылады. Сонымен қатар, ол, негізгі конструктивтік көрсеткіш болып табылатын - кең алымды сепкіштің алым енін, ұзындығын және материал сыйымдылығын анықтайды. Бұл мәселенің шешімі – тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтықты табуға негізделген, бұл өңделген топырақ массасының қалыптастырмай еркін өтуін қамтамасыз етеді.

Тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтық (сурет 2) жұмыс органдарына қатысты топырақ бетіндегі қабаттың деформациясының таралу аймағымен анықталады.



2-сурет –Жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтық

Жұмыс органдарының орналасуын және олардың санын негіздеуге қажетті барлық мәндерді есептеу үшін төмендегі формулалар қолданылады.

Осы шарттарға сүйене отырып, тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтық келесі формула бойынша анықталады:

$$L_{min} = l_0 + l \tag{1}$$

$$l = \frac{V^2 \cdot cos^2\,\alpha}{2g}\left(tg\alpha + \sqrt{tg^2\alpha + \frac{2gb \cdot sin\,\alpha}{V^2 \cdot sin(2\gamma) \cdot cos^2\,\alpha}}\right) \tag{2}$$

мұндағы, L_{min} – тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтық, м;

l – топырақ түйіндерінің түсу қашықтығы, м.

l_0 – тұқым енгізуші жұмыс органының тірегінен оның ұшына дейінгі қашықтық, (0,1 м).

V– жұмыс жылдамдығы, (1,6-3,2 м/с);

α – тұқым енгізуші жұмыс органы мен танап арасындағы бұрыш, (20–50 град);

2γ – тұқым енгізуші жұмыс органының ашылу бұрышы, (60–78 град);

b –тұқым енгізуші жұмыс органының ені, (0,27 м).

Жоғарыдағы мәндерді қолданып келесі есептеулер жүргіземіз:

$$l = \frac{1{,}6^2 \cdot (\cos 20)^2}{2*9{,}8}\left(tg20 + \sqrt{(tg20)^2 + \frac{2*9{,}8*0{,}27 \cdot sin\ 20}{9.8^2 \cdot sin\ 70 \cdot (\cos 20)^2}}\right) = 0{,}102 \text{ м}$$

$$L_{min} = 0{,}1 + 0{,}102 = 0{,}202 \text{ м}$$

Есептеулердің өзге нәтежиелері 1 – кестеде берілген.

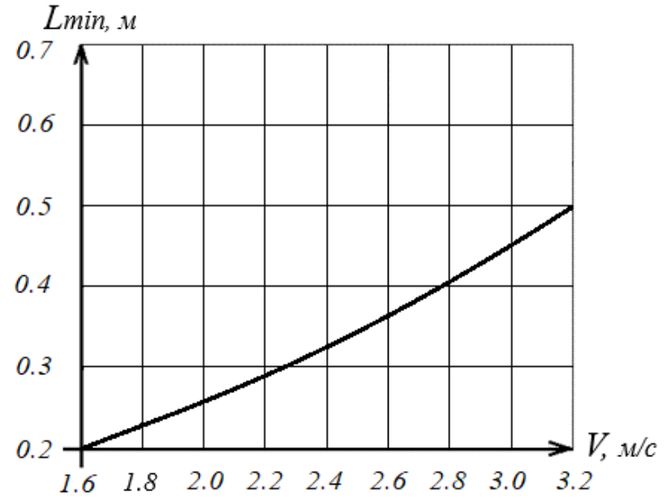
1-кесте–Жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтықтың жұмыс жылдамдығына тәуелділік нәтежиелері:

V, м/с	*1,6*	*1,8*	*2,0*	*2,2*	*2,4*	*2,6*	*2,8*	*3,0*	*3,2*
L_{min},*м*	*0,202*	*0,228*	*0,257*	*0,289*	*0,324*	*0,362*	*0,403*	*0,447*	*0,49*

Жоғарыдағы өрнек бойынша есептеулер салыстырмалы түрде төмен қозғалыс жылдамдығында (0,5-1,0 м/с) ғана қанағаттанарлық нәтиже береді. Егер қозғалыс жылдамдығы 1,5 м/с-тан жоғары болса, тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтықты ұлғайту ұсынылады, өйткені жұмыс органының табанынан түсетін топырақ қабатының динамикалық факторының рөлі артады.

Кең алымды сепкіштің жұмыс жылдамдығының әсерін бағалау және тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатарлары арасындағы минималды арақашықтықты анықтау үшін жұмыс органымен кесілген топырақ қабатының массасы оның масса орталығында шоғырланған, ал жұмыс органының табанынан түсетін топырақ қабатының қозғалысы тұрақты жылдамдықпен қозғалады деген болжам қабылданады [13, 192-б.]. Қабылданған болжамдарды ескере отырып, топырақ қабатының қозғалысы V жылдамдықпен көкжиекке α бұрышымен лақтырылған қатты дененің қозғалысы ретінде қарастырылады. Бұл жағдайда қозғалыс жылдамдығының салыстырмалы түрде төмен болуына байланысты қозғалысқа қарсы күштерді ескермеуге болады.

Есептеулер нәтежиелері негізінде 3-суреттегі график құрастырылды, ол тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтықтың жұмыс жылдамдығына тәуелділігін көрсетеді.



3-сурет –Тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы Lmin минималды қашықтықтыңV жұмыс жылдамдығына тәуелділік графигі

Графиктен көріп отырғаныңыздай, кең алымды сепкіштің жұмыс жылдамдығы 2,6–3,2 м/с болғанда тұқым енгізуші жұмыс органдары қатарлары арасындағы есептелген минималды арақашықтық 0,42–0,52 м болуы керек. Бірақ, тәжірибе көрсеткендей, бұл мәндер шамамен алынған. Өйткені, бұл әдістеме өңдеу тереңдігі мен топырақ бөлшектерінің арасындағы өзара байланысын ескермейді. Бұл жағдайда топырақтың қозғалысын әр түрлі тереңдіктегі үздіксіз ортаның қозғалысы ретінде қарастырған жөн.

Нақты жағдайларға, жақынырақ мәндерді алу үшін өлшемдер теориясын қолдана отырып есептелген физикалық модельдеу әдісін қолданады.

Өлшемдер теориясы, кез-келген теорияның физикалық мазмұны есептеулерде қабылданған өлшем бірліктеріне тәуелді болмауы керек деген түсінікке негізделген. Механикада кездесетін физикалық шамалар, дәрежелерді біріктіру арқылы алынған үш негізгі бірлік арқылы көрсетілген өлшемдерге ие болғандықтан, кез-келген физикалық теңдеуді өлшемсіз түрде, яғни өлшемсіз параметрлерді қолдану арқылы ұсынуға болады.

Осыған байланысты L_{min} тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтығының V жұмыс жылдамдығына тәуелділігі, қозғалыс кезінде жұмыс органдары арасындағы салыстырмалы L_{min}/a қашықтығының Фруд критерийіне тәуелділігі ретінде анықталады [14]:

$$\frac{L_{min}}{a} = A \cdot \left(\frac{V^2}{g \cdot a}\right)^{\beta} \quad (3)$$

мұндағы a – себу тереңдігі, A – коэффициент, g – еркін түсу үдеуі, β – дәреже көрсеткіші.

Фруд критерийі, инерция күші мен сыртқы күш (ауырлық күші, кинетикалық немесе потенциалдық энергия) арасындағы байланысты сипаттайды.

Жұмыс органының себу тереңдігі a сызықтық өлшем ретінде қабылданады, өйткені, ол осы жағдайда қозғалыс процесімен қамтылған кеңістіктің мөлшерін анықтайды.

Жоғарыдағы (3) теңдеуіндегі A коэффициенті жұмыс органының геометрия процесіне әсерін, сондай-ақ ескерілмейтін өзге факторларды сипаттайды (мысалы, топырақтың адгезия коэффициенті, ішкі үйкеліс бұрышы және т.б.).

A коэффициенті мен β көрсеткіші төмендегі теңдеуден анықталады:

$$ln\frac{L_{min}}{a} = ln\,A + \alpha \cdot ln\left(\frac{V^2}{g \cdot a}\right) \quad (4)$$

Ең кіші квадраттар әдісімен келесі мәндер алынады: β = 0,32; A = 2,51 3,401 <V^2/g*a< 22,041. Осы мәндерді ескере отырып, (3) теңдеуді келесідей жазамыз:

$$L_{min} = 2{,}51 \cdot \left(\frac{V^2}{g \cdot a}\right)^{0{,}32} * a \quad (5)$$

Соңғы алынған (5) формулаға берілген көрсеткіштерді қоямыз:

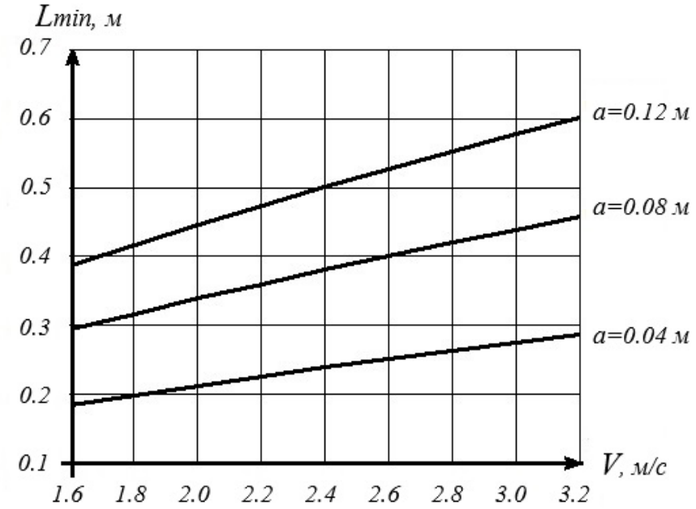
$$L_{min} = 2{,}51 \cdot \left(\frac{1{,}6^2}{9{,}8 \cdot 0{,}04}\right)^{0{,}32} * 0{,}04 = 0{,}183\ м$$

Есептеулердің өзге нәтежиелері 2 – кестеде берілген.

2-кесте – Жұмыс органдарының қатар аралығындағы минималды арақашықтықтың себу тереңдігіне тәуелділік нәтежиелері:

V, м/с	*1,6*	*1,8*	*2,0*	*2,2*	*2,4*	*2,6*	*2,8*	*3,0*	*3,2*
a=0,04 м									
L_{min},*м*	*0,183*	*0,228*	*0,257*	*0,289*	*0,324*	*0,362*	*0,403*	*0,447*	*0,49*
a=0,08 м									
L_{min},*м*	*0,202*	*0,228*	*0,257*	*0,289*	*0,324*	*0,362*	*0,403*	*0,447*	*0,49*
a=0,12 м									
L_{min},*м*	*0,202*	*0,228*	*0,257*	*0,289*	*0,324*	*0,362*	*0,403*	*0,447*	*0,49*

Жоғарыда келтірілген (5) формулабойынша есептеулер нәтежиесінде 4-суретте келтірілген график салынды.



4-сурет – Lmin минималды арқашықтығының V жұмыс жылдамдығына және өңдеу тереңдігіне тәуелділік графигі

Графиктен себу тереңдігі 0,08 м,ал жұмыс жылдамдығы 2,6 м/с болған кезде, тұқым енгізуші жұмыс органдарының қатарлар арасындағы ең минималды арақашықтық 0,4 м болатындығын көруге болады.

Осылайша, оңтайлы жұмыс жылдамдығын V және алым ені B біле отырып, жұмыс органдарының қатарлары арасындағы минималды қашықтық $0{,}4 \le L_{min} \le 0{,}8$ м аралықты құрайды. Есептеу жүргізу үшін 0,5 м мәні қабылданады.

Жұмыс органдары арасындағы арақашықтық арамшөптерді толығымен кесуге арналған тұқым енгізуші жұмыс органының алым еніне және қатарлар санына байланысты.

Жобаланған кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігінде тұқым енгізуші жұмыс органдары ретінде әр түрлі тереңдікке тұқым мен минералды тыңайтқыш енгізуге арналған жұмыс органы қолданылады. Бұл жұмыс органын таңдау агротехникалық талаптарды, топырақ-климаттық жағдайды және топырақты өңдеу мен себу әдісін ескере отырып негізделген. Жұмыс органының алым ені в, 270 мм қамтиды.

Агротехникалық талаптар мен себу әдісі бойынша қатар аралығы z, 228 мм болғандықтан, жұмыс органдары арасындағы арақашықтық та сол мәнде алынады. Бұл жағдайда, жұмыс органдары іздерінің бір-бірін көмкеруі көрсеткіші c, 42 мм шамасында болады.Бұл шама жұмыс органдары іздерінің бір-бірінкөмкеру шектерінің аралығын қамтиды (40-80 мм).

Бір қатардағы көршілес жұмыс органдарының арасындағы арақашықтық олардың қатардағы санына, қатар санына және орналасу схемасына байланысты

[7, 95-106 бб.]. Сондықтан, себу әдісі бойынша орнатылған қатар аралығын ескере отырып, жұмыс органдарының санын анықтау керек.

Кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі жұмыс органдарының саны сепкіштің алым еніне байланысты. Зерттеулердің қорытындысына сәйкес [7, 104-105 бб.], 3,4 тарту класстарына жататын тракторға кең алымды сепкіштің алым ені 7 м-ге дейін болу керек. Кішігірім шаруа қожалықтарының құрамында, көбінен 3 тарту класына жататын тракторлар болғандықтан, кең алымды сепкіштің алым енін B = 6 м шамасында алынады.

Тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым енгізуші жұмыс органдарының саны төмендегі формула бойынша анықталады:

$$n = \frac{B}{z} \tag{6}$$

мұндағы, n – тұқым енгізуші жұмыс органдарының саны, B – кең алымды сепкіштің алым ені, z – қатар арлығының мәні.

$$n = \frac{6}{0{,}228} = 26$$

Бір қатардағы көршілес жұмыс органдарының арасындағы арақашықтық z_c, келесі формуламен анықталады:

$$z_c = (n_c + 1) \cdot z$$

мұндағы, n_c – бір қатардағы көршілес жұмыс органдары арасындағы жұмыс органдары саны (2–4).

$$z_c = (2 + 1) \cdot 0{,}228 = 0{,}684 \text{ м}$$

Тұқым енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналастыру алдын ала таңдалып жобаланған схема бойынша жүргізіледі. Орналастыру схемасын құрастырғанда жұмыс органдарының алым ені в, қатар аралығының мәні z және көмкеру көрсеткіші с ескеріледі.

Тұқым енгізу бөлігінің ұзындығын төменде келтірілген формуламен анықтаймыз:

$$L_{зч} = (m + 1) \cdot L_{min} \tag{8}$$

мұндағы, m – бір секциядағы қатар саны (3,4).

$$L_{зч} = (3 + 1) \cdot 0{,}5 = 2\ м$$

Жұмыс органдарының қатарлары арасындағы минималды қашықтық $0{,}4 \leq L_{min} \leq 0{,}8(0{,}5)$ м аралықты қамтығандықтан, Lпч нығыздаушы жұмыс органын оңтайлы орналастыру арақашықтығын осы шамаға мәндес (0,5 м) аламыз.

Нәтижелер және талқылау

Шетелдік кең алымды сепкіштердің тұқым енгізу бөлігінің негізгі конструктивтік және технологиялық көрсеткіштерін есептеулері мен схемалары көбісі еркін қолданысқа берілмеген. Өйткені, бұл мәліметтер конструкторлық құжаттамаларда ғана көрсетіледі. Еркін қолданыстағы берілген зерттеулерді қарастыру барысында олардан бірнеше кемшіліктер байқалған.

Алғашқы қарастырылған зерттеуде бір қатардағы жұмыс органдарының арасындағы көрсеткіш схемада белгіленбеген, есептеулері көрсетілмеген. Тұқым енгізу бөлігіндегі жұмыс органдарының орналасуынын жалпы схемасы берілмеген. Қатар аралығындағы минималды арақашықтықты негіздеу барысында, жұмыс органының жылдамдығы мен өңдеу тереңдігіне тәуелділігі ескерілмеген [1, 2-4 б.].

Келесі жұмыста, тұқым енгізу бөлігіндегі әр түрлі жұмыс органдары орналастырылған. Олардың орналасу заңдылығы мен есептеулері берілмеген. Жұмыс органдарының тұқым енгізу бөлігіндегі орналасу схемасы жасалмаған [2, 2-3 б.].

Сондықтан, кең алымды сепкіштің негізгі конструктивтік және технологиялық көрсеткіштерін есептеу және жұмыс органдарынын орналасу схемасын негіздеу, өзге зерттеулердегі кемшіліктерді ескеріп жобалау өзекті мәселе болып табылды.

Жоғарыда жасалған есептеулер барысында келесідей нәтежиелер алынды:

– кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігінің қабылданған оңтайлы алым енінде (6,0 м), тұқым енгізу бөлігі үш секцияға бөлуге болады, бір ортаңғы және екі бүйірлік;

– ортаңғы секцияның алдына тіркеме, ал ортасына транспорттық дөңгелектер орнатылады;

– әр секцияның алдына тереңдікті орнату дөңгелектері, ал артына нығыздаушы жұмыс органдары бекітіледі;

– ортаңғы секцияда төрт қатар тұқым енгізуші жұмыс органдары орналасқан, ал бірінші мен төртінші қатарда төрт жұмыс органынан және екінші мен үшінші қатарда үш жұмыс органынан орнатылған;

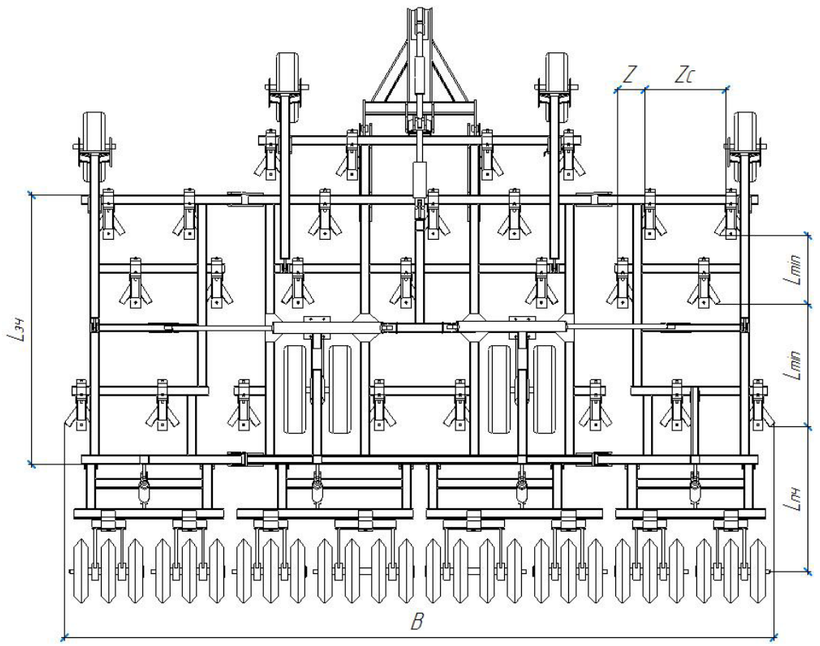
– бүйір секцияларында төрт қатар жұмыс органдары орналасқан және әр қатарда екі жұмыс органы орнатылған.

Табылған мәндер кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігінің негізгі конструктивтік және технологиялық көрсеткіштері болып табылады. Есептелінген көрсеткіштер төмендегі 3 – кестеде берілген.

3-кесте – Кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігінің негізгі конструктивтік және технологиялық көрсеткіштері

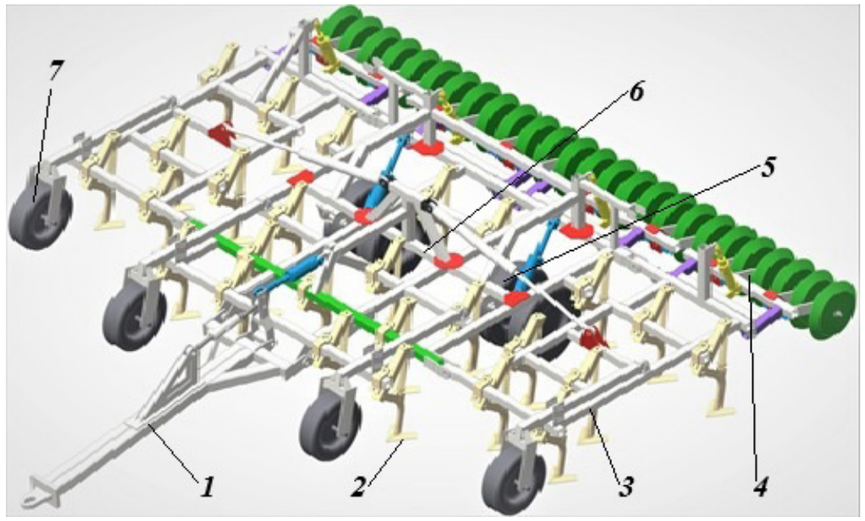
Негізгі көрсеткіштер	Ортаңғы секция	Бүйірлік секция
Конструктивтік		
Секции саны, дана	1	2
Алым ені *B*, м	3,2	1,4
Жұмыс органдарының саны *n*, дана	14	6
Секция ұзындығы $L_{зч}$, м	2,5	2
Технологиялық		
Жұмыс жылдамдығы *V,* м/с	1,6 - 3,2	
Қатар аралығы *z*, м	0,228	
Қатар саны m, дана	4	3
Қатар аралығындағы минималды арақашықтық L_{min}, м	0,4-0,8 (0,5)	
Қатардағы көршілес жұмыс органдарының арасындағы арақашықтық z_c, м	0,456-0,912	0,684
Нығыздаушы жұмыс органын орналастыру арақашықтығы $L_{пч}$, м	0,5 кем емес	

Есептеулер жүргізу нәтижесінде, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі жұмыс органдарының оңтайлы орналасуы схемасы негізделді (сурет 5).



5-сурет – Жобаланған кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігі:
$L_{зч}$ – секция ұзындығы, z – қатар аралығы, z_c – қатардағы көршілес жұмыс органдарының арасындағы арақашықтық,
L_{min} – қатар аралығындағы минималды арақашықтық,
$L_{пч}$ – нығыздаушы жұмыс органын орналастыру арақашықтығы, В – алым ені

Негізделген схема бойынша кең алымды сепкіштің 3-Д моделі нұсқасы жасалды (сурет 6).



6-сурет – Жобаланған кең алымды сепкіштің кең алымды сепкіштің 3-Д моделі:
1 – тіркеме, 2 – жұмыс органдары, 3 – бүйір секция,
4 – нығыздаушы жұмыс органдары, 5 – транспорттық дөңгелектер,
6 – ортаңғы секция, 7 – тереңдікті орнату дөңгелектері

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу 217 «Ғылымды дамыту»: AP08856407 «Тұқым себуге және минералды тыңайтқыштарды әр түрлі тереңдікке саралап енгізуге арналған кең алымды сепкіш әзірлеу» грант жобасы аясында 2020-2022 жылдар аралығында және «BR24892784» 1336 ғылыми-техникалық бағдарламасы шеңберінде жүргізілді.

Қорытынды

Жоғарыда жүргізілген жұмыстар нәтежиесінде кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым және минералды тыңайтқыш енгізуші жұмыс органдарының оңтайлы орналасуын есептеліп негізделді. Анықталған көрсеткіштер тұқым енгізу бойынша қойылатын агротехникалық талаптарды толығымен орындауға, тарту кедергісі мен отын шығының азайтуға мүмкіндік береді.

Кең алымды сепкіштің жұмыс істеу барысын және технологиялық операцияны орындау сапасын тексеру үшін «Солтүстік Қазақстан ауыл шаруашылық тәжірибе станциясы» ЖШС-нің егін алқаптарында далалық сынақтар жүргізілді (сурет 7).

Далалық сынақтар барысында сепкіштің агротехникалық және энергетикалық көрсеткіштері бағаланды. Агротехникалық көрсеткіштерді бағалау МЕСТ 31345 [15] бойынша, ал энергетикалық көрсеткіштер МЕСТ Р 52777 жүргізілді.

7-сурет – Эксперименталды кең алымды сепкіштің далалық сынақтары

Агротехникалық сынақтардың нәтижелері бойынша кең алымды сепкіштің себу тереңдігінің біркелкілігі бойынша сериялық сепкіштен 3,7 %-ға (тиісінше 13,1 % және 16,8 %) асып түсетіні, сонымен қатар нақты орташа тереңдік қабатында және екі іргелес қабатта себілген тұқымдар санының көрсеткіші бойынша сериялық сепкіштен 4 %-ға (95 % және 91 %) асып түседі анықталды.

Энергетикалық көрсеткіштердің нәтижелері бойынша, тұқым себу тереңдігі және қозғалу жылдамдығы артуымен сепкіштің тарту кедергісі өсетіні анықталды. Тұқым себу тереңдігі мен сепкіштің қозғалу жылдамдығына артқан сайын трактордың отын шығынының артуы байқалады. Далалық сынақтар барысында, эксперименттік кең алымды сепкіштің тарту кедергісі сериялық тарту кедергісінен 2–3 %-ға артық екені анықталды.

Алайда, далалық сынақтар барысында, кең алымды сепкіштің тұқым енгізу бөлігіндегі тұқым және минералды тыңайтқышты әртүрлі тереңдікке саралап енгізуші жұмыс органын қолдану нәтежиесінде, егіннің жылдық өнімділігі 25–30 %-ға артты. Сондықтан, жылдық экономикалық әсер жоғарғы нәтежие берді.

Ұсынылып отырылған кең алымды сепкіш еліміздің жел эрозиясы қауіпі бар, топырақ-климаттық жағдай ұқсас басқа да аймақтарында қолданыла алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Parkhomenko, G., Kambulov, S., Rykov, V., Podlesny, D, Pleskacheva, O., Gvozdikova, A.** The layout of the cultivator’s working bodies. BIO Web Conf. Volume 126, 2024. International Conference on Advance in Energy, Ecology and Agriculture (AEEA2024). – https://doi.org/10.1051/bioconf/202412601025.

2 **Alimova, F. A., Primkulov, B. Sh.** Features of the choice of working bodies for the technology of strip tillage when sowing re-crops. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1076, II International conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure Solutions 18/05/2022 – 20/05/2022 Tashkent, Uzbekistan. – https://doi/10.1088/1755-1315/1076/1/012001.

3 **Muhammad Usama Yaseen, Shahzad Ahmad, Maqsood Ahmad, John M. Long, Hafiz Ali Raza, Hassan Iftekhar, Sikander Ameer, Dabira Ogunbiyi.** AgriEngineering 2024, 6(3), P. 2445–2469. – https://doi.org/10.3390/agriengineering6030143.

4 **Khudoyberdiev, T., & Abdumannopov, A.** The influence of the angle of entry of the looking paw into the soil on its driving resistance. Science and innovative development, 2022. – 5(3). – P. 36–44. – https://ilm-fan-journal.csti.uz/index.php/journal/article/view/291.

5 **Belousov, S.** MATEC Web Conf., Volume 329, 2020, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020). – https://doi.org/10.1051/matecconf/202032905013.

6 Стерневые сеялки [Текст]: [Электронный ресурс]. – https://www.kaicc.ru/otrasli/mehanizacija/sternevye-seyalki

7 **Утеулов, К. Т., Адуов, М. А., Капов, С. Н., Нукушева, С.А., Исенов К. Г.** Анализ схем растановок лаповых рабочих органов на широкозахватных сеялках ближнего и дальнего зарубежья // Вестник ВКТУ, Инженерия и инженерное дело. – Усть-Каменогорск. – Т. 3(105), сентябрь, 2024. – С. 95–106.

8 2022 жылы аяқталған ғылыми зерттеулер (қолданбалы, №178). №AP08856407 «Тұқымдарды себуге және минералды тыңайтқыштарды әр-түрлі берілген тереңдіктерге дифференциалды енгізуге арналған кең алымды сепкішті жасау» [Текст] // [Электронный ресурс]. – https://www.ncste.kz/kz/informacziya-po-zavershennyim-nauchnyim-issledovaniyam-2022-g.

9 **Володя, К.** Пневматическая широкозахватная сеялка с Центральной высевающей системой // «Сейфуллин оқулары – 18: « Жастар және ғылым – болашаққа көзқарас» халықаралық ғылыми -практикалық конференция материалдары = Материалы международной научнопрактической конференции «Сейфуллинские чтения – 18: « Молодежь и наука – взгляд в будущее». – 2022. – Т.I, Ч.II. – Б. 4–6 бб.

10 **Чередниченко, А. В., Чередниченко, А. В., Чередниченко, В. С.** Климатические колебания температуры и осадков в северном казахстане // Вестник ВГУ, серия: география. Геоэкология, 2019. – № 2.

11 **Касенова, А. Ж., Шушпаева, А. Е.** Эрозия почв в северном казахстане // «М. А. Гендельманның 110 жылдығына арналған «Сейфуллин оқулары – 19» халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының материалдары = Материалы международной научно-практической конференции «Сейфуллинские чтения – 19», посвященной 110 – летию М. А. Гендельмана». – 2023. – Т.I, Ч.III. – С. 317–320.

12 Патент на изобретение: Сошник для внесения семян и удобрений в разные заданные глубины заделки, № 36760.

13 **Полищук, Ю. В.** Обоснование технологических и конструктивных параметров рыхлителя с комбинированными рабочими органами для основной обработки многолетних трав. – Дисс. канд. техн. наук. – Челябинск, 2003. – С. 192.

14 **Лукомский, К. И.** Разработка почвообрабатывающего посевного агрегата для тракторов тягового класса 2. – Дис. канд. техн. наук. – Челябинск, 2008. – С. 59.

15 ГОСТ 31345 – 2017. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ (МГС). Техника сельскохозяйственная. Сеялки тракторные. Методы испытаний. (принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. № 52)) Издание официальное : - М. : Стандартинформ, 2018.

REFERENCES

1 **Parkhomenko, G., Kambulov, S., Rykov, V., Podlesny, D, Pleskacheva, O., Gvozdikova, A.** The layout of the cultivator's working bodies. BIO Web Conf. Volume 126, 2024. International Conference on Advance in Energy, Ecology and Agriculture (AEEA2024). – https://doi.org/10.1051/bioconf/202412601025.

2 **Alimova, F. A., Primkulov, B. Sh.** Features of the choice of working bodies for the technology of strip tillage when sowing re-crops. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1076, II International conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure Solutions 18/05/2022 – 20/05/2022 Tashkent, Uzbekistan. – https://doi/10.1088/1755-1315/1076/1/012001.

3 **Muhammad Usama Yaseen, Shahzad Ahmad, Maqsood Ahmad, John M. Long, Hafiz Ali Raza, Hassan Iftekhar, Sikander Ameer, Dabira Ogunbiyi.** AgriEngineering 2024, 6(3), P. 2445–2469. – https://doi.org/10.3390/agriengineering6030143.

4 **Khudoyberdiev, T., & Abdumannopov, A.** The influence of the angle of entry of the looking paw into the soil on its driving resistance. Science and innovative development, 2022. – 5(3). – P. 36–44. – https://ilm-fan-journal.csti.uz/index.php/journal/article/view/291.

5 **Belousov, S.** MATEC Web Conf., Volume 329, 2020, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020). – https://doi.org/10.1051/matecconf/202032905013.

6 Sternevy`e seyalki [Stubble seed drills] [Text] // [Electronic resource]. – https://www.kaicc.ru/otrasli/mehanizacija/sternevye-seyalki

7 **Uteulov, K. T., Aduov, M. A., Kapov, S. N., Nukusheva, S. A., Isenov, K. G.** Analiz sxem rastanovok lapovy`x rabochix organov na shirokozaxvatny`x seyalkax blizhnego i dal`nego zarubezh`ya [Analysis of the arrangement schemes of the paw working organs on wide-range seeders of the near and far abroad] // Vestnik VKTU, Inzheneriya i inzhenernoe delo. – Ust`-Kamenogorsk. – Vol. 3(105), sentyabr`, 2024. – P. 95–106].

8 2022 zhy`ly` ayaқtalqan ғy`ly`mi zertteuler (қoldanbaly`, №178). №AR08856407 «Tuқy`mdardy` sebuge zhane mineraldy` ty`najtқy`shtardy` ar-tyrli berilgen terendikterge differencialdy` engizuge arnalqan ken aly`mdy` sepkishti zhasau»

[Scientific research (applied, № 178) completed in 2022. № AR08856407 'Development of a wide-chamber seeder for sowing seeds and the differential application of mineral fertilisers at various specified depths'] [Text] // [Electronic resource]. – https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=372012.

9 **Volodya, K.** Pnevmaticheskaya shirokozaxvatnaya seyalka s Central`noj vy`sevayushhej sistemoj [Pneumatic wide-coverage seed drill with a central sowing system] // «Sejfullin oqulary` – 18: « Zhastar zhane qy`ly`m – bolashaqqa qozqaras» xaly`qaraly`q qy`ly`mi -praktikaly`q konferenciya materialdary` = Materialy` mezhdunarodnoj nauchnoprakticheskoj konferencii «Sejfullinskie chteniya – 18: «Molodezh` i nauka – vzglyad v budushhee». – 2022. – T.I, Ch.II. – B. 4–6 bb.

10 **Cherednichenko, A. V., Cherednichenko, A. V., Cherednichenko, V. S.** Klimaticheskie kolebaniya temperatury` i osadkov v severnom kazaxstane [Climatic fluctuations in temperature and precipitation in northern Kazakhstan] // Vestnik VGU, seriya: geografiya. Geoe`kologiya, 2019. – № 2.

11 **Kasenova, A. Zh., Shushpaeva A. E.** E`roziya pochv v severnom kazaxstane [Soil erosion in northern Kazakhstan] // «M.A. Gendel`manny`ң 110 zhy`ldy`qy`na arnalғan «Sejfullin oqulary` – 19» xaly`qaraly`q gy`ly`mi-praktikaly`q konferenciyasy`ny`n materialdary` = Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sejfullinskie chteniya – 19», posvyashhennoj 110 – letiyu M. A. Gendel`mana» – 2023. – T.I, Ch.III. – P. 317–320.

12 Patent na izobretenie: Soshnik dlya vneseniya semyan i udobrenij v razny`e zadanny`e glubiny` zadelki [Patent for invention: Coulter for applying seeds and fertilisers at various specified depths] // № 36760.

13 **Polishhuk, Yu. V.** Obosnovanie texnologicheskix i konstruktivny`x parametrov ry`xlitelya s kombinirovanny`mi rabochimi organami dlya osnovnoj obrabotki mnogoletnix trav [Justification of technological and design parameters of a ripper with combined working bodies for basic processing of perennial grasses] // Diss. kand. texn. nauk. – Chelyabinsk, 2003. – P. 192].

14 **Lukomskij, K. I.** Razrabotka pochvoobrabaty`vayushhego posevnogo agregata dlya traktorov tyagovogo klassa 2 [Development of a soil-tilling seeding unit for tractors of traction class 2] // Dis. kand. texn. nauk. – Chelyabinsk, 2008. – P. 59.

15 GOST 31345 – 2017. MEZhGOSUDARSTVENNY`J SOVET PO STANDARTIZACII, METROLOGII I SERTIFIKACII (MGS). Texnika sel`skoxozyajstvennaya. Seyalki traktorny`e. Metody` ispy`tanij. (prinyat mezhgosudarstvenny`m sovetom po standartizacii, metrologii i sertifikacii [GOST 31345 – 2017. INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDISATION, METROLOGY AND CERTIFICATION (MGS). Agricultural machinery. Tractor seeders. Test methods] // (protokol ot 30 noyabrya 2017 g. № 52)) Izdanie oficial`noe: - M.: Standartinform, 2018.

15.04.25 ж. баспаға түсті.
22.04.25 ж. түзетулерімен түсті.
17.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. Т. Утеулов[1], М. А. Адуов[2], С. А. Нукушева[3]
[1,2,3]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 15.04.25.
Поступило с исправлениями 22.04.25.
Принято в печать 17.11.25.

РАСЧЕТ И ОБОСНОВАНИЕ РАССТАНОВКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ В ЗАДЕЛЫВАЮЩЕЙ ЧАСТИ ШИРОКОЗАХВАТНОЙ СЕЯЛКИ

В статье были рассчитаны и обоснованы оптимальные значения показателей по расположению рабочих органов по внесению семян и минеральных удобрений в заделывающей части. Данные показатели позволяют в полной мере выполнить агротехнические требования по внесению семян и минеральных удобрений, снизить тяговое сопротивление и расход топлива.

Во-первых, были рассмотрены устройство широкозахватной сеялки, его основные части, рабочие органы для внесения семян и минеральных удобрений и ее виды. Также, при проектировании широкозахватной сеялки были изучены особенности почвенно-климатических условий региона, в которой планируется применение данная техника. С учетом особенностей почвенно-климатических условий, были выбраны рабочие органы по внесению семян и минеральных удобрений, которые полностью выполняют условия агротехнических требований.

Во-вторых, определены основные параметры для расчета, необходимые для оптимального расположения рабочих органов для внесения семян и минеральных удобрений. Далее, по данным расчетов была обоснована схема оптимального расположения рабочих органов по внесению семян и минеральных удобрений в задделывающей части широкозахватной сеялки.

В последнюю очередь, по данным расчетов по обоснованию оптимальной расстановки рабочих органов в заделывающей части широкозахватной сеялки для высева семян и дифференцированного внесения минеральных удобрений в разные заданные глубины заделки была спроектирована 3Д-модель и изготовлен экспериментальный образец. Далее, были проведены полевые испытания для проверки хода работы широкозахватной сеялки и качества выполнения технологической операции.

В ходе полевых испытаний оценивались агротехнические и энергетические показатели сеялки. Оценка агротехнических показателей проводилась по ГОСТ 31345, а энергетических по ГОСТ Р 52777.

Ключевые слова: широкозахватная сеялка, заделывающая часть, ветровая эрозия, ширина захвата, число рабочих органов, боковая секция, прикатывающие рабочие органы, схема расстановки.

K. T. Uteulov[1], M. A. Aduov[2], S. A. Nukusheva[3]
[1,2,3]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 15.04.25.
Received in revised form 22.04.25.
Accepted for publication 17.11.25.

CALCULATION AND JUSTIFICATION OF THE ARRANGEMENT OF WORKING BODIES IN THE SEALING PART OF A WIDE COVERAGE SEED DRILL

In the article, optimal values of indicators for the location of working bodies for the application of seeds and mineral fertilizers in the sealing part were calculated and justified. These indicators make it possible to fully meet the agrotechnical requirements for the application of seeds and mineral fertilizers, reduce traction resistance and fuel consumption.

First, the device of a wide-range planter, its main parts, working bodies for applying seeds and mineral fertilizers and its types were considered. Also, when designing a wide-range planter, the features of the soil and climatic conditions of the region in which this technique is planned to be used were studied. Taking into account the peculiarities of soil and climatic conditions, working bodies for the application of seeds and mineral fertilizers were selected, which fully comply with the conditions of agrotechnical requirements.

Secondly, the main calculation parameters necessary for the optimal location of the working bodies for applying seeds and mineral fertilizers have been determined. Further, according to the calculations, the scheme of the optimal location of the working bodies for the application of seeds and mineral fertilizers in the back-cultivating part of the wide-range planter was substantiated.

Last of all, according to calculations to substantiate the optimal arrangement of working bodies in the sealing part of a wide-range planter for sowing seeds and differentiated application of mineral fertilizers to different specified sealing depths, a 3D model was designed and an experimental sample was made. Further, field tests were carried out to verify the operation of the wide-range planter and the quality of the technological operation. During the field tests, the agrotechnical and energy parameters of the seeder were evaluated. The assessment of agrotechnical indicators was carried out according to GOST 31345, and energy indicators according to GOST R 52777.

Keywords: wide-reach planter, sealing part, wind erosion, gripping width, number of working bodies, side section, rolling working bodies, arrangement scheme.

МЕТАЛЛУРГИЯ

МРНТИ 53.31.01
https://doi.org/10.48081/GMET6707

Р. Ж. Абуова[1], *Г. А. Буршукова[2], Е. С. Меркибаев[3], Р. С. Акпанбаев[4], Н. Бахытұлы[5]
[1]Международная образовательная корпорация, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2,3,4]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;
[5]Институт металлургии и обогащения, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8208-7987
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9200-2780
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3869-6835
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3566-4563
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3087-0616
*e-mail: gulziya.burshukova@gmail.com

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И АМПЛИТУДНОЗАВИСИМОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ НОВЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ УДАРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В статье представлены результаты комплексного исследования акустических и демпфирующих свойств новых легированных сталей ХСМ-1, ХСМ-2 и ХСМ-3, разработанных для снижения уровней звукоизлучения деталей машин, работающих в условиях ударных нагрузок. Актуальность работы обусловлена высокой распространённостью производственного шума и его негативным влиянием на слуховой анализатор и сердечно-сосудистую систему. Эксперимент включал выплавку и термообработку сплавов, определение механических характеристик, а также измерение уровней звукового давления в октавных полосах частот 125–8000 Гц при ударном возбуждении стальными шарами различного диаметра. Установлено, что новые стали демонстрируют пониженные уровни звукоизлучения по сравнению со стандартными марками Ст.10, Ст.20 и Ст.45. Кроме того, выявлен выраженный эффект амплитуднозависимого демпфирования, достигающий 7–9 дБ в отдельных диапазонах. Полученные результаты подтверждают перспективность применения сталей ХСМ-1–ХСМ-3 в конструкциях, требующих повышенной звукоизоляции, устойчивого подавления вибраций и эффективного рассеяния энергии ударных колебаний. Такие материалы способны повышать долговечность оборудования, снижать акустическую нагрузку на персонал и обеспечивать более стабильные условия эксплуатации в промышленных системах, что особенно важно для современных технологических процессов высокого уровня сложности и повышенных требований к безопасности.

Ключевые слова: демпфирующие сплавы, звукоизлучение, уровни звукового давления, легированные стали, виброакустические свойства.

Введение

Неблагоприятные последствия воздействия шума на организм человека хорошо изучены и подтверждены многочисленными исследованиями. Мировой опыт показывает, что шум является одним из наиболее распространённых производственных факторов, вызывающих нарушения в центральной нервной и сердечно-сосудистой системах. Одним из наиболее серьёзных последствий длительного воздействия интенсивного шума является профессиональная тугоухость, развитие которой зависит от характера, стажа работы, возраста и продолжительности воздействия. Постоянный шум приводит не только к снижению слуха, но и к появлению сопутствующих симптомов – звону в ушах, головной боли, повышенной утомляемости, снижению работоспособности. Наиболее чувствительны к шуму люди старших возрастов: до 27 лет реагируют 46 % людей, 28–37 лет – 57 %, 38–57 лет – 62 %, а в возрасте 58 лет – 72 % [1, с. 20–29].

В работе [2, с. 158-164] представлены результаты исследований влияния шума с частотой 63 Гц на горнорабочих и испытуемых добровольцах. Изучение сердечно-сосудистой, нервно-мышечной и терморегуляционной систем показало достоверное повышение порогов слуховой чувствительности на частотах 2000–8000 Гц (на 8,6–17,8 дБ) после одного часа воздействия шума, а также увеличение частоты сердечных сокращений.

По данным [3, с. 23–26], у сварщиков машиностроительных предприятий неврит слуховых нервов встречается в 20 % случаев, профессиональная тугоухость – у 57–67 % работников, что составляет 7–10 % всех профессиональных заболеваний. Согласно, около 50 % случаев профессиональной тугоухости приходится на рабочих кузнечно-прессовых, сварочных и межсборочных цехов (85 % из них – мужчины со стажем более 10 лет). На прокатных производствах частота шумовой тугоухости увеличивается с 20 до 78 % по мере роста стажа. По данным ВОЗ, тугоухость занимает первое место среди профессиональных заболеваний, встречаясь у 10–20 % рабочих. В США более 8 млн человек имеют дефекты слуха, а в Германии тугоухость также входит в число ведущих профессиональных патологий. Заболевание развивается постепенно, обычно после трёх лет работы в условиях повышенного шума, при этом у 14–17 % работников отмечается значительное снижение слуха [4, с. 127–133].

Шум оказывает влияние не только на слуховой анализатор, но и на сердечно-сосудистую систему, вызывая повышение артериального давления, нарушения сердечного ритма и изменения электрокардиограммы. Согласно данным [5, с.13-18], шум, не несущий информационной нагрузки, вызывает эрготропную реакцию – сужение сосудов и снижение удельного объёма крови. У работников со стажем менее 10 лет повышенное давление (160/95 мм рт. ст.) встречается на 9 % чаще, чем в контрольной группе, а при стаже 20 лет – на 28 % [6, с. 69–73].

Согласно данным [7, с. 172–178], перспективным направлением снижения шума является использование железоуглеродистых легированных сплавов с повышенными демпфирующими свойствами («тихих сплавов»), предназначенных

для деталей машин, работающих в режиме ударных нагрузок. Содержание легирующих элементов (0,8–1,8 % Si; 0,6–0,9 % Ni; 1,15–1,4 % Mn; 0,1–0,3 % Cr; 0,2 % Zr; 0,1–0,4 % B) определено методом математического планирования эксперимента (метод Бокса–Вилсона). Разработанные сплавы по демпфирующим характеристикам превосходят стандартные стали Ст.25 и Ст.40.

Анализ работы [8, с.158] показывает, что наиболее эффективными легирующими элементами для повышения демпфирующих свойств являются кремний, марганец и хром. Si оказывает значительное влияние на состав и характер неметаллических включений и способствует графитизации стали, что обеспечивает необратимое рассеяние энергии колебаний. Использование Si для легирования способствует улучшения химического состава стали, а также графитизацию выплавленной стали.

В работах [9;10;11;12] приведены результаты исследований физико-механических и акустических свойств разработанных сталей УРС-1–УРС-5, показано их преимущество по пределу текучести (≥600 МПа), пластичности и внутреннему трению (до $10{,}621 \cdot 10^4$ против $9{,}565 \cdot 10^4$ у стали Ст.15). Установлено, что термообработка (отжиг, закалка, низкий отпуск) существенно повышает демпфирующие характеристики, ускоряя затухание звука в металлических деталях.

Исследования [13;14] подтверждают, что форма и размеры деталей, а также место соударения элементов значительно влияют на параметры звукоизлучения. Наибольший эффект демпфирования наблюдается на частотах 63–250 Гц (11,5–14,2 дБ).

Учитывая результаты экспериментальных исследований, использование демпфирующих сплавов способствует эффективному снижению шума и позволяет совершенствовать их акустические свойства. При определении демпфирующих характеристик требуется комплексное исследование физико-химических, акустических и диссипационных свойств материалов. Способность поглощать энергию звуковых колебаний определяется внутренней структурой, химическим составом и особенностями технологической обработки.

Методы и материалы

Для испытаний использованы стандартные образцы из сталей Ст.45, Ст.20, Ст.10 и новые демпфирующие сплавы легированные Cr, Si и Mn (ХСМ-1, ХСМ-2, ХСМ-3).

В качестве основы для выплавленных сталей выбраны низкоуглеродистые стали. С помощью диаграмм (Fe-C, Fe-Cr, Fe-Mn, Fe-Si) определяли состав химического состава сталей. Добавки варьировались в пределах: хром – 1 %, марганец – 2,5–3 %, кремний – 2,5–3 %. Выбор этих элементов обусловлен их влиянием на структуру и свойства сталей: хром повышает твердость, прокаливаемость и прочность; марганец улучшает пластичность и повышает предел текучести [17]; кремний способствует графитизации, увеличивает предел текучести и способствует рассеянию энергии колебаний.

Для выплавления экспериментальных образцов использовали индукционную высокочастотную печь в графитовом тигле. В качестве исходной шихтовой основы использовалась следующие элементы: сталь марки Ст.3; марганец (содержание 98 %), ферросилиций (содержание 75 %) и феррохром (содержание 60 %). Для корректировки содержания углерода применялся синтетический чугун (3,9 % С). Отливки размером 210×210×115 мм подвергались горячей ковке (нагрев 1100 °С, выдержка 0,5 ч).

Термообработка включала нормализацию при нагреве до температуры + 50 °С начала образования аустенита, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе и закалку при нагреве до температуры + 50 °С начала образования аустенита, выдержка 0,5 ч, охлаждение в воде. Двойной отжиг (920–970 °С, выдержка 1,5 ч, медленное охлаждение). Нагрев проводился в кварцевых ампулах при вакууме ~10^{-3} атм.

Поверхности обрабатывались до 5-го класса точности, при этом отклонения от заданных размеров не превышали 0,1 мм. На одном оборудовании выполнялась выплавка, термообработка и механическая обработка по единой технологической схеме.

Состав с концентрацией легирующих элементов стандартных сталей и выплавленных сплавов, а также их механические свойства приведены в таблицах 1 и 2.

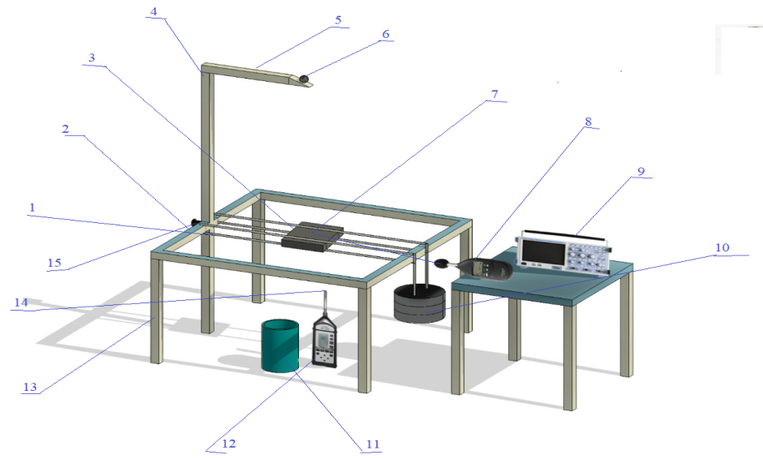
Таблица 1 – Состав с концентрацией легирующих элементов стандартных сталей и выплавленных сплавов

№ п/п	Марка сплавов, образцов	Химический состав, % вес								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	As
						не более				
1	Ст.45	0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	0,25	0,04	0,035	0,25	-
2	Ст.20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	<0,25	0,25	0,04	0,035	0,25	0,08
3	Ст.10	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	<0,15	0,25	0,04	0,035	0,25	0,08
5	ХСМ-1	0,18	5,38	4,5	3,35	0,3	0,05	0,04	0,3	0,08
6	ХСМ-2	0,20	5,22	4,7	4,35	0,3	0,05	0,04	0,3	0,08
7	ХСМ-3	0,20	2,42	3,53	6,95	0,3	0,05	0,04	0,3	0,08

Таблица 2 – Механические свойства стандартных сталей и выплавленных сплавов

№ п/п	Марка сплавов	$\sigma_{0,2}$	KCU, Дж/см	δ_5	ψ	$\sigma_{вр}$, МПа	$\sigma_{ви}$, МПа	$\sigma_{в\ сж}$, Мпа	Твердость по Бринеллю H_B
				%					
				не менее					
1	Ст.45	245	39	19	42	470	-	-	143-179
2	Ст.20	175	59	24	50	350	-	-	101-143
3	Ст.10	175	98	23	55	515	-	-	<137
5	ХСМ-1	350	62	29	52	350			180
6	ХСМ-2	335	60	28	48	335			175
7	ХСМ-3	340	65	35	60	340			195

На основе анализа установок для исследования акустических (уровень звука, уровень звукового давления) свойств сплавов было выбрано устройство для комплексного исследования акустических и вибрационных свойств пластинчатых и трубчатых образцов стали и чугуна (рисунок 1) [18].



1 – капроновые нити; 2 – рама; 3 – пластинчатый образец;
4 – стойка рамы; 5 – наклонная плоскость; 6 – шар-ударник;
7 – вибродатчик шумомера компании «Bruel&Kjer»; 8 – шумомер компании «Bruel&Kjer»модели 2204 с октавным фильтром модели 1613; 9 – осциллограф С-18; 10 – груз; 11 – приемник шаров; 12 – шумомер «Октава 101А»;
13 – стойки рамы; 14 – микрофон шумомера «Октава 101А»;
15 – винт крепления стойки ударника
Рисунок 1 – Устройство для комплексного исследования акустических

Установка работала следующим образом: шар-ударник скатывался с наклонной плоскости и свободно падал в геометрический центр пластинчатого образца, после чего отскакивал в приемник, а шум от соударения фиксировался шумомером «ОКТАВА-101А». Подробное описание приведено в [18]. Образец, подвешенный в переплетении капроновых нитей с постоянным натяжением, а вся система – закреплена на раме с регулируемой высотой падения шара; использовались стальные шары-ударники ШХ15 диаметром 13,2, 16,0 и 18,3 мм, а размеры исследуемой пластины составляли 70×70×5 мм. Уровни звукового давления измерялись в октавных полосах частот 125–8000 Гц, среднее значение определялось по пяти измерениям, а звуковой импульс регистрировался запоминающим осциллографом PCS 500 для последующего анализа демпфирующих характеристик.

На рисунке 2 можно увидеть фотографию звукового импульса от соударения. Величина логарифмического декремента мала и может считаться равной относительному рассеянию энергии за период колебаний. Относительной уменьшение амплитуды за период δ, а энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому

$$\delta = \frac{\Delta E}{2E} \tag{1}$$

Формула соотношения между мерами внутреннего трения:

$$\varphi = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\Delta E}{2\pi E} = Q^{-1} \tag{2}$$

Логарифмический декремент выплавленного сплава находили по следующей формуле:

$$\delta = \frac{l}{n}\ln\frac{A_0}{A_n} = \frac{1}{43}\ln\frac{90}{70} = 0{,}0058 \tag{3}$$

где A_o – нач., max амплитуда звукового импульса;

$A_п$ – конеч., min амплитуда звукового импульса;

п – на экране осциллографа показанное число импульсов.

Среднее относительное рассеяние колебаний на исследуемом участке можно найти по формуле:

$$\psi = 2\delta = 0{,}0116 \tag{4}$$

Внутреннее трение определяется сдедующей по формуле [86]:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{0{,}0116}{2\pi} = 0{,}0018 \tag{5}$$

На рисунке 2 изображена осциллограмма при затухании акустического импульса при соударении, интервал времени экрана осциллогфа составляет 2 мс.

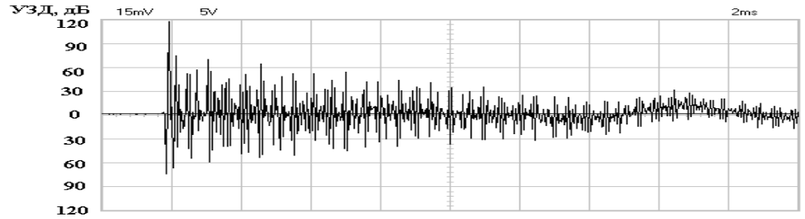


Рисунок 2 – Осциллограмма ХСМ-1

Результаты и обсуждение

Исследование демпфирующих свойств материалов проводилось по измерению звукоизлучения при соударении с шарами-ударниками различных диаметров. Перед началом исследования производили настройку измерительного прибора.

Звукоизлучение стандартных сталей (Ст.45, Ст.20, Ст.10) и новых демпфирующих образцов сталей (ХСМ-1, ХСМ-2, ХСМ-3) представлены на рисунках 3–5.

При исследовании образцов уровень звукового давления изменяется в пределах 47–89 дБ. Минимальные значения наблюдается при частоте 125 Гц, максимальные при 8000 Гц и по шкале «А». Наибольшие значения уровня звукового давления фиксируются при диаметре 18,3 с соударениях с шаром-ударником, а наименьшие – при диаметре 13,2 мм. У стандартных образцов сталей Ст.45, Ст.20 и Ст.10 максимумы уровни звука по характеристике «А» также соответствуют ударам шаром d=18,3 мм (83–89 дБ). Анализирую данные можно сказать чтоесть амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения (АЗДЗ): шар-ударник большей массы возбуждает меньший уровень УЗД, чем шар меньшей массы. Для стали Ст.45 эффект ΔАЗДЗ незначителен и проявляется на низких частотах – например, при 250 Гц: при ударе шаром d=13,2 мм УЗД=48 дБ, а при d=16 мм – 47 дБ (ΔАЗДЗ=1 дБ).

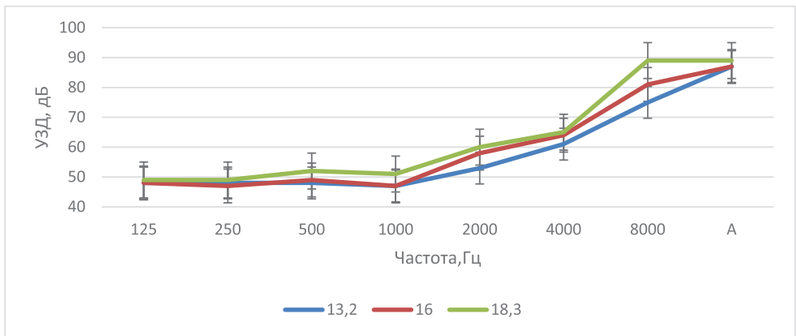


Рисунок 3 – Характеристики звукоизлучения образца Ст.45 при соударении

В соответствии с рисунками 4 и 5 эффект АЗДЗ у образцов Ст.20 и Ст.10 не обнаруживается.

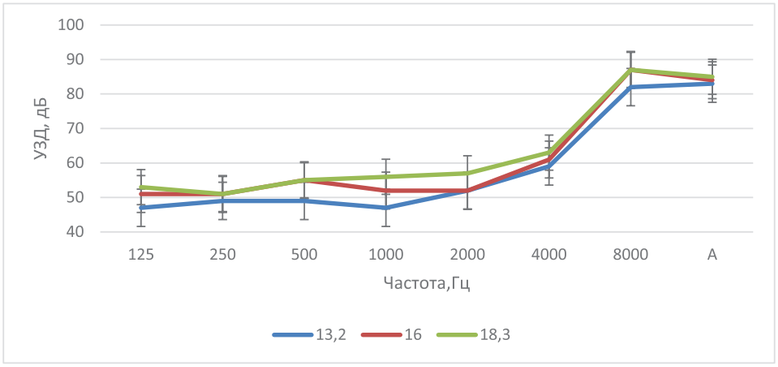


Рисунок 4 – Характеристики звукоизлучения образца Ст. 20 при соударении

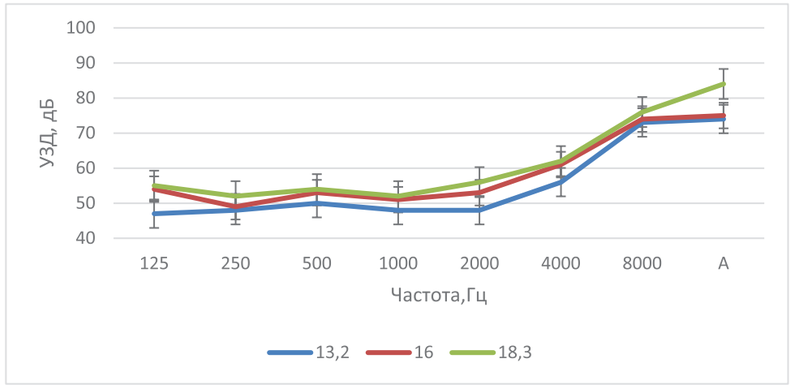


Рисунок 5 – Характеристики звукоизлучения образца Ст.10 при соударении

Результаты экспериментов показали, что при исследовании образцов уровни звукового давления изменяются в диапазоне (45–86 дБ), из них значения min (45 дБ) наблюдаются при частоте 250 Гц, а значения max (86–91 дБ) при 8000 Гц и по шкале «А». Наибольшие значения уровня звукового давления характерны при соударении с шаром-ударником диаметром 18,3 мм, а наименьшие значения при диаметре 13,2 мм. Для образцов ХСМ-1, ХСМ-2 и ХСМ-3 значения max уровней звука по характеристике «А» наблюдаются при ударах шаром диаметром 16 мм (75–86 дБ). Обнаружено амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения (АЗДЗ): при увеличении массы шара-ударника уровень звука снижается. Так, для образца ХСМ-1 эффект АЗДЗ составил 3–7 дБ в диапазоне частот 125–8000 Гц, а по шкале «А» – 1 дБ.

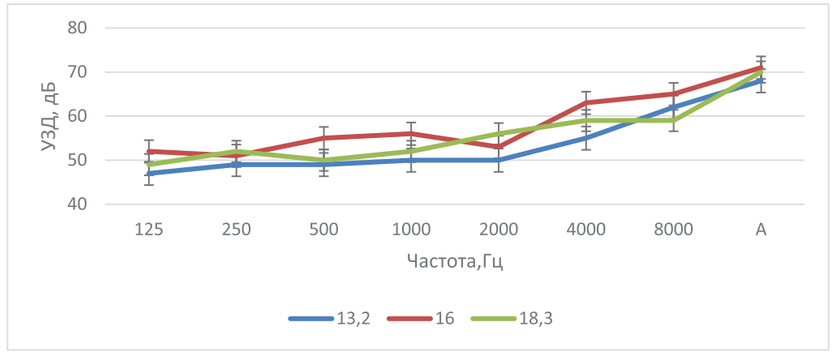


Рисунок 6 – Показатели звукоизлучения выплавленного образца ХСМ-1 при соударении с шаром ударником

На рисунке 7 приведены характеристики звукоизлучения разработанного образца ХСМ-2 при соударении.

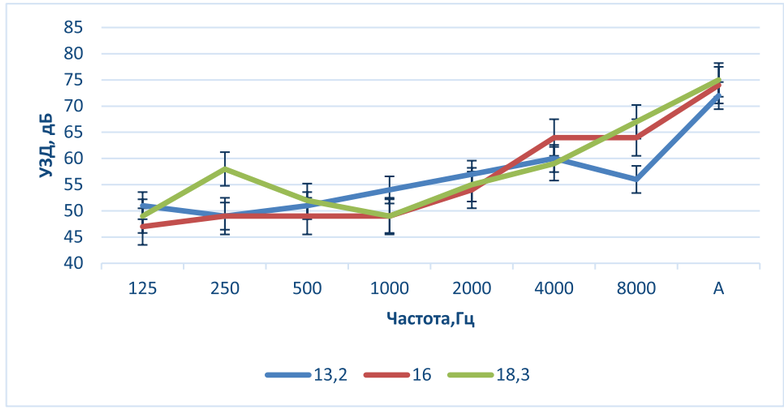


Рисунок 7 – Показатели звукоизлучения выплавленного образца ХСМ-2 при соударении с шаром ударником

Для образца ХСМ-2 установлено амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения (АЗДЗ): при увеличении диаметра шара-ударника уровень звукового давления уменьшается. На частотах 125–4000 Гц эффект ΔАЗДЗ составил 2–5 дБ (от 51 до 47 дБ при 125 Гц, от 57 до 54 дБ при 2000 Гц). Для образца ХСМ-3 наблюдается аналогичная зависимость: на частоте 500 Гц УЗД снижается с 48 до 47 дБ (ΔАЗДЗ=1 дБ), а при 1000 Гц – с 59 до 50 дБ (ΔАЗДЗ=9 дБ).

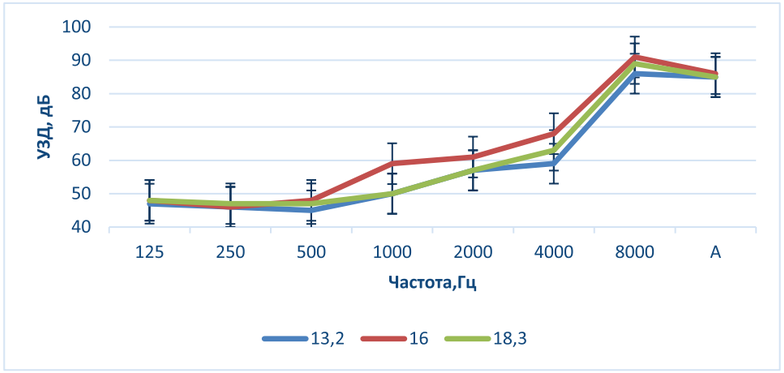


Рисунок 8 – Показатели звукоизлучения выплавленного образца ХСМ-2 при соударении с шаром ударником

Для образца ХСМ-3 выявлено амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения (АЗДЗ): при увеличении диаметра шара-ударника уровень звукового давления снижается. При частотах от 2000 до 8000 Гц эффект ΔАЗДЗ составил 1–5 дБ, а именно при частоте 2000 Гц (61-57)дБ и при частоте 8000 Гц (91-89) дБ, рассчитывая по шкале «А» – 1 дБ. При сравнительном анализе акустических свойств Ст 10 и нового выплавленного образца ХСМ-1 установлено, что УЗД исследованных образцов изменяются в диапазоне (41–96 дБ), а именно значения min (41–44 дБ) наблюдаются при 500 Гц, значения max (88–96 дБ) – при 8000 Гц и по шкале «А». Наибольшие уровень звукового давления характерны при соударениях с шаром-ударником диаметром 18,3 мм, наименьшие при диаметре 13,2 мм.

В соответствии с рисунком 9 при соударении сплавов с шаром-ударником d =13,2 мм алюминий минимальный уровень звукоизлучения по шкале «А» у нового демпфирующего образца ХСМ-1, уровень звукового давления 70 дБА, что на 4 дБ ниже, чем у Ст.10. На низких частотах звукоизлучение всех образцов практически равны и изменяются в пределах 45-49 дБ. Минимальные значения звукоизлучения у образца ХСМ-1 УЗД=62 дБ. Графики звукоизлучения стандартной стали Ст.10 и нового легированного образца схожи и звукоизлучение меняется в пределах 47–73 дБ.

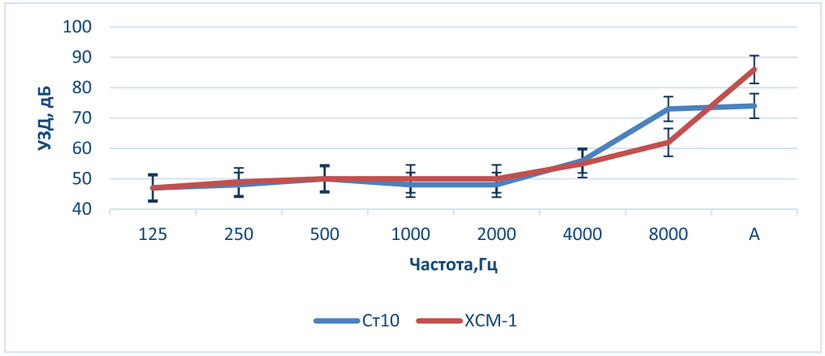


Рисунок 9 – Сравнительные показатели звукоизлучения Ст.10, ХСМ-1 при соударении с шаром-ударником d =13,2 мм

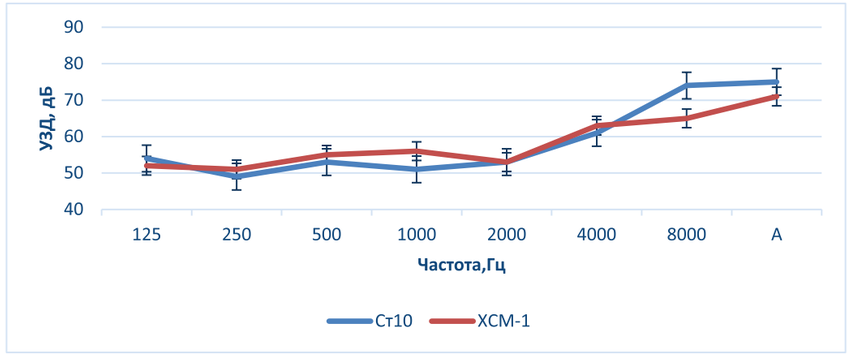


Рисунок 10 – Характеристики звукоизлучения Ст.10, ХСМ-1 при соударении с шаром-ударником d =16,0 мм

В соответствии с рисунком 10 при соударении сплавов с шаром – ударником d =16,0 мм на частотах до 1000 Гц уровни звукового давления практически всех образцов практически одинаковы. На частотах 1000 – 4000 Гц наблюдается рост звукоизлучения. На частоте 8000 Гц рост звукоизлучения достигает от 90 дБ, меньшие уровни звукоизлучения у образца ХСМ-1. По шкале «А» минимальное звукоизлучение у нового демпфирующего образца ХСМ-1. 73 дБА

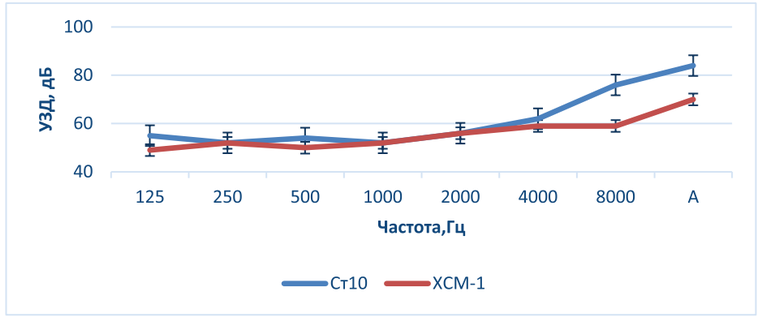


Рисунок 11 – Сравнительные показатели звукоизлучения Ст.10, ХСМ-1 при соударении с шаром-ударником d =18,3 мм

На рисунке 11 показаны характеристики звукоизлучения образцов Ст.10, ХСМ-1 при соударении с шаром-ударником d =18,3 мм. На частотах до 1000 Гц уровни звукового давления образцов изменяются в пределах 41-54 дБ. На частотах 1000–4000 Гц максимальные УЗД звукоизлучение образцов Ст.10 и ХСМ-1практически одинаковые. На частотах 4000-8000 Гц наблюдается плавный рост звукоизлучения у всех образцов минимальные значения у образца ХСМ-1. По шкале «А» максимальные УЗ Ст10, минимальные УЗ у образца ХСМ-1 72 дБА.

Таким образом, при прохождении звуковой волны в металлической матрице одним из основных факторов влияющих на диссипацию является природа и количество несовершенств атомно-кристаллического строения. Природа несовершенств определяется химическим и фазовыми составами сталей, технологией обработки.

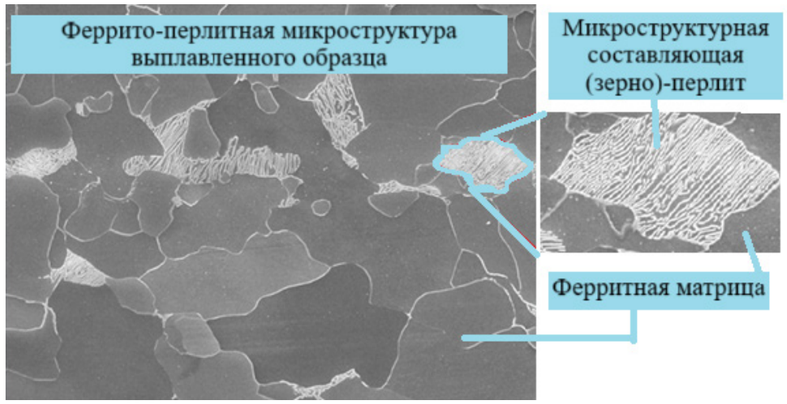


Рисунок 12 – Микроструктура стали 10 после травления при увеличении 200

В соответствии с рисунком 12 микроструктура стали ХСМ-1 представляет собой ферритно-перлитную основу. Микроструктура сплава определена при

травлении 5 % азотной кислотой. На рисунке видно, что мелкое зерно и отсутствие крупных неметаллических включений являются причиной низких демпфирующих свойств ХСМ-1 (0,14–0,22 % C, 3,05–3,17 % Si, 2,9–4,15 % Mn, 1,3 % Cr, 0,3 % Ni, 0,05 % S, 0,04 % P, 0,3 %Cu и 0,08 % As) без травления. На светлом фоне феррита видны неметалличнские включения, ликвационные полости.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № ИРН AP27511849 «Разработка легирующих сталей с диссипативными свойствами и их поверхностная модификация путем осаждения наноструктурных износостойких покрытий для ответственных деталей в машиностроении».

Выводы

Результаты экспериментов показывают, что звукоизлучения образцов из стандартной стали изменяется в пределах 8–35 дБ: минимальные значения (8–9 дБ) фиксируются при 125 Гц, а максимальные (30–35 дБ) – при 8000 Гц. Для стандартных сталей область резонансов находится на частотах 125–250 Гц, после чего, в соответствии с законом масс, звукоизлучения возрастает до 34 дБ. На низких частотах до 300 Гц звукоизлучения остаётся низкой (8–19 дБ), при 2000 и 8000 Гц наблюдаются пики, тогда как на 4000 Гц фиксируется снижение звукоизлучения у всех образцов, при этом максимальная звукоизлучения получена у стали Ст.10. Для сплавов ХСМ звукоизоляция составляет 9–36 дБ, минимальные значения (9–10 дБ) отмечаются при 125 Гц, а максимальные (32–36 дБ) – при 1000 и 8000 Гц; область резонансов также лежит в пределах 125–250 Гц. На частотах до 300 Гц звукоизлучения остаётся низкой (9–11 дБ), тогда как при 1000 и 8000 Гц наблюдаются выраженные максимумы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Гигиенические нормативы к физическим факторам, оказывающим воздействие на человека. Утверждены приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 16 февраля 2022 г. № ҚР ДСМ-15. – Астана: Министерство здравоохранения РК, 2022. – 54 с.

2 **Васильев, А. В.** Проблемы оценки сочетанного влияния шума и других физических факторов на здоровье человека // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 6. – С. 510.

3 **Мухамедова, Г. Р.** Исследование кохелларной функции методом регистрации различных классов отоакустической эмиссии у лиц подвергающихся воздействию интенсивного производственного шума. // Вестник отоларинголога. – 2003. – № 6. – С. 23–26.

4 **Zera Jan.** Импульсный шум на промышленных предприятиях: статическое распределение уровней//Medicine and environment, 2001. – № 2. – С. 127–133.

5 **Lennart A., Lennart H.** Динамика гормональных изменений вследствие постоянного шума. // Medicine and environment, 2000. – № 1. – С. 13–18.

6 Нарушение липидного обмена у рабочих подвергающихся производственному шуму // РЖ Экология человека, 2004. – № 9. – С. 69–73.

7 **Утепов, Т. Е., Карменов, К. К. и др.** Металлические материалы для снижения шума // Труды шестой международной научно-технической конференции «Новое в безопасности жизнедятельности» (охрана труда, экология, валеология, защита человека в ЧС, токсикология) часть 1, Алматы, Каз НТУ. – 2004. – С. 172–178.

8 **Сулеев, Д. К.** Высокодемпфирующие сплавы в технике борьбы с шумом. Монография // Алматы : НИЦ Гылым, 2002. – 301 с.

9 **Омирбай, Р. С., Актаев, Б. Г., Батесова, Ф. К.** Акустические свойства чугунного образца // Труды седьмой международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы БЖД (охрана труда, валеология, защита человека в ЧС, токсикология, экологические и правовые аспекты БЖД)» том 1, Алматы, Каз НТУ. – 2005. – С. 89–92.

10 **Сулеев, Д. К., Утепов, Т. Е.** Характеристики диссипации демпфирующих легированных сплавов // Труды седьмой международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы БЖД (охрана труда, валеология, защита человека в ЧС, токсикология, экологические и правовые аспекты БЖД)», Том 1. – Алматы : Каз НТУ. – 2005. – С. 89–92.

11 **Сулеев, Д. К., Утепова, А. Б., Нурулдаева, Г. Ж.** Влияние легирующих элементов на демпфирующие свойства сплавов на основе железа. Безопасность жизнедеятельности (охрана труда, защита в чрезвычайных ситуациях, экология, валеология, токсикология, экономика и организация производства). Сборник научных публикаций. Выпуск 2. – 2005 г. – Алматы : Каз НТУ. – 2005 – С. 4–8.

12 **Утепов, Е. Б., Войцеховский, И. И.** Сплавы с повышенными демпфирующими свойствами в технике борьбы с шумом // Труды шестой международной научно-технической конференции «Новое в безопасности жизнедятельности» (охрана труда, экология, валеология, защита человека в ЧС, токсикология) часть 1. – Алматы: Каз НТУ. – 2004. – С. 45–47.

13 **Масе, Б. Р.** Звукоизлучение пластины с двумя ребрами жесткости, 1980. – № 3. – С. 435–441.

14 **Чернашкин, В. Г.** Демпфирующая способность строительных сталей повышенной и высоко прочности. Металловедение и термическая обработка металлов, 1976. – № 1. – С. 43–46.

15 **Сулеев, Д. К., Утепова, А. Б., Нурулдаева, Г. Ж.** Исследование акустических характеристик образца из чугуна // Вестник Каз НТУ имени К. И. Сатпаева, Алматы: 2005. – № 2. – С. 3–10.

16 **Сулеев, Д. К., Утепов, Е. Б., Нурулдаева, Г. Ж.** Исследование акустических характеристик трубчатого образца из стали // Вестник Каз НТУ имени К. И. Сатпаева, Алматы: 2005. – № 2. – С. 40–45.

17 **Утепов, Е. Б., Ерконыр, А. К., Заликанова, И. П.** Исследование характеристик звукоизлучения трубчатых твердых образцов // Вестник Каз НТУ имени К. И. Сатпаева, Алматы: 2004. – № 2. – С. 87–92.

18 **Сулеев, Д. К., Утепов, Е. Б., Заликанова, И.П. и др.** Сплавы с повышенными свойствами для борьбы с шумом соударении. Алматы: КазНТУ, 2006. – 311 с.

REFERENCES

1 Gigienicheskie normativy k fizicheskim faktoram, okazyvayushchim vozdeistvie na cheloveka. Utverzhdeny prikazom Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 16 fevralya 2022 g. № QR DSM-15 [Hygienic Standards for Physical Factors Affecting Humans. Approved by Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan dated February 16, 2022 № QR DSM-15]. – Astana : Ministerstvo zdravookhraneniya RK, 2022. – 54 p.

2 **Vasil'ev, A. V.** Problemy otsenki sochetannogo vliyaniya shuma i drugikh fizicheskikh faktorov na zdorov'e cheloveka [Problems of assessing the combined impact of noise and other physical factors on human health] // In Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. – 2012. – T. 14. – № 6. – P. 510.

3 **Mukhamedova, G. R.** Issledovanie kokhellarnoy funktsii metodom registratsii razlichnykh klassov otoakusticheskoi emissii u lits, podvergayushchikhsya vozdeistviyu intensivnogo proizvodstvennogo shuma [Study of cochlear function using registration of various classes of otoacoustic emissions in individuals exposed to intensive industrial noise] // In Vestnik otolaringologa. – 2003. – № 6. – P. 23–26.

4 **Zera Jan.** Impul'snyi shum na promyshlennykh predpriyatiyakh: statisticheskoe raspredelenie urovnei [Impulse noise at industrial enterprises: statistical distribution of levels] // In Medicine and environment, 2001. – № 2. – P. 127–133.

5 **Lennart, A., Lennart, H.** Dinamika gormonal'nykh izmenenii vsledstvie postoyannogo shuma [Dynamics of hormonal changes caused by continuous noise] // In Medicine and environment. – 2000. – № 1. – P. 13–18.

6 Narushenie lipidnogo obmena u rabochikh, podvergayushchikhsya proizvodstvennomu shumu [Disorders of lipid metabolism in workers exposed to industrial noise] // In RZh Ekologiya cheloveka. – 2004. – № 9. – P. 69–73.

7 **Utepov, T. E., Karmenov, K. K. i dr.** Metallicheskie materialy dlya snizheniya shuma [Metallic materials for noise reduction] // In Trudy shestoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Novoe v bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti» (okhrana truda, ekologiya, valeologiya, zashchita cheloveka v ChS, toksikologiya) chast' 1, Almaty : Kaz NTU. – 2004. – P. 172–178.

8 **Suleev, D. K.** Vysokodempfiruyushchie splavy v tekhnike bor'by s shumom [High-damping alloys in noise-control engineering]. Monografiya. Almaty : NITs Gylym, 2002 – 301 p.

9 **Omirbai, R. S., Aktaev, B. G., Batesova, F. K.** Akusticheskie svoistva chugunnogo obraztsa [Acoustic properties of a cast-iron specimen] // In Trudy sed'moi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy BZhD (okhrana truda, valeologiya, zashchita cheloveka v ChS, toksikologiya, ekologicheskie i pravovye aspekty BZhD)», T. 1. – Almaty. – Kaz NTU. – 2005. – P. 89–92.

10 **Suleev, D. K., Utepov, T. E.** Kharakteristiki dissipatsii dempfiruyushchikh legirovannykh splavov [Dissipation characteristics of damping alloyed steels] // In Trudy sed'moi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy BZhD…» T. 1. – Almaty. – Kaz NTU. – 2005. – P. 89–92.

11 **Suleev, D. K., Utepova, A. B., Nuruldaeva, G. Zh.** Vliyanie legiruyushchikh elementov na dempfiruyushchie svoistva splavov na osnove zheleza [Influence of alloying elements on the damping properties of iron-based alloys] // In Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti… Sbornik nauchnykh publikatsii. Vypusk 2. – 2005. – Almaty : Kaz NTU. – P. 4–8.

12 **Utepov, E. B., Voitsekhovskii, I. I.** Splavy s povyshennymi dempfiruyushchimi svoistvami v tekhnike bor'by s shumom [Alloys with enhanced damping properties in noise-control engineering] // In Trudy shestoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Novoe v bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti» chast' 1, Almaty: Kaz NTU. – 2004. – P. 45–47.

13 **Mase, B. R.** Zvukoizluchenie plastiny s dvumya rebrami zhestkosti [Sound radiation of a plate with two stiffening ribs]. – 1980. – № 3. – P. 435–441.

14 **Chernashkin, V. G.** Dempfiruyushchaya sposobnost' stroitel'nykh stalei povyshennoi i vysokoi prochnosti [Damping capacity of high-strength and extra-high-strength structural steels] // in Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 1976. – № 1. – P. 43–46.

15 **Suleev, D. K., Utepova, A. B., Nuruldaeva, G. Zh.** Issledovanie akusticheskikh kharakteristik obraztsa iz chuguna [Study of the acoustic characteristics of a cast-iron specimen] // In Vestnik Kaz NTU im. K. I. Satpaeva, Almaty. – 2005. – № 2. – P. 3–10.

16 **Suleev, D. K., Utepov, E. B., Nuruldaeva, G. Zh.** Issledovanie akusticheskikh kharakteristik trubchatogo obraztsa iz stali [Study of the acoustic characteristics of a tubular steel specimen] // In Vestnik Kaz NTU im. K. I. Satpaeva, Almaty. – 2005. – № 2. – P. 40–45.

17 **Utepov, E. B., Erkonyr, A. K., Zalikhanova, I. P.** Issledovanie kharakteristik zvukoizlucheniya trubchatykh tverdykh obraztsov [Study of the sound-radiation characteristics of tubular solid specimens] // In Vestnik Kaz NTU im. K. I. Satpaeva, Almaty. – 2004. – № 2. – P. 87–92.

18 **Suleev, D. K., Utepov, E. B., Zalikhanova, I. P. i dr.** Splavy s povyshennymi svoistvami dlya bor'by s shumom pri soudarenii [Alloys with enhanced properties for noise reduction during impact]. Almaty: KazNTU, 2006. – 311 p.

Поступило в редакцию 11.11.25.
Поступило с исправлениями 13.11.25.
Принято в печать 23.11.25.

Р. Ж. Абуова[1], *Г. А. Буршукова[2], Е. С. Меркибаев[3], Р. С. Акпанбаев[4], Н. Бахытұлы[5]
[1]Халықаралық білім беру корпорациясы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2,3,4]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[5]Металлургия және кен байыту институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
11.11.25 ж. баспаға түсті.
13.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
23.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

СОҚҚЫЛЫҚ ҚОЗДЫРУ ЖАҒДАЙЛАРЫНДА ЖАҢА ЛЕГИРЛЕНГЕН БОЛАТТАРДЫҢ АКУСТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ ЖӘНЕ АМПЛИТУДАҒА ТӘУЕЛДІ ДЕМПФИРЛЕУІ

Мақалада соққы жүктемелері жағдайында жұмыс істейтін машина бөлшектерінің дыбыс шығару деңгейін төмендету үшін өзірленген ХСМ-1, ХСМ-2 және ХСМ-3 жаңа легирленген болаттарының акустикалық және демпфирлеу қасиеттеріне жүргізілген кешенді зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі өндірістік шудың кең таралуымен және оның есту анализаторы мен жүрек-қантамыр жүйесіне теріс әсерімен байланысты. Экспериментке қорытпаларды балқыту және термиялық өңдеу, механикалық сипаттамаларды анықтау, сондай-ақ әртүрлі диаметрлі болат шарларымен соққылық қоздыру кезінде 125–8000 Гц жиілік диапазонында дыбыс қысымы деңгейлерін өлшеу енгізілді. Жаңа болаттардың Ст.10, Ст.20 және Ст.45 стандартты маркаларымен салыстырғанда төмен дыбыс шығару деңгейін көрсететіні анықталды. Сонымен қатар, 7–9 дБ-ге жететін амплитудаға тәуелді демпфирлеу әсері байқалды. Алынған нәтижелер ХСМ-1–ХСМ-3 болаттарының жоғары дыбыс оқшаулауын, вибрацияны тиімді басуды және соққы тербелістерінің энергиясын рассея алуды қажет ететін конструкцияларда қолдануға болатынын дәлелдейді. Мұндай материалдар жабдықтың қызмет мерзімін арттыруға, персоналға түсетін акустикалық жүктемені азайтуға және өндірістік жүйелердің тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді, бұл қазіргі жоғары күрделілік деңгейіндегі әрі қауіпсіздік талаптары жоғары технологиялық процестер үшін аса маңызды.

Кілтті сөздер: Демпфирлеуші қорытпалар, дыбыс шығару, дыбыс қысымы деңгейлері, легирленген болаттар, виброакустикалық қасиеттер.

R. Zh. Abuova[1], *G. A. Burshukova[2], E. S. Merkibayev[3],
R. S. Akpanbayev[4], N. Bakhytuly[5]
[1]International Educational Corporation, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[5]Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 11.11.25.
Received in revised form 13.11.25.
Accepted for publication 23.11.25.

ACOUSTIC CHARACTERISTICS AND AMPLITUDE-DEPENDENT DAMPING OF NEW ALLOYED STEELS UNDER IMPACT EXCITATION

The article presents the results of a comprehensive study of the acoustic and damping properties of the new alloyed steels XSM-1, XSM-2 and XSM-3, developed to reduce the sound emission levels of machine components operating under impact loads. The relevance of the study is determined by the high prevalence of industrial noise and its adverse effects on the auditory system and cardiovascular function. The experimental work included melting and heat treatment of the alloys, determining their mechanical characteristics, as well as measuring sound pressure levels in the octave frequency bands of 125–8000 Hz under impact excitation using steel balls of various diameters. It was established that the new steels demonstrate reduced sound emission levels compared to standard grades St.10, St.20 and St.45. In addition, a pronounced amplitude-dependent damping effect reaching 7–9 dB in certain frequency ranges was identified. The results confirm the potential application of XSM-1–XSM-3 steels in structures requiring enhanced sound insulation, stable vibration suppression and efficient dissipation of impact-generated energy. These materials can increase equipment durability, reduce acoustic load on personnel, and ensure more stable operating conditions in industrial systems, which is particularly important for modern high-complexity technological processes with stringent safety requirements.

Keywords: Damping alloys, sound emission, sound pressure levels, alloyed steels, vibroacoustic properties.

МРНТИ 53.49.09
https://doi.org/10.48081/DYMM6865

Н. Ж. Айкенбаева[1], Ж. А. Ашкеев[2], С. С. Айнабекова[3],
М. Ж. Абишкенов[4], И. С. Тавшанов[5]
[1,2,3,4,5]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4471-894X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8992-3984
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7033-2225
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7995-7651
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9427-9748
*e-mail: n.aikenbayeva@tttu.edu.kz

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО НЕСИММЕТРИЧНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК В ЗАКРЫТОЙ ПОЛОСТИ МАТРИЦЫ

В статье представлено физическое моделирование процесса выдавливания металлических заготовок в закрытой полости матрицы с несимметричным приложением внешних нагрузок, достигаемым за счет смещения центров отверстия матрицы и деформирующего пуансона. Данный процесс направлена на изменение однонаправленного течения металла, что значительно снижает вероятность образования дефектов, таких как трещины и разрывы, и улучшает качество получаемых поковок. Для проверки эффективности предложенного способа проведены лабораторные эксперименты с использованием метода слоистых моделей, которые позволяют наглядно оценить процесс деформирования в закрытой полости матрицы с несимметричным приложением внешних нагрузок. Для определения оптимальных параметров процесса деформирования проведено двухфакторный эксперимент на выбранном объекте исследования и по результатам статистической обработки экспериментальных данных, получена математическая модель (уравнение регрессии), адекватно описывающая процесс выдавливания металла в отверстие закрытой матрице.

Полученная математическая модель пригодна и можно использовать для определения технологических и геометрических параметров при обработке заготовок в закрытой полости матрицы. Компьютерное моделирование подтвердило эти наблюдения, выявив интенсивность сдвиговых деформаций в зоне максимальной пластической деформации в диапазоне 1-2. Полученные результаты позволяют более точно прогнозировать поведение материала при выдавливании и оптимизировать технологический процесс для повышения качества поковок.

Результаты исследования имеют практическую значимость для машиностроения, в частности для автомобильной и авиационной промышленности, где требуется производство высококачественных

заготовок с ультрамелкозернистой или наноструктурой, обладающих повышенными физико- механическими свойствами.

Ключевые слова: физическое моделирование, ультрамелкозернистая структура, наноструктура, деформация металла, компьютерное моделирование.

Введение

Одним из основных направлений в машиностроительном производстве, в частности в автомобилестроении, авиастроении является получение заготовок с повышенными физико-механическими свойствами, с субультрамелкозернистой (УМЗ) или наноструктурой (НС), которые используют в наиболее тяжело нагруженных узлах и элементах машин, механизмов и оборудования [1; 2]. Например, детали, работающие в летательных аппаратах, должны быть с одной стороны легкими, а с другой стороны, как можно прочными. Такое сочетание можно обеспечить при использовании дорогостоящих высоколегированных металлов и сплавов с особыми свойствами. Поэтому разработка новых способов получения более высококачественных материалов, сочетающих прочность, пластичность, массу и другие важные свойства, до сих пор остается одной из наиболее важной первостепенной задачей в металлообработке.

В известных или существующих процессах выдавливания наблюдается ярко выраженное однонаправленное течение металла, значительно ухудшающие качество металла (разрывы и трещины по направлению выдавливания и различие механических свойств) [2]. Поэтому одним из основных задач в металлообработке остается изменение течения металла путем создания новых схем деформирования и конструкции штамповой оснастки.

Изменение строго однонаправленного течения металла можно реализовать при выдавливании в закрытой полости штамповой оснастки со смещенными центрами отверстия матрицы относительно центра деформирующего пуансона, т.е. при несимметричном приложении внешней нагрузки (рис. 1).

Для проверки эффективности предлагаемого процесса выдавливания в необходимо провели эксперимент в лабораторных условиях. Следует отметить, что все наиболее перспективные процессы и способы обработки материалов вначале надо проверить на моделях в лабораторных условиях, а затем после определения наиболее оптимальных вариантов переносят на натуру (готовое металлоизделие).

В обработке материалов давлением (ОМД) широко используют экспериментальный метод слоистых моделей [3], а на современном этапе более эффективный метод – математическое компьютерное моделирование, с использованием современных прикладных программы, как например, «DEFORM - 3D», а также и другие расчетно-аналитические методы. При этом самым главным является сопоставление полученных данных для того, чтобы получить более достоверные результаты.

Таким образом, для того чтобы успешно прошла в производственных испытаниях какое-либо наиболее эффективный способ обработки материалов,

вначале необходимо «отработать», т.е. произвести лабораторные эксперименты на моделях и произвести компьютерное моделирование с использованием современных прикладных программ, т.к. производственные испытания требуют больших расходов, затрат и энергии. Одним из хорошо себя зарекомендовавшим методом в теории обработки материалов давлением (ОМД) является метод слоистых моделей [4]. Эксперименты, проводимые в лабораторных условиях на моделях, не требуют установок большой мощности, так как используются образцы меньших размеров по сравнению с натуральными размерами, имеющих место на производстве, и тем самым не требуют значительных затрат [5].

Одним из основных условий физического моделирования является геометрическое подобие, т.е. в процессе деформации степени деформации модели и натуры должны быть равны: $\varepsilon_н = \varepsilon_м$ [6]. Кроме того, применяемые оснастки для деформирования модели и натуры должны быть геометрически подобны и отношение их размеров должно быть равно масштабу моделирования. Успешная реализация предлагаемого способа обработки и инструментов на производстве произойдет после сопоставления полученных данных и некоторой корректировки [7].

Материалы и методы

Деформирование разнослоистых пластопарафиновых образцов производили на моделях закрытой полости штампа матрицы, изготовленной из сплава (БрОФ) с использованием образцов составленный из слоев пластопарафина (парафина и пластилина) в виде дисков разного цвета. Размеры штамповой оснастки принимаем в соответствии масштабу моделирования, исходя из размеров натуры, т.е. готового металлического изделия (рис. 1, а). Деформирующая оснастка состоит из верхнего пуансона 1, направляющей втулки 2, контейнера 3, куда исходная заготовка 4 устанавливался на матрицу 5. Если матрица разъемная, то она может быть заключена в контейнер 3. Внутренние размеры матрицы и пуансона (исполнительные размеры), устанавливали в соответствии масштабу моделирования исходя из размеров обрабатываемой заготовки 4.

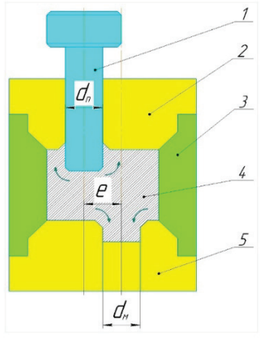
Штамповая оснастка была изготовлена из сплава БрОФ на токарных, сверлильных и фрезерных станках с полированием внутренней и внешней поверхности во избежание налипания образцов и уменьшения трения (рис. 1, б). Слоистые разноцветные образцы для деформирования изготавливали из пластопарафина, т.е. сочетанием (смешивая) парафина и пластилина в соотношении 15:85, т.е. 15% парафина и 85% пластилина. Именно такое соотношение обеспечивает пластические и прочностные характеристики, соответствующие металлам, обрабатываемых в реальных производственных процессах обработки. Меняя сочетание можно придать различные свойства, даже довести до хрупкого состояния при высоком содержании парафина, например, при сочетании 50:50. Далее пластопарафиновые заготовки из белого и черного цвета вначале раскатывали до толщины 3÷5 мм, затем вырезали круглый диск специальным штампом с круглым отверстием, соответствующих размерам деформируемой заготовки. Далее из изготовленных дисков собирали образцы

чередованием белого и черного цвета, общая толщина (высота), которых составлял 15÷20 мм, диаметром 35÷40 мм (рис 1, в).

Деформирование образцов в закрытой полости штампа осуществляли следующим образом: исходный составной образец цилиндрической формы 4 устанавливается в закрытую полость контейнера 3 и под воздействием верхнего пуансона 1, направленный по направляющей втулке 2 внедряется в заготовку, образуя заготовку с глухим отверстием и заготовку с отростком 4 (рис. 1). При этом на границе раздела течения металла, т.е. между течениями металла в зависимости от расстояния (эксцентриситета е) между центром отверстия втулки деформирующего пуансона и центром отверстия матрицы штампа возникают сдвиговые деформации или срез, в зависимости от величины е. При соосном расположении осей, т.е. когда е = 0, в основном будет происходит срез заготовок, с вытеснением отростка в отверстие матрицы 5 (рис. 1, а), а сдвиговые деформации в этом случае будут минимальными. При этом большой интерес представляет оценка возникающих сдвиговых деформации, способствующие в дальнейшем реальных производственных условиях интенсивному измельчению микроструктуры металла и изменению однонаправленного течения металла. Далее штамповая оснастка кантуется на 1800, и вторым пуансоном отросток образца деформируется в обратном направлении до заполнения закрытой полости штампа, т.е. до восстановления исходной цилиндрической формы.

Результаты и обсуждение

Особенность процесса заключается в том, что после каждого цикла деформирования появляется возможность выталкивания образца из полости штампа и обработки материала другими методами, и заново подвергать знакопеременному деформированию. В качестве промежуточных операций между циклами деформирования можно использовать криогенную обработку (обработка в жидком азоте) или термическую обработку для снятия упрочнения и остаточных напряжений (промежуточный отжиг) для дальнейшего деформирования в закрытой полости штампа.



а) Основные узлы штамповой оснастки с несимметричным приложением внешней нагрузки

б) Модель штамповой оснастки

в) Исходные разноцветные пласто парафиновый образец

Рисунок 1 – Закрытый штамп для деформирования заготовок

Деформирование, т.е. выдавливание в отверстие матрицы производилось на малом ручном прессе малой мощности (тип гидравлическом прессе). Перед деформированием толщина каждого слоя и общая высота образца замерялась штангенциркулем (точность 0,1 мм). Для сравнения и оценки полученных результатов экспериментов, т.е. усредненных значений интенсивности деформации сдвига Гср параллельно было проведено деформирование разнослоистых пластопарафиновых образцов в закрытой полости штампа со смещением центра отверстия матрицы 5 относительно оси втулки деформирующего пуансона 1 на величину е. Смещение осей на величину е позволить значительно развить интенсивности деформации сдвига и обеспечить более равномерную микроструктуру металла Г, позволяющих получения качественных поковок. (рис. 2, а, б, в, г).

После выдавливания образец извлекался из закрытой полости матрицы выталкиванием его через малый канал (отверстия) матрицы, затем разрезался в меридиональной плоскости с помощью тонкой проволокой, смоченный маслом. После разрезки сечение образца, сканировали на прозрачной миллиметровой пленке на сканирующем устройстве для замеров наибольшего значения угла искажения горизонтального слоя γi примыкающего к деформирующему пуансону (рис. 2, а, б, в, г). Полученные значения угла искажения слоев (измерения) были занесены в таблицу 2 и 3 для дальнейшей математической статистической

обработки, с целью определения оптимальных технологических (геометрических) параметров процесса деформирования.

Анализ результатов экспериментов показал, что развитие деформации сдвига по всему сечению образца зависит от глубины внедрения деформирующего пуансона h и величины смещения центров отверстия матрицы $d_м$ и деформирующего пуансона $d_п$, действующего по направляющей втулке е (рис. 1). При этом, чем больше h, тем больше деформаций сдвига, однако при чрезмерном увеличении глубины внедрения может произойти срез материальных волокон заготовки, особенно при е = 0 (рис. 3).

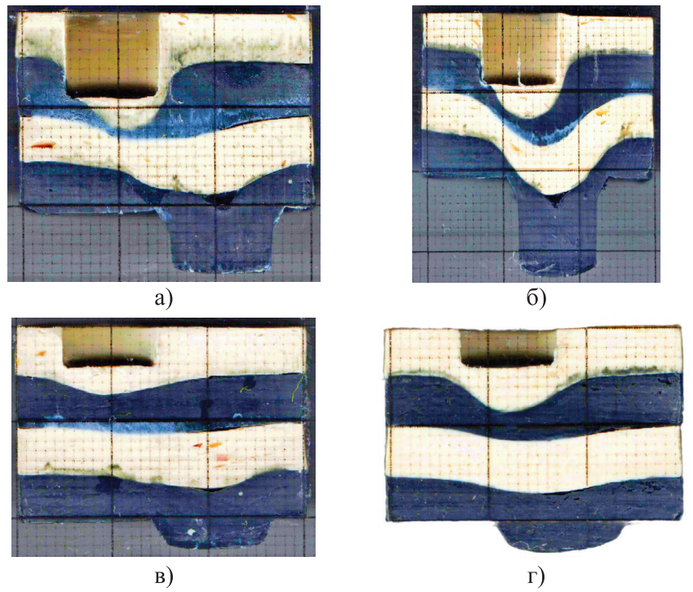
Таким образом, по искажению и деформированию каждого слоя можно произвести предварительную оценку деформированного состояния и качества получаемых металлических изделий.

Следует отметить, что мерой проработки структуры металла принято считать интенсивность деформации сдвига Г, которая влияет на получение качественных поковок. Обычно при обработке металлов давлением принимают накопленное значение интенсивности деформации $\Lambda_{накоп.} = \sum Гi.$ по всему сечению заготовки [8]. При этом, чем больше значение Гi, в i-том слое в сечениях заготовки, тем больше проработка микроструктуры обрабатываемого материала в данном слое заготовки.

Поэтому в качестве параметра оптимизации (ПО) выбрали наибольшее значение искажения горизонтального слоя, примыкающего непосредственно к пуансону, величину которого определяли по следующей формуле: $Г_{ср} = tg\gamma_м$, где $\gamma_м$ – значение угла искажения горизонтально чередующихся слоев белого и черного цвета в сечении очага пластической деформации (рис. 2, а, б, в, г).

По искажению разноцветных слоев образцов можно произвести качественный анализ [9], которое ранее предполагалось, т.е. при наличии эксцентриситета е наблюдается сдвиг слоев (рис. 2, а, б, в, г). При отсутствии эксцентриситета е, сдвиг слоев переходит в срез отростка по направлению движения пуансона, т.е. происходит срез отростка, провалом его в отверстие матрицы 5, особенно при больших степенях деформации вытяжки (рис. 3, а-в).

Поэтому для предотвращения этого явления, т.е. среза, необходима штамповая оснастка со смещением центров осей отверстия направляющей втулки пуансона и матрицы на величину е [10].



а) б) в) г)

Рисунок 2 – Искажение слоев образцов при деформировании заготовок в закрытой полости штампа: а) со смещением, где факторы находились на верхнем уровне ($X_1 = +1$, $X_2 = +1$); б) при уровнях $X_1 = -1$, $X_2 = +1$; в) при уровнях $X_1 = +1$, $X_2 = -1$; г) на нижнем уровне $X_1 = -1$, $X_2 = -1$ (см. таблицу 3)

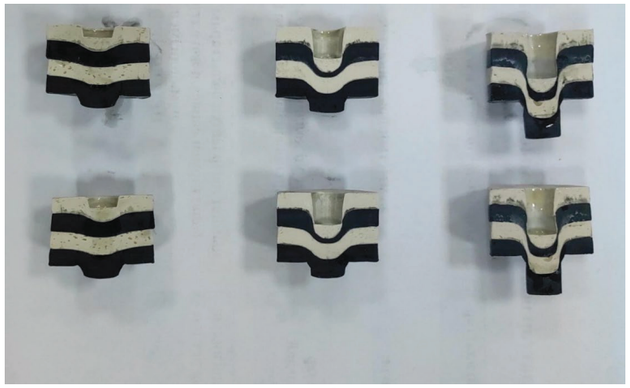
На рисунке 2, а, б, в, г показаны сканированные эскизы продеформированных образцов при различных значениях смещения центров осей направляющей втулки, где действует пуансоны и матрицы на величину е и соответственно схема измерения углов искажения слоев γ_1, γ_2, γ_3 и γ_4 в сечениях образцов. В качестве ПО приняты наибольшие значения сдвиговых деформаций горизонтального белого и черного слоя, примыкающих непосредственно к пуансону.

Предварительный анализ результатов экспериментов на моделях образцов продеформированных в закрытой полости штампа, показал, что наибольшее искажение слоев γ развивается в основном на участке между центрами отверстий матрицы $d_м$ и направляющей втулки, где действует пуансон $d_п$. При выдавливании образцов в матрице без смещения центров осей е, т.е. при $е \approx 0$ на этом участке будет превалировать срез отростка образца, а сдвиги γ будут практически равны нулю. На участке между стенкой контейнера и деформирующим пуансоном (в характерных сечениях III) и под пуансоном (сечение II) искажения минимальны, т.е. развивается меньшее значение деформации сдвига.

Таким образом, установлено, что при е = 0, т.е. при соосном расположении деформирующего пуансона и отверстия матрицы происходит будет в основном срез отростка заготовки, а сдвиговые деформации будут минимальными (рис. 3, а,

б, в). При этом чем больше глубина внедрения h, тем больше срез слоев образцов или, в реальных условиях срез волокон. Поэтому для развития деформации сдвига и предотвращения среза отростка заготовки необходимо смещения центра отверстия матрицы относительно центра отверстия направляющей втулки пуансона на величину е.

Таким образом, анализ результатов экспериментов показал, что на величину развития деформации сдвига $\Gamma_{ср}$ при выдавливании образцов в закрытой полости штампа влияют следующие факторы: относительное смещение, то есть $\rho = e/_{d}м$, где е – смещение центра отверстия матрицы относительно центра втулки направляющего пуансона, $d_м$ – отверстие матрицы (или втулки) и $\mu = h/h_0$ относительная глубина внедрения пуансона в заготовку, где h – глубина внедрения пуансона в заготовку, h_0 – исходная высота образца. Для определения оптимальных значений факторов ρ, μ проведен двухфакторный эксперимент, матрица планирования и условия которого эксперимента приведено в таблицах 1 и 2. В качестве параметра оптимизации (ПО) выбрано среднее значение интенсивности деформации сдвига $\Gamma_{ср}$., которое развивается по сечению (объему) заготовки (рис. 2, а, б, в, г).



а) б) в)

Рисунок 3 – Искажение слоев образцов при деформировании заготовок в закрытой полости штампа без смещения центров отверстия втулки пуансона и матрицы: а) при глубине внедрения пуансона h = 5 мм, б) h = 10 мм, в) h = 15 мм

Условия проведения экспериментов и матрица планирования экспериментов приведены в таблице 1 и 2.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Уровни	Факторы	
	$X_1 = \rho = e/d$	$X_2 = \mu = h/h_0$
Основной	0,325	0,375
Нижний	0,250	0,250
Верхний	0,50	0,50
Интервал варьирования	0,125	0,125

Составляем матрицу планирования и карту проведения эксперимента (табл. 2).

Двухфакторный эксперимент на выбранном объекте исследования, реализовался в случайном порядке в соответствии с принципом рандомизации. Первым реализован опыт с порядковым 4, где факторы поддерживалось на нижнем уровне. При этом получена средняя степень деформации сдвига 0,60, вторым реализован опыт номер 1, в котором все фактора X_1, X_2 поддерживалось на верхних уровнях, а степень деформации сдвига оказалось равной максимальной, равной 1,67 и т.д.

Таблица 2 – Матрица планирования и карта проведения эксперимента

Номер опыта	Порядок реализации опытов по рандомизации (три серии)	Матрица планирования			Выход (ПО), %		
		X_1	X_2	$X_1 X_2$	$У_{U1} = tg\gamma_{u1}$	$У_{U2} = tg\gamma_{u2}$	$_u$
1	4,1	+1	+1	+1	$tg60^0$	$tg58^0$	1,67
2	3,2	-1	+1	-1	$tg65^0$	$tg67^0$	2,24
3	3,4	+1	-1	-1	$tg10^0$	$tg12^0$	0,19
4	2,1	-1	-1	+1	$tg30^0$	$tg32^0$	0,60

Таким образом, после проведения двух серии опытов (в каждой по четыре опыта с неповторяющимися комбинациями уровней факторов) оказались заполненными столбцы значений выхода $У_{u1}$ и $У_{u2}$ (табл. 2). Теперь есть все необходимые экспериментальные данные для статистической обработки.

Статистическую обработку для анализа результатов эксперимента осуществляли по известной методике, изложенных в работах [6,7]. Вначале рассчитываем построчные средние:

$$\bar{y}_u = \frac{y_{u1} + y_{u2} + \cdots y_{uy}}{n} = \frac{1{,}732 + 1{,}60}{2} = 1{,}67, \quad (1)$$

где n – число повторных опытов (n = 2).

Аналогично рассчитываем остальные построчные средние значения, результаты которого заносят в столбец карты проведения опытов (табл. 2). Далее последовательно рассчитываем дисперсию, среднеквадратичную отклонение и другие показатели, характеризующие процесс выдавливания заготовок в закрытой полости штамповой оснастки. По результатам статистической обработки экспериментальных данных, получена математическая модель (уравнение регрессии), адекватно описывающая процесс выдавливания металла в отверстие

закрытой полости штампа со смещением центров отверстия втулки и матрицы на величину е:

$$\hat{y} = 1{,}175 - 0{,}245 \times X_1 + 0{,}78 \times X_2 - 0{,}04 \times X_1 X_2. \quad (2)$$

При этом коэффициенты регрессии $b_0 = 1{,}175$, $b_1 = -0{,}245$ и $b_2 = 0{,}78$ оказались статистически значимы, а $b_{12} = -0{,}04$ оказались статистически не значимыми при сравнении с доверительным интервалом варьирования и поэтому исключаем из уравнений регрессии.

Адекватность (пригодность) модели, проверяли с помощью F критерий Фишера [10]. Интерпретируя полученную математическую модель, можно сделать предварительный вывод, что из двух факторов наибольшее влияние оказывает второй фактор, $X_2 = \mu = h/h_0$, т.е. относительное величина внедрения пуансона, т.е. чем больше внедрение, тем больше сдвиги. Однако чрезмерное увеличение глубины проникновения может привести срезу волокон материала. Первый фактор, т.е. относительное смещение $X_1 = \rho = e/d_м$, также приводит к возникновению деформации сдвига по сечению заготовок, т.е. на участке е в зоне II, но этот фактор следует уменьшать. Следует отметить, что чем меньше $\rho = e/d_м$, тем больше будет иметь место на этом участке и срез, и наоборот, чем больше $\rho = e/d_м$, тем меньше угол искажения γ. Поэтому для полной интенсивной проработки микроструктуры металла необходимо принимать значения ρ и μ в пределах 0,25÷0,5 в зависимости от диаметра отверстия матрицы и втулки пуансона $d_м$ и d_0, а также исходной высоты h_0. Например, при $\rho = 0{,}20$ и $\mu = 0{,}45$, среднее значение деформации сдвига составит:

$$\Gamma_{ср} = 1{,}175 - 0{,}245 \left[\frac{X_{1H} - 0{,}375}{0{,}125}\right] + 0{,}78 \times \left[\frac{X_{2H} - 0{,}375}{0{,}125}\right], \quad (3)$$

где X_{1H}, X_{2H} и $X_{1H} \times X_{2H}$ – значение факторов в натуральных выражениях, т.е. соответственно равны: $X_{1H} = 0{,}20$ и $X_{2H} = 0{,}45$, и будет равен, $\Gamma_{ср} = 1{,}986 \approx 2{,}0$, т.е. среднее значение искажения угла слоя будет равен $\gamma \approx 64^0$.

Полученная математическая модель пригодна и можно использовать для определения технологических и геометрических параметров при обработки стальных заготовок в закрытой полости штампа при проведении экспериментальных исследовании на стальные заготовки.

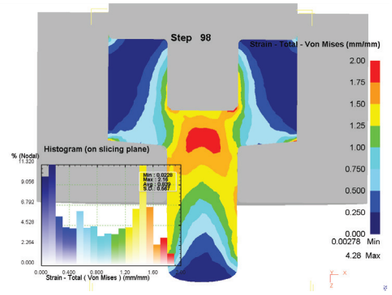
Таким образом, получена адекватная математическая модель, которая вполне пригодна для описания процесса штамповки выдавливанием заготовки в закрытой полости штампа со смещением центров отверстия матрицы и втулки, т.е. направляющих деформирующих пуансонов. Полученную модель можно использовать для определения оптимальных технологических параметров при обработки стальных заготовок в закрытой полости штампа. Для полного описания предлагаемого варианта и сравнения полученных результатов проведено

математическое компьютерное моделирование с использованием программы «Deform-3D».

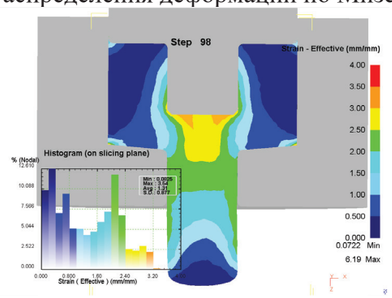
Компьютерное моделирование процесса выдавливания заготовок через отверстия матрицы в закрытой полости штампа

Для проверки достоверности полученных результатов физического моделирования и предварительной оценки качества поковки было исследовано напряженно-деформированное состояние с использованием компьютерного моделирования в программе “DEFORM-3D”.

Физическим моделированием установлено, что при штамповке выдавливанием можно заметить, что сдвиговые деформации сосредотачивается на границе раздела течения металла, т.е. между участками I и III, направление которого на рисунке показано стрелками (рис. 1–2). Сказанное подтверждается математическим компьютерным моделированием процесса штамповки заготовки выдавливанием, с использованием программы «Deform-3D», где в зоне очага пластической деформации распределение значений сдвиговых деформации составляет ~1÷2 (рис. 4, а). Аналогичное распределения интенсивности деформации в зоне очага деформации наблюдается и на рисунке 4, б где значение интенсивности деформации меняется от 1 до 1,5, что способствует получению высококачественных поковок с ультрамелким зерном.



а) Распределения деформации по Мизесу



б) Распределения интенсивности деформации

Рисунок 4 – Распределение деформации сдвига по Мизесу и интенсивности деформации сдвига

Распределение максимального значения среднего нормального напряжения в очаге пластической деформации показано на рисунке 5, где только после выхода металла из отверстия матрицы появляются растягивающие напряжения, значения которых составляет 70 МПа, а сжимающие напряжения равна нулю.

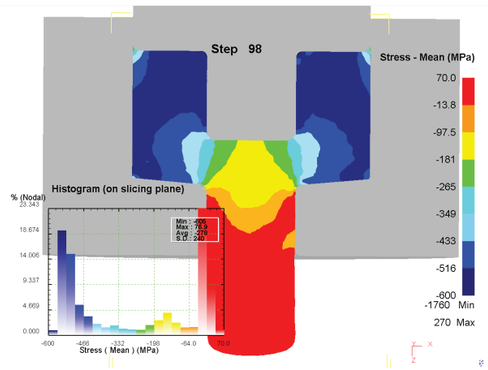


Рисунок 5 – Распределения среднего нормального напряжения (ст.45, при температуре Т = 1000 °С)

Таким образом, из полученных диаграмм (рис. 3–4) можно заметить, что в очаге пластической деформации в основном действуют максимальные сжимающие напряжения, положительно влияющих на измельчение зеренной структуры металла. Растягивающие напряжения возникают после выхода материала из отверстия матрицы, где металл уже не испытывают пластическую деформацию, а просто передвигаются как абсолютно жесткое тело. Растяжения на этом участке возникают за счет действия контактного трения на поверхности контакта металла со стенкой отверстия матрицы, которое при применении обильной смазки можно пренебречь.

Следует отметить, что схема обработки заготовок также аналогична предыдущему способу, т.е. после каждого цикла обработки заготовка выталкивается из полости матрицы для дальнейшей промежуточной обработки (криогенная обработка, термическая обработка или другое), которое легко реализовать.

Таким образом, из рассмотренных схем обработки заготовок в закрытой полости штампа можно заключить, что интенсификация пластической деформации зависит от общей степени выдавливания заготовки через отверстия матрицы, т.е. $\mu = h_к/h_0$, ($h_к$ и h_0, – соответственно конечная и исходная высота заготовки), величины относительного смещения $\rho = e/d_м$. При этом значительное влияние оказывает первый фактор, т.е. относительное смещение $\rho = e/d_м$, которое с увеличением приводит к развитию интенсивности деформации сдвига.

Выводы

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующий вывод. Предлагаемый способ закрытой объемной штамповки выдавливанием без смещения центров е и с относительным смещением $\rho = e/d_м$ даст возможность реализовать многоцикловое знакопеременное деформирование заготовок в закрытой полости штампа в сочетании с криообработкой заготовки после каждого цикла деформирования в жидком азоте или с другими термическими операциям, которые способствуют получения УМЗ или НС. В результате всех проведенных операций можно получить поковки с ультрамелким зерном или наноструктурой с повышенными физико-механическими свойствами, которые можно будет использовать в наиболее нагруженных узлах машин, механизмов и других видах агрегатов и оборудования. Для интенсификации пластической деформации предложен способ деформирования заготовок в закрытой полости штампа, где центр приложения силы со стороны пуансона 1 смещен на величину е, относительно центра отверстия матрицы 4 (рис. 4). За счет смещения сил и напряжений в очаге пластической деформации возникают сдвиговые деформации и сжимающие напряжения, которые способствуют дальнейшему измельчению микроструктуры металла, что подтверждается лабораторными экспериментами на моделях, методом линия скольжения и математическим компьютерным моделированием показывающий, что в очаге пластической деформации возникают максимальные в основном сжимающие напряжения, которые способствуют формированию УМЗ или НС.

За счет не однонаправленного течения материала в матрице со смещением центра относительно деформирующего пуансона снижается неоднородность напряжений и деформаций и обеспечивается более равномерное распределение механических свойств по всему сечению заготовки.

Предложена математическая модель (уравнение регрессии), адекватно описывающая процесс многоцикловой обработки в закрытой матрице, и можно будет использовать для определения технологических параметров при обработке стальных заготовок в закрытой матрице. Следующей основной задачей является реализация предложенных способов деформирования в экспериментах с использованием металлических заготовок для их дальнейшего внедрения в производство и получения качественных поковок, поскольку предложенные способы являются предварительными, а окончательная формообразующая операция производится в окончательных штампах получением поковок, которые будут использовать в наиболее ответственных узлах и элементах машин, оборудования и агрегатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ашкеев, Ж. А., Андреященко, В. А., Абишкенов, М. Ж., Буканов, Ж. У.** Определение напряженного состояния и усилия деформации шарообразных заготовок в закрытой матрице // Вестник ПНИПУ. Механика 4. – 2021. – С. 5–12.

2 **Ашкеев, Ж. А., Андреященко, В. А., Абдираманов, С. Т.** Исследование процесса закрытой штамповки, реализующей интенсивные пластические деформации // Обработка материалов давлением. – 2018. – №1. – С. 88–92.

3 **Дорофеев, О. В., Курдюмова, Л. Н., Родин, Н. Н.** Формирование градиентных субмикро- и нанокристаллических структур в объемных конструкционных материалах // Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования, металлдеформ – 2009. – С. 229–232.

4 **Andreyachshenko, V.** Evolution of Al-Si-Mn-Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure // Materials Letters. – 2019. – Vol. 254. – P. 433–435.

5 **Дорогобид, В. Г., Долгий, Д. К.** Оценка возможности интегрирования процесса равноканального углового прессования в действующие технологические процессы метизного производства // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2011. – № 1. – С. 122–126.

6 **Балдин, К. В.** Основы теории вероятностей и математической статистики / К. В. Балдин, В. Н. Башлыков, А. В. Рукосуев. – М. : Флинта, НОУ ВПО МПСИ, – 2010. – 488 с.

7 **Карлов, А. М.** Теория вероятностей и математическая статистика для экономистов. Учебное пособие // А. М. Карлов. – М. : Кнорус. – 2015. – 268 с.

8 **Смирнов, А. В., Кузнецов, В. Д.** Компьютерное моделирование технологических процессов в металлообработке // Вестник машиностроения. – 2020. – № 3. – С. 45–52.

9 **Новиков, Д. С.** Технология выдавливания в машиностроении. – М. : Машиностроение, 2016. – 280 с.

10 **Zhang, L., Wang, Y.** Numerical simulation of metal extrusion processes using DEFORM-3D // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 265. – P. 250–260.

REFERENCES

1 **Ashkeev, Zh. A., Andrejashchenko, V. A., Abishkenov, M. Zh., Bukanov, Zh. U.** Opredelenie napryazhennogo sostoyaniya i usiliya deformatsii sharoobraznykh zagotovok v zakrytoi matritse [Determination of the stress state and deformation force of spherical blanks in a closed die] // Vestnik PNIPU. Mekhanika, 4 (2021). – P. 5–12.

2 **Ashkeev, Zh. A., Andrejashchenko, V. A., Abdiramanov, S. T.** Issledovanie protsessa zakrytoi shtampovki, realizuyushchei intensivnye plasticheskie deformatsii [Study of the closed die forging process implementing severe plastic deformation] // Obrabotka materialov davleniem. – 2018. – № 1. – P. 88–92.

3 **Dorofeev, O. V., Kurdyumova, L. N., Rodin, N. N.** Formirovanie gradientnykh submikro- i nanokristallicheskikh struktur v ob″emnykh konstruktsionnykh materialakh [Formation of gradient submicro- and nanocrystalline structures in bulk structural materials] // Metallofizika, mekhanika materialov, nanostruktur i protsessov deformirovaniya, metallodeform. – 2009. – P. 229–232.

4 **Andreyachshenko, V.** Evolution of Al-Si-Mn-Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure // Materials Letters. – 2019. – Vol. 254. – P. 433–435.

5 **Dorogobid, V. G., Dolgii, D. K.** Otsenka vozmozhnosti integrirovaniya protsessa ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya v deistvuyushchie tekhnologicheskie protsessy metiznogo proizvodstva [Evaluation of the possibility of integrating the equal-channel angular pressing process into existing technological processes of wire production] // Modelirovanie i razvitie protsessov OMD. – 2011. – № 1. – P. 122–126.

6 **Baldin, K. V.** Osnovy teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki [Fundamentals of Probability Theory and Mathematical Statistics] / K. V. Baldin, V. N. Bashlykov, A. V. Rukosuev – M. : Flinta, NOU VPO MPSI, 2010. – 488 p.

7 **Karlov, A. M.** Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika dlya ekonomistov. Uchebnoe posobie [Probability Theory and Mathematical Statistics for Economists: A Textbook.] // A. M. Karlov. – M. : Knorus. – 2015. – 268 p.

8 **Smirnov, A. V., Kuznetsov, V. D.** Komp′yuternoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov v metalloobrabotke [Computer Modeling of Technological Processes in Metalworking] // Vestnik mashinostroeniya. – 2020. – № 3. – P. 45–52.

9 **Novikov, D. S.** Tekhnologiya vydavlivaniya v mashinostroenii. [Extrusion Technology in Mechanical Engineering] – M. : Mashinostroenie, 2016. – 280 p.

10 **Zhang, L., Wang, Y.** Numerical simulation of metal extrusion processes using DEFORM-3D // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 265. – P. 250–260.

Поступило в редакцию 14.10.25.
Поступило с исправлениями 04.11.25.
Принято в печать 06.11.25.

Н. Ж. Айкенбаева[1], Ж. А. Ашкеев[2], С. С. Айнабекова[3],
М. Ж. Абишкенов[4], И. С. Тавшанов[5]
[1,2,3,4,5]Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.

14.10.25 ж. баспаға түсті.
04.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
06.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

МАТРИЦАНЫҢ ЖАБЫҚ ҚУЫСЫНДА СЫРТҚЫ ЖҮКТЕМЕЛЕРДІҢ АСИММЕТРИЯЛЫҚ ҚОЛДАНЫЛУЫН ЖҮЗЕГЕ АСЫРАТЫН ПРОЦЕСТІ ФИЗИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Мақалада матрицаның жабық қуысындағы металл дайындамаларын экструдтау процесінің физикалық модельдеуі, матрицаның ашылу орталықтары мен Деформацияланатын соққының орын ауыстыруы арқылы қол жеткізілетін сыртқы жүктемелердің асимметриялық қолданылуы келтірілген. Бұл процесс металдың бір бағытты ағынын өзгертуге бағытталған, бұл жарықтар мен жарықтар сияқты ақаулардың

пайда болу ықтималдығын едәуір азайтады және алынған соғулардың сапасын жақсартады. Ұсынылған әдістің тиімділігін тексеру үшін сыртқы жүктемелердің асимметриялық қолданылуымен матрицаның жабық қуысында деформация процесін нақты бағалауға мүмкіндік беретін қабатты модельдер әдісін қолдана отырып зертханалық тәжірибелер жүргізілді. Деформация процесінің оңтайлы параметрлерін анықтау үшін таңдалған зерттеу объектісінде екі факторлы эксперимент жүргізілді және эксперименттік деректерді статистикалық өңдеу нәтижелері бойынша жабық матрицаның саңылауына металды сығу процесін барабар сипаттайтын математикалық модель (регрессия теңдеуі) алынды.

Алынған математикалық модель жарамды және матрицаның жабық қуысында дайындамаларды өңдеу кезінде технологиялық және геометриялық параметрлерді анықтауға болады. Компьютерлік модельдеу бұл бақылауларды 1–2 диапазонындағы максималды пластикалық деформация аймағындағы сдысу деформацияларының қарқындылығын анықтау арқылы растады. Нәтижелер экструзия кезінде материалдың әрекетін дәлірек болжауға және соғу сапасын жақсарту үшін технологиялық процесті оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері машина жасау үшін, атап айтқанда автомобиль және авиация өнеркәсібі үшін практикалық маңызы бар, мұнда физика-механикалық қасиеттері жоғары ультра ұсақ түйіршікті немесе наноқұрылымды жоғары сапалы дайындамалар өндірісі қажет.

Кілтті сөздер: физикалық модельдеу, ультра ұсақ түйіршікті құрылым, наноқұрылым, металл деформациясы, компьютерлік модельдеу.

N. Aikenbayeva[1], Zh. Ashkeev[2], S.Ainabekova[3], M. Abishkenov[4], I. Tavshanov[5]

[1,2,3,4,5]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau.

Received 14.10.25.
Received in revised form 04.11.25.
Accepted for publication 06.11.25.

PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS IMPLEMENTING THE ASYMMETRIC APPLICATION OF EXTERNAL LOADS IN A CLOSED CAVITY OF THE MATRIX

The article presents a physical simulation of the extrusion process of metal workpieces in a closed die cavity with an unsymmetric application of external loads, achieved by shifting the centers of the die hole and the deforming punch. This process is aimed at changing the unidirectional flow of metal, which significantly reduces the likelihood of defects such as cracks and tears, and improves the quality of the resulting forgings. To test the effectiveness of the proposed method, laboratory experiments were conducted using the method of layered models, which make it possible to visually assess the deformation process in a closed cavity of the matrix with an asymmetric application of external loads. To determine the optimal parameters of the deformation process, a two-factor experiment was conducted on the selected research object and, based on the results of statistical processing of

experimental data, a mathematical model (regression equation) was obtained that adequately describes the process of metal extrusion into a hole in a closed matrix.

The resulting mathematical model is suitable and can be used to determine the technological and geometric parameters when processing workpieces in a closed cavity of the matrix. Computer modeling confirmed these observations, revealing the intensity of shear deformations in the zone of maximum plastic deformation in the range of 1–2. The results obtained make it possible to more accurately predict the behavior of the material during extrusion and optimize the technological process to improve the quality of forgings.

The results of the study are of practical importance for mechanical engineering, in particular for the automotive and aviation industries, where the production of high-quality blanks with ultrafine-grained or nanostructured materials with enhanced physical and mechanical properties is required.

Keywords: physical modeling, ultrafine-grained structure, nanostructure, metal deformation, computer modeling.

МРНТИ 53.11.29

https://doi.org/10.48081/YSPV5983

М. С. Алмагамбетов[1], М. К. Джундибаев[2], Т. В. Халитов[3],
****Е. У. Жумагалиев[4], Е. Ж. Шабанов[5]***

[1,2,3]Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG,
Республика Казахстан, г. Актобе;
[4,5]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Актобе.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5501-1385
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2915-378X
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1819-4415
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2227-0661
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6902-1211
*e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz

ОКУСКОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ФЕРРОХРОМНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В работе исследован процесс окускования вторичных продуктов феррохромного производства с целью их переработки и повторного вовлечения в металлургический цикл. Проанализированы физико-химические характеристики шламов и пылевых выбросов, их гранулометрический состав, влажность и содержание оксидов хрома, железа и кремния. Проведены лабораторные эксперименты по формированию окатышей с применением различных связующих: бентонита, извести, жидкого стекла и органических добавок, а также их комбинаций. Для характеристики материалов использованы методы рентгенофазового анализа, микроскопии и химического анализа. Оптимизированы параметры окускования – соотношение компонентов, влажность шихты, режимы сушки и термообработки – с учётом влияния на образование кристаллических фаз и прочностные свойства. Оценены механическая прочность, термостойкость и устойчивость гранул к механическим воздействиям и агломерации в процессе транспортировки и загрузки в печь. Определены оптимальные технологические параметры окускования: влажность, температура термообработки, время сушки и соотношение компонентов. Проведены пилотные испытания технологии на производственных образцах; выполнен экономико-экологический анализ внедрения. Результаты показали, что использование комбинированных связующих и рациональных технологических режимов обеспечивает получение прочных, термоустойчивых, пригодных для переработки окатышей, что снижает объём отходов и повышает ресурсную эффективность производства.

Ключевые слова: феррохром, окускование, связующее, брикеты, брэксы, окатыши, прочностные характеристики.

Введение

Производство высокоуглеродистого феррохрома - это энергоёмкий металлургический процесс, в котором хромовая руда восстанавливается углеродсодержащими материалами в дуговых электропечах переменного (SAF) или постоянного тока [1, с.3], [3, с.2]. При этом наряду с целевым продуктом - феррохромом, образуется значительное количество вторичного сырья, в виде шлака, аспирационной пыли и шлама [6, с.4], [9, с.5]. Шлак представляет собой ценное сырьё для применения в дорожном и строительном секторах [12, с.1,2]. Шлаковый щебень в 1,5–2 раза дешевле природного, шлаковая пемза – втрое дешевле керамзита и требует меньших удельных затрат [13, с.4]. Утилизация шлака осуществляется путём его дробления и отделения металлической составляющей. Полученный дроблёный материал используется в качестве строительного щебня, тогда как извлечённый металл направляется на получение товарной продукции либо концентрата.

Переработка пыли, образующихся при производстве ферросплавов, одновременно может решить ряд важных задач: снижает или полностью устраняет негативное влияние техногенных отходов на атмосферу и водные ресурсы, обеспечивает возврат ценных компонентов в основной технологический процесс, способствует снижению себестоимости продукции за счёт повторного использования сырья, а также открывает возможности для выпуска новых видов продукции на основе промышленных отходов [14, с.1].

В процессе производства феррохрома значительные объёмы пыли улавливаются с помощью систем сухой и мокрой газоочистки, установленных на электропечах. Мокрая система пылеулавливания эффективнее по сравнению с сухой газоочисткой, но более затратная. Помимо этого, вместо сухой пыли образуется вторичное сырье с содержанием влаги 15–25 %. Если пыли сухих газоочисток можно возвращать в основной передел, предварительно окусковав при необходимости [15, с.2,3], то для влажного вторичного сырья (далее - ВВС) требуется принудительная сушка и в некоторых случаях измельчение перед окускованием.

ВВС, со средним содержанием оксида хрома на уровне 24 %, считается не пригодным для прямой металлургической переработки. Одним из возможных решений этой проблемы является введение в состав ВВС более богатых по содержанию Cr_2O_3 сухих пылей. Такое добавление позволяет не только снизить общую влажность получаемой смеси, но и увеличить концентрацию оксида хрома в ней. Тогда, единственным нерешенным вопросом остается выбор наиболее эффективного способа для окускования вышеуказанной смеси пыли сухих и мокрых газоочисток. Согласно данным исследований [20, с.2], ВВС обладает более чем в два раза развитой удельной поверхностью по сравнению с пылями сухой газоочистки. Развитая поверхность ВВС способствует повышенной слипаемости материала, что улучшает его пригодность к процессу окускования.

Таким образом, целью настоящей работы является выбор оптимального способа и технологических параметров холодного окускования смеси ВВС и сухих пылей, с подбором соответствующих связующих веществ.

Материалы и методы

Для проведения лабораторных исследований по отработке технологии холодного окускования ВВС в смеси с богатой пылью аспирации при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в руднотермической печи открытого типа (далее пыль № 1) и пылью аспирации после сушки хромовой руды (далее пыль № 2) в условиях лаборатории приняты следующие условия: соотношение материалов в смеси для окускования на сухую массу: ВВС – 48 %; пыль № 1 – 8 %; пыль № 2 – 44 %. Соотношение материалов связанно с объёмом образования на реальном производстве [3, с.2,3].

Химический состав используемых материалов приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав материалов для окускования

Материал	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO	C	S	P
ВВС	24	23	8	35	3	7	6	3,46	0,19
Пыль №1	41	11	1	20	7	13	5	0,16	0,01
Пыль №2	45	11	0,5	20	7	12	1	0,03	0,01

Перед началом работ ВВС просушили до остаточной влажности 0,5% и размололи на стержневой мельнице до фракции менее 0,5 мм.

В качестве связующих материалов использовали:

– Цемент марки М 400

– Бентонитовый глинопорошок

– Связующее на основе полиакриламида (ПАА)

– Полимерное связующее на основе эпоксидных смол (ПС)

– Связующее на основе модифицированного лигносульфаната (ЛМ).

Методика брикетирования на лабораторном прессе

Дозировка пыли и связующего осуществлялось по массе. Первичное смешение компонентов осуществляли в сухом состоянии в течение 5 минут на лабораторном смесителе KENWOOD KVC51. Затем добавляли воду и продолжали перемешивание влажной смеси до полного распределения воды по всему объему. Для брикетирования использовали цилиндрическую форму диаметром 30мм. Готовую смесь порционно засыпали в пресс-форму, и брикетировали на гидравлическом прессе ИП-1000 с усилием прессования 2,9 кН/см2. Указанное усилие прессования выбрано исходя из характеристик промышленных гидравлических прессов. Внешний вид изготовленных брикетов показан на рисунке 1 [4, с.6-7].

Рисунок 1 – Внешний вид готовых брикетов

Часть готовых брикетов подвергли принудительной сушке при температуре 120 ℃ в течение 3 часов до остаточной влажности менее 0,5 %. Остальную часть брикетов сушили в естественных условиях (20–25 °С, влажность воздуха 50–75 %) в течение 3 суток с последующим замером прочности на раскол по ГОСТ 24765-81 (через 1 и 3 суток). Механическую прочность на сброс определяли по ГОСТ 25471-82, на удар и истирание по ГОСТ 15137-77 [6, с.5-6].

Результаты замера прочностных показателей, составы и параметры брикетирования представлены в таблице 2. Замер прочности брикетов диаметром 30 мм полученных на гидравлическом прессе на раскол показан на рисунке 2.

Таблица 2 – Параметры брикетирования и показатели прочности брикетов на раскол

№	Тип связующего	Расход связующего, %	Влага*, %	Прочность на раскол, кгс/брикет			
				1 суток	3 суток	120°С 3ч	
1	Цемент	4	10	33,0	25,0	39,6	
2	Цемент	5	10	31,0	34,0	37,0	
3	ПАА	1	10	45,6	95,3	100,0	
4	ПАА	2	10	48,3	212,0	191,0	
5	ПАА /цемент	1/4**	10	46,6	121,3	89,0	
6	ПС	1	10	21,0	33,0	28,3	
7	ПС	2	10	24,0	80,0	57,6	
8	ПС/цемент	1/4**	10	23,6	42,0	28,6	

*количество добавленной воды сверх сухой массы материалов без учета связующего материала

**соотношение полимерное связующее/цемент 1:4

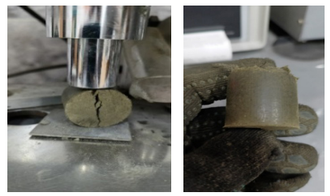


Рисунок 2 – Испытание прочности брикетов на раскол

Согласно полученных результатов наиболее высокие показатели прочности на раскол были достигнуты с использованием связующего материала на основе полиакриламида (ПАА) (вариант № 4).

Методика вибробрикетирования

Метод вибропрессования рассматривается как одно из перспективных направлений окускования [10, с.9-10], поскольку формование осуществляется за счёт одновременного воздействия вибрации и давления на исходную смесь. В процессе вибрации частицы материала самопроизвольно занимают оптимальное положение, исключающее появление внутренних напряжений и упругих деформаций. При этом удельное давление на смесь остаётся низким – не более 2 МПа. С энергетической точки зрения данная технология отличается высокой экономичностью. Основные её достоинства включают: высокую производительность (до 50 т/ч), отсутствие отходов, экологическую безопасность, низкое энергопотребление, полную автоматизацию производственного процесса и минимальные временные затраты на изготовление продукции.

Материалы для вибробрикетирования отдельно взвешивали, затем загрузили в одношнековый смеситель БП-1Г-100 и производили сухое перемешивание в течение 7 минут. Далее добавили воду и продолжили влажное перемешивание до полного распределения воды (около 7 минут) по всему объему смеси. По завершении перемешивания готовую смесь извлекли из смесителя, затем загрузили в приемный отсек (загрузчик) вибропресса марки Titan-Z3. После этого включили сам пресс и изготовили брикеты. Диаметр брикетов по вершинам шестиугольника составляет 80 мм, высота брикета также равна 80 мм. Как и в выше выполненной работе, брикеты подвергались принудительной сушке при температуре 120 ℃ в течение 5 часов и при естественных условиях на протяжении 3 суток. Увеличение времени принудительной сушки объясняется тем, что при сушке в течение 3 часов в середине брикета остается недосушенная область (рисунок 3).

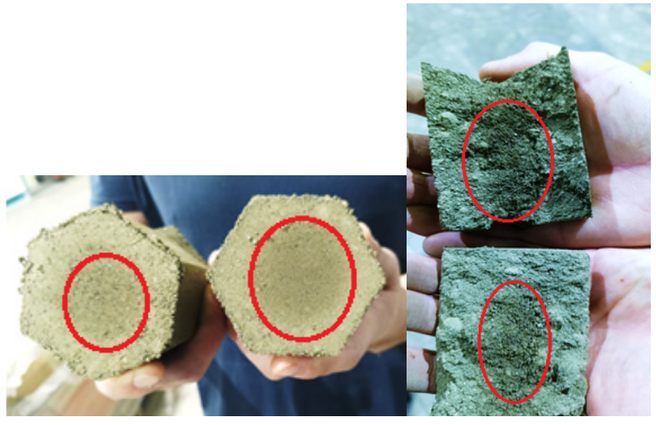


Рисунок 3 – Внешний вид и середина готовых брикетов

Замеры прочностных характеристик наработанных брикетов не зависимо от способа сушки показали крайне неудовлетворительные результаты. Показатели прочности на раскол, а также на удар и истирание были ниже предела определения приборов. Одной из возможных причин полученных результатов может являться не достаточная пластичность смеси.

Учитывая этот факт было решено заменить полимерное связующее (ПАА) на органическое связующее (ЛМ) и повторить испытания вибробрикетирование. Результаты замера прочностных показателей и состав брикетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты прочностных характеристик брикетов

Тип связующего	Расход, %	Влага, %	Вид испытания 3 суток		Способ сушки	
					120℃ 5ч	
ЛМ	4	8	прочность	на раскол, кг/брикет	8,6	72,3
				на удар, % (+5мм)	36,0	72,6
				на истирание, % (-0,5мм)	39,0	11,3
				на сброс, % (+5мм)	74,0	94,1

Данный вариант брикетирования показал более высокие прочностные показатели в отличие от предыдущего. В целом, по результатам лабораторных опытов выявлено, что независимо от типов применяемых связующих и параметров брикетировочного оборудования, достичь целевых показателей по прочностным характеристикам брикетов не удалось. Это связано с тем, что, во-первых, вибропрессование хорошо работает с более крупнозернистыми материалами, а не с пылевидными смесями. У мелкодисперсных материалов при вибрации может происходить их «всплытие», а не уплотнение. Во-вторых, как было сказано выше, в вибропрессах давление недостаточно для уплотнения между собой частиц смеси. В результате низкого давления формования происходит неполное удаление воздуха из брикета, что приводит к неплотному прилеганию частиц сырья и связующего между собой [11, с.9].

Методика экструдирования

Метод экструдирования пыли ферросплавного производства заключается в создании экструзионных брикетов (далее – брэксы) путём уплотнения смеси шнеком и удаления воздуха и лишней влаги между частицами материала с продавливанием через фильеру с круглыми отверстиями. Это способствует более плотной упаковке и получению прочных брэксов [12, с.1]. Длина брэксов определяется их плотностью и пластичностью, формой и размером отверстий

фильеры. В результате роста изгибающего момента, возникающего под действием увеличивающегося веса брэксов по мере роста их длины при выходе из фильеры, брэксы обламываются. Для экструдирования подготовили смесь, идентичную, как и для брикетирования на гидравлическом прессе. Готовую смесь пропускали через шнековый гранулятор марки ФШ-004РК02 (далее экструдер) с диаметром канала фильеры 16 мм. После формовки часть брэксов подвергалась принудительной сушке при температуре 120°С в течение 3 часов. Другую часть брэксов сушили в естественных условиях в течение 1 и 3 суток. Внешний вид брэксов показан на рисунке 4.

Рисунок 4 – Внешний вид брэксов

После сушки брэксов замерили их прочность на раскол (рисунок 5). Результаты замера прочностных показателей, составы и параметры экструдирования представлены в таблице 4.

Рисунок 5 – Испытание прочности брэксов на раскол

Таблица 4 – Параметры экструдирования и показатели прочности брэксов на раскол

№	Тип связующего	Расход, %	Влага, %	Прочность на раскол, кгс/брэкс		
				1 суток	3 суток	120°С 3ч
1	Бентонит	6	14	32,6	75,4	107,0
2		8	14	33,2	71,0	122,2
3	ПАА	1	12	45,8	141,4	127,0
4	ПАА/ Бентонит	1/3*	13	64,0	178,4	96,2
5	ПС	1	12	31,4	164,8	121,0
6		2	12	43,4	205,4	107,4
7	ПС/ Бентонит	1/3*	13	59,4	179,4	59,0
8	ЛМ	3	10	0	55,2	148,2

*соотношение полимерное связующее/бентонит 1:3

Согласно полученным результатам, высокие показатели прочности на раскол были достигнуты с использованием связующих материалов таких как ПАА и ПС (варианты №3 и 5) независимо от способа сушки. При выходе из фильеры брэксы получались без микротрещин и задиров. Сама экструдируемая смесь была достаточно пластичной и не вызывала каких-либо технологических затруднений при формовании.

В остальных вариантах смесей, для достижения приемлемых показателей по прочности на раскол требуются определенные условия сушки или увеличение расхода связующего материала. Например, при использовании бентонита требуется увеличение его расхода и только принудительная сушка. Те же самые условия требуются при комбинировании бентонита и полимерных связующих [13, с.4].

После оценки результатов прочности на раскол наработали партию брэксов по вариантам № 3 и 5 (с использованием связующих материалов ПАА и ПС при расходе в количестве 1 %). Часть брэксов высушили в естественных условиях, часть через принудительную сушку. По завершению операций сушки замерили прочность на сброс, удар и истирание. Параметры экструдирования и показатели прочности представлены ниже в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты прочностных характеристик брэксов

Тип связующего	Расход, %	Влага, %	Вид испытания		Способ сушки	
			3 суток		120°С 5ч	
ПАА	1	12	прочность	на раскол, кг/брикет	141,4	127,0
				на удар, % (+5мм)	87,3	75,8
				на истирание, % (-0,5мм)	9,4	18,0
				на сброс, % (+5мм)	99,1	97,9
ПС	1	12	прочность	на раскол, кг/брикет	164,8	121,0
				на удар, % (+5мм)	87,0	79,3
				на истирание, % (-0,5мм)	10,1	17,8
				на сброс, % (+5мм)	97,8	97,0

Из полученных данных (таблицы 4–5) видно, что использование полимерных связующих типа ПАА и ПС позволяют получать брэксы с высокими характеристиками прочности.

Методика окомкования на тарельчатом грануляторе

Перед началом работ производили отдельное взвешивание сухих материалов. Общая масса сухой смеси составляла 5 кг.

Процесс подготовки смеси состоял из двух этапов. На первом этапе смесь сухих исходных материалов со связующим перемешивали в течение 5 минут на одношнековом смесителе БП-1Г-100. На втором этапе в смесь добавляли небольшое количество воды (количество подбирали отдельно для каждого вида связующего), после чего уже увлажненную смесь пропускали через сито с размером ячеек 1×1 мм для разрушения образовавшихся комков и получения однородной консистенции.

По окончанию подготовительных работ производили процесс окомкования. Угол наклона тарели гранулятора ГТ-06 составил 45º и скоростью вращения 25–30 об/мин. Готовую увлажненную смесь порционно засыпали в тарельчатый гранулятор. При необходимости в процессе гранулирования допускалось доувлажнение смеси с помощью пульверизатора. Объем дополнительной влаги учитывался по окончанию эксперимента.

Полученные фракции окатышей рассевали через сита с размерами ячеек 12×12 мм и 14×14 мм (рис. 6). Окатыши выгружали и раскладывали в металлические поддоны в один слой. Часть готовых окатышей высушивали в сушильной печи при температуре 120°С до полного удаления влаги с последующим определением их прочности на раскол. Вторую половину готовых окатышей сушили в естественных условиях с определением замеров прочности на раскол после 1 и 3 суток. Для определения прочности гранул использовали лабораторные пресса RB-1000 и ИПГ-1М в зависимости от пределов прочности окатышей.

Рисунок 6 – Готовые окатыши фракции 12–14мм

Для определения прочностных показателей окатышей, с каждой серии эксперимента были отобраны по 10 образцов окатышей фракции 12–14 мм. Фотографии полученных окатышей представлены на рисунке 7. Результаты прочностных характеристик окатышей представлены в таблице 6.

Рисунок 7 – Внешний вид сырых окатышей

Таблица 6 – Параметры окомкования и показатели прочности окатышей на раскол

№	Тип связующего	Расход, %	Влага, %	Прочность на раскол, кг/окатыш		
				1 суток	3 суток	120°С 3ч
1	Бентонит	1	9,5	3,0	6,9	7,0
2	Бентонит	2		4,2	7,6	7,8
3	ЛМ	2		9,4	41,8	49,0
4	ЛМ	3		11,4	44,9	49,3
5	Бентонит/ЛМ	1/3*		9,2	9,4	9,8
6	ПАА	1		0	0	0
7	ПАА	2		-	-	-
8	ПАА/Бентонит	1/2**		8,6	9,7	11,5
9	ПС	1		0	0	0
10	ПС	2		0	0	0
11	ПС/ Бентонит	1/2**		0	4,2	4,6

* соотношение бентонит/ полимерное связующее 1:3

**соотношение полимерное связующее/бентонит 1:2

По результатам таблицы 6 можно сделать вывод, что наиболее высокие показатели прочности на раскол достигаются с использованием связующего материала ЛМ с расходом 2 % и 3 %. Прочность высушенных окатышей в естественных условиях в течение 3-х суток и высушенных принудительно в сушильной печи достигает 45–50 кгс/окатыш. Окатыши с использованием всех остальных видов связующих материалов оказались менее прочными, которые разрушались по воздействию усилия, не достигавшим ~10 кгс/окатыш по среднему значению. Помимо высоких показателей прочности полученных окатышей с использованием ЛМ, использование данного вида связующего отличается от других связующих высокой степенью комкуемости, который является одним из главных показателей характеризующий процесс окомкования [13, с.15].

Необходимо отметить, что несмотря на одинаковые условия грануляции для всех типов связующих материалов, процесс окомкования не всегда был стабильным. При использовании связующих типа ПАА и ПС процесс грануляции смеси вовсе не проходил. Шихта залипала на поверхности тарели гранулятора, тем самым нарушая процесс образования окатышей. Периодическое очищение тарели от налипающего материала, снижение расхода связующих и влажности смеси не привело к стабилизации процесса окомкования.

Серия опытов с использованием таких связующих как Бентонит, ПС, а также комбинация связующих Бентонит/ЛМ, ПАА/Бентонит и ПС/Бентонит несмотря на стабильный режим окомкования, имеют меньший выход годных окатышей и прочность в разы ниже чем прочность окатышей с использованием ЛМ.

По итогам серии испытаний, в качестве основного связующего было определено ЛМ с добавкой 3 % от массы сухой шихты. Далее наработали партию окатышей в количестве 20 кг с последующей принудительной и естественной сушкой. После наработки партии окатышей с использованием ЛМ замерили их прочностные характеристики. Помимо перечисленных показателей прочности, были определены так же прочности на раскол сырых, после сушки в естественных условиях в течение 1 и 3 суток, а также после полного удаления влаги в сушильном шкафу. На рисунке 8 представлены фотографии окатышей после испытаний на сброс, удар и истирание. Параметры и результаты определения прочностных характеристик опытной партии представлены в таблицах 7 и 8.

Рисунок 8 – Внешний вид окатышей после испитаний на сброс, удар и истирание

Таблица 7 – Прочность на раскол сырых и высушенных окатышей

Тип связующего	Расход, %	Влага, %	Прочность на раскол, кг/окатыш			
			Сырые	1 сут.	3 сут.	120℃
ЛМ	3	6+3	6,5	18,5	53,0	66,2

Согласно данным таблицы 7, сырые окатыши имеют прочность на раскол 6,51 кгс/окатыш, высушенные в диапазоне 53,0–66,2 кгс/окатыш. Учитывая полученные результаты, для замеров прочности на сброс, удар и истирание выбрали вариант окатышей с принудительной сушкой при 120 °С (таблица 8), так как окатыши, высушенные в естественной среде, имели низкую прочность на раскол.

Таблица 8 – Прочность на сброс, удар и истирание высушенных окатышей при 120°С

Тип связующего	Расход, %	Влага, %	Прочность высушенных окатышей при 120 °С, %		Прочность на сброс высушенных окатышей при 120°С, %
			удар (+5 мм)	истирание (-0,5 мм)	+ 5 мм
ЛМ	3	6+3	96,9	1,9	100,0

Полученные окатыши обладают 100 % прочностью на сброс и имеют 96,9 % прочности на удар.

Результаты и обсуждение

В данной работе были исследованы следующие методы окускования – брикетирование, экструзия и окомкование с использованием различных видов связующих в разных соотношениях.

Проведенные лабораторные исследования показывают, что ВВС можно вернуть обратно в металлургический передел для выплавки феррохрома, предварительно высушив сырье и окусковав его. В ходе проведения лабораторных опытов установлено, что приемлемыми технологиями для окускования ВВС являются экструзия и грануляция.

Наилучшие результаты были получены при использовании полимерных связующих (ПАА, ПС) и органическое связующее растительного происхождения (ЛМ). Применение этих видов связующих обеспечивают более высокие показатели механической прочности на раскол, на удар и сопротивление истиранию. Использование связующих в виде Бентонита и Цемента не привели к требуемым прочностным характеристикам полученных окускованных продуктов.

Сравнительная оценка механических свойств, показывает, что окускованные продукты характеризуются более высокими показателями прочности после принудительной сушки при 120 °С (рис.9–10). Исключением является окускование экструзией, при котором брэксы лучше упрочняются в естественной среде (рис.11–12), которые характеризуются с высокими значениями прочности на раскол – 141,4 кгс/брэкс (брэксы ПАА) и 164,8 кгс/брэкс (брэксы ПС). Это, в свою очередь, свидетельствует о способности брэксов сохранять целостность под воздействием разрушительных нагрузок, возникающих при пересыпании или перемещении слоя в печи. Брэксам требуется от 30 до 36 часов, чтобы полностью набраться прочности, превышающей уровни, необходимые для транспортировки и загрузки в погружную электродуговую печь. Полученные окатыши демонстрируют 100 % прочность при испытаниях на сброс и обладают ударной прочностью на уровне 96,9 %. По результатам исследовании брэксы и окатыши удовлетворительно противостояли ударным нагрузкам и сохраняли целостность при испытаниях. Высокие прочностные характеристики брэксов возможно связано с тем, что полимерные связующие обладают адгезионными и пленкообразующими свойствами, которые в условиях влажной среды равномерно распределяются на поверхности частиц, образуя вязкоэластичные пленки. В процессе экструдированные полимерные связующие (ПАА, ПС) дополнительно активируются за счет сдвиговых напряжений и трения, усиливая сцепление между частицами. Также, придают смеси вязко-пластичные свойства, необходимые для прохождения через фильеру и обеспечивают равномерную плотность по всему объему материала. Брэксы на основе полимерных связующих не растрескиваются из-за внутренних напряжений. Что касается окатышей, органическое связующее ЛМ повышает комкуемость смеси при окомковании, облегчая формирование окатышей с плотным ядром и пористой оболочкой. Кроме того, ЛМ улучшает смачиваемость и пластичность гранулируемой смеси, что особенно важно для стабильности процесса окомкования на тарельчатом грануляторе.

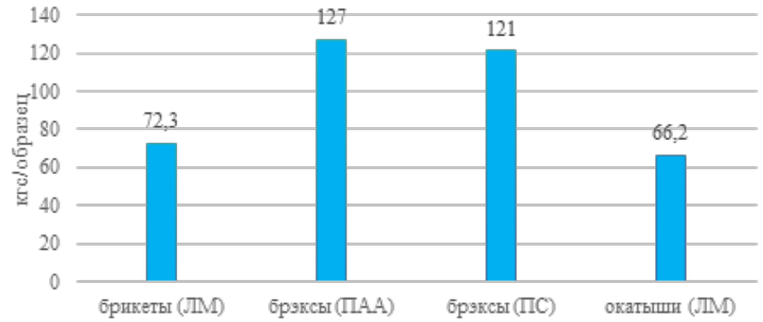


Рисунок 9 – Результаты испытания на раскол после принудительной сушки при 120 °С

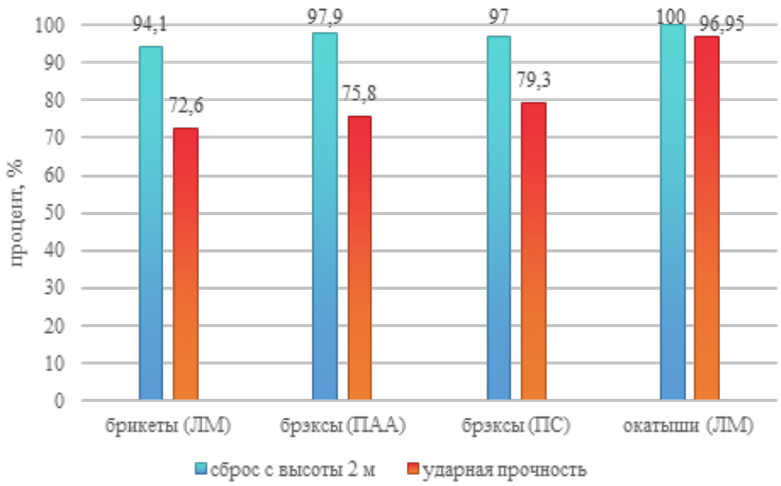


Рисунок 10 – Результаты испытания на сброс и ударную прочность после принудительной сушки при 120 °С

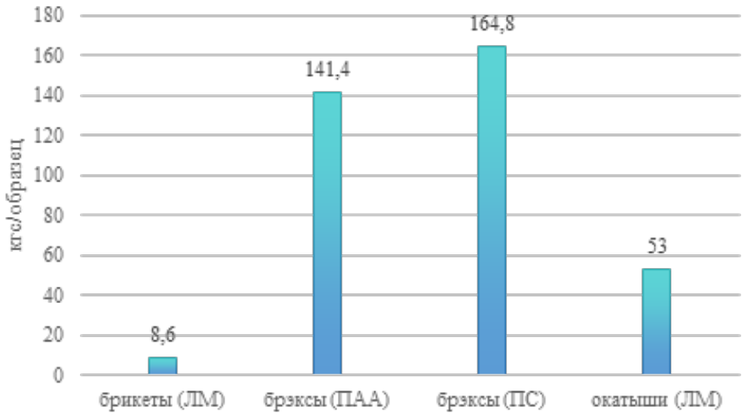


Рисунок 11 – Результаты испытания на раскол
при естественной сушке (3 сутки)

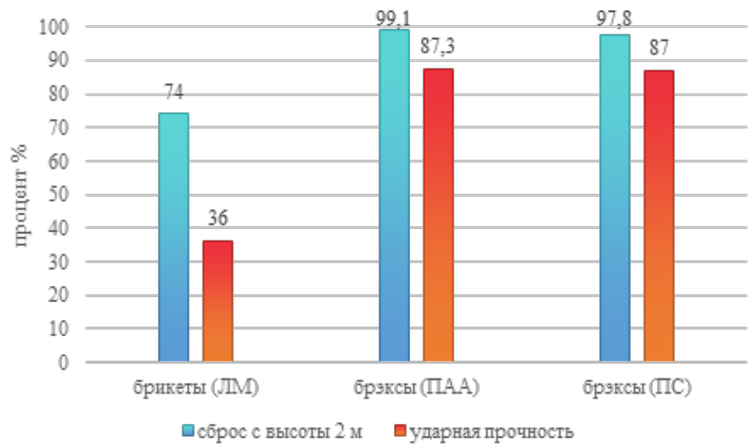


Рисунок 12 – Результаты испытания на сброс и ударную прочность
при естественной сушке (3 сутки)

Информация о финансировании

В статье приведены результаты научных исследований, полученных в ходе реализации научно-технической программы ИРН-BR24992882 - ОТ-24 «Разработка новых технологий переработки производственных отходов с улучшением экологической обстановки в регионе» в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам на 2024-2026 гг.

Выводы

Таким образом, результаты проведенных испытании по окускованию ВВС показывают:

– окускование ВВС в смеси с богатыми пылями методом вибропрессования независимо от расхода связующих материалов не позволяет получить брикеты с требуемыми прочностными характеристиками для дальнейшего металлургического передела;

– использование метода экструзии и грануляции позволяют получать окускованный продукт в виде брэксов и окатышей, показатели прочности которых полностью удовлетворяют требованиям к окускованным материалам для производства феррохрома;

– использование полимерных (ПС) и органических связующих (ЛМ), обладающих свойствами выгорания не приводит к разубоживанию хромсодержащего сырья, что позволяет получить окускованный материал с содержанием оксида хрома (Cr_2O_3) не ниже 35 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Oterdoom, H., Reuter, M., Zietsman, J.** DC Ferrochrome Smelting: The Arcing Zone and Its Influence on Energy Transport and Exergy Dissipation. Metallurgical and Materials Transactions B, 56B (February 2025).

2 **Yessenzhulov, A., Abdulabekov, E.** The New and Reconstructed Facilities at the Enterprise TNK Kazchrome JSC. Paper presented at the conference The Best Available Technologies for Steel and Ferroalloys Production, 14 October 2020.

3 **Shabanov, E. Z., Saulebek, Zh. K., Akhmetov, A. S., Mukhtarkhanova, G. K.** Smelting of High-Carbon Ferrochromium from Pre-Reduced Chromite Raw Materials. CIS Iron and Steel Review, 2024- 27, P. 15–19.

4 **Kapan, S., Çamdali, Ü., Celik, N.** Determination of the Mass Balance of High-Carbon Ferrochrome in a Submerged Arc Furnace. High Temperature Material Processes, 28 (3), 2024, P. 1–8.

5 **Raj, H., Paswan, D. N., Jha, S. K.** Optimization of Process Parameter for Smelting and Reduction of Ferrochrome. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 05 (10), 2016.

6 **Dzhundibaev, M. K., Myrzagaliev, A. A.** Obzor metodov okuskovaniya khromsoderzhashchikh pyley i shlama gazoochistok pri vyplavke ferrokhroma. Vestnik Aktjubinskogo regional'nogo universiteta imeni K. Zhubanova, 1 (79), 2025, 235–241.

7 **Sariyev, O., Abdirashit, A., Almagambetov, M., Nurgali, N., Kelamanov, B., Yessengaliyev, D., Mukhambetkaliyev, A.** Assessment of Physicochemical Properties of Dust from Crushing High-Carbon Ferrochrome : Methods for Agglomeration. Materials, 2025, 18, 903.

8 **Zhuchkov, V. I., Zayakin, O. V., Sychev, A. V.** Slags and Dusts of Ferroalloy Production. Russian Metallurgy (Metally), 2020. – P. 662–666.

9 **Ajay, C., Durga, R.** Sustainable Use of Ferrochrome Slag and Quarry Dust Composites as Cement-Bound Layers of Flexible Pavement. Global NEST Journal, 26 (3), 2024. – P. 1–9.

10 **Zapate, V., Patil, V. A., Takkalaki, S. R., Sawant, R. S.** Effect of Ferrochrome Slag as Partial Replacement of Coarse Aggregate on Strength and Durability of Concrete. International Engineering Journal for Research & Development, 8 (1)-2023.

11 **Al Jabri, K. S.** Research on the Use of Ferro-Chrome Slag in Civil Engineering Applications. MATEC Web of Conferences, 149–2018.

12 **Jena, S., Panigrahi, R.** Evaluation of Durability and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete with Ferrochrome Slag as Coarse Aggregate. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46, 1201–1210, July 2021.

13 **Кожамуратов, Р. У., Сафаров, Р. З., Шоманова, Ж. К., Носенко Ю. Г.** Утилизация отходов ферросплавного производства In: Proceedings of the International Scientific Conference “Global Science and Innovations 2017” (Bursa, Turkey), P. 207–213.

REFERENCES

1 **Oterdoom, H., Reuter, M., Zietsman, J.** DC Ferrochrome Smelting: The Arcing Zone and Its Influence on Energy Transport and Exergy Dissipation. Metallurgical and Materials Transactions B, 56B (February 2025).

2 **Yessenzhulov, A., Abdulabekov, E.** The New and Reconstructed Facilities at the Enterprise TNK Kazchrome JSC. Paper presented at the conference The Best Available Technologies for Steel and Ferroalloys Production, 14 October 2020.

3 **Shabanov, E. Z., Saulebek, Zh. K., Akhmetov, A. S., Mukhtarkhanova, G. K.** Smelting of High-Carbon Ferrochromium from Pre-Reduced Chromite Raw Materials. CIS Iron and Steel Review, 2024- 27, P. 15–19.

4 **Kapan, S., Çamdali, Ü., Celik, N.** Determination of the Mass Balance of High-Carbon Ferrochrome in a Submerged Arc Furnace. High Temperature Material Processes, 28 (3), 2024, P. 1–8.

5 **Raj, H., Paswan, D. N., Jha, S. K.** Optimization of Process Parameter for Smelting and Reduction of Ferrochrome. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 05 (10), 2016.

6 **Dzhundibaev, M. K., Myrzagaliev, A. A.** Obzor metodov okuskovaniya khromsoderzhashchikh pyley i shlama gazoochistok pri vyplavke ferrokhroma. Vestnik Aktjubinskogo regional’nogo universiteta imeni K. Zhubanova, 1 (79), 2025, 235–241.

7 **Sariyev, O., Abdirashit, A., Almagambetov, M., Nurgali, N., Kelamanov, B., Yessengaliyev, D., Mukhambetkaliyev, A.** Assessment of Physicochemical Properties of Dust from Crushing High-Carbon Ferrochrome : Methods for Agglomeration. Materials, 2025, 18, 903.

8 **Zhuchkov, V. I., Zayakin, O. V., Sychev, A. V.** Slags and Dusts of Ferroalloy Production. Russian Metallurgy (Metally), 2020. – P. 662–666.

9 **Ajay, C., Durga, R.** Sustainable Use of Ferrochrome Slag and Quarry Dust Composites as Cement-Bound Layers of Flexible Pavement. Global NEST Journal, 26 (3), 2024. – P. 1–9.

10 **Zapate, V., Patil, V. A., Takkalaki, S. R., Sawant, R. S.** Effect of Ferrochrome Slag as Partial Replacement of Coarse Aggregate on Strength and Durability of Concrete. International Engineering Journal for Research & Development, 8 (1)-2023.

11 **Al Jabri, K. S.** Research on the Use of Ferro-Chrome Slag in Civil Engineering Applications. MATEC Web of Conferences, 149-2018.

12 **Jena, S., Panigrahi, R.** Evaluation of Durability and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete with Ferrochrome Slag as Coarse Aggregate. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46, 1201–1210, July 2021.

13 **Kozhamuratov, R. U., Safarov, R. Z., Shomanova, Zh. K., Nosenko, Yu. G.** Utilizatsiya otkhodov ferrosplavnogo proizvodstva // Global Science and Innovations 2017: Proc. Int. Sci. Conf. Turkey, 2017. – P. 207–213.

Поступило в редакцию 08.09.25.
Поступило с исправлениями 18.11.25.
Принято в печать 24.11.25.

М. С. Алмагамбетов[1], М. К. Джундибаев[2], Т. В. Халитов[3],
****Е. У. Жумагалиев[4], Е. Ж. Шабанов[5]***
[1,2,3]ERG ғылыми-зерттеу инжиниринғтік орталығы,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[4,5]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.

08.09.25 ж. баспаға түсті.
18.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
24.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФЕРРОХРОМ ӨНДІРІСІНІҢ ЕКІНШІ ӨНІМДЕРІН КЕСЕКТЕУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ БЕРІКТІК СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Жұмыста феррохром өндірісінің екіншілік өнімдерін қайта өңдеу және оларды металлургиялық циклге қайталап енгізу мақсатында түйіршіктеу (оқускалау) процесі зерттелді. Шламдар мен шаң түріндегі қалдықтардың физика-химиялық сипаттамалары, түйіршік құрамы, ылғалдылығы және құрамындағы хром, темір мен кремний оксидтерінің мөлшері талданды. Әр түрлі байланыстырғыш материалдарды – бентонит, әк, сұйық шыны және органикалық қоспаларды, сондай-ақ олардың комбинацияларын пайдалану арқылы окатыштар қалыптастыру бойынша зертханалық тәжірибелер жүргізілді. Материалдарды сипаттау үшін рентгенфазалық талдау, микроскопия және химиялық талдау әдістері қолданылды. Компоненттердің қатынасы, шихтаның ылғалдылығы, кептіру мен термоөңдеу режимдері сияқты түйіршіктеу параметрлері кристалдық фазалардың түзілуіне

және беріктік қасиеттеріне әсері ескеріле отырып оңтайландырылды. Гранулалардың механикалық беріктігі, термотұрақтылығы және тасымалдау мен пешке жүктеу кезіндегі механикалық әсерлерге төзімділігі бағаланды. Өндірістік үлгілерде пилоттық сынақтар өткізілді және енгізу үдерісінің экономикалық-экологиялық тиімділігі талданды. Зерттеу нәтижелері үйлестірілген байланыстырғыштарды және оңтайлы технологиялық режимдерді пайдалану берік, термотұрақты және қайта өңдеуге жарамды окатыштар алуға мүмкіндік беретінін көрсетті, бұл қалдықтар көлемін азайтып, өндірістің ресурстық тиімділігін арттырады.

Кілтті сөздер: феррохром, кесектеу, байланыстырғыш, брикеттер, брэкстер, түйіршіктер, беріктік қасиеттер.

M. S. Almagambetov[1], M. K. Jundibayev[2], T. V. Khalitov[3], E. U. Zhumagaliyev[4], Ye. Zh. Shabanov[5]
[1,2,3]ERG Research and Engineering Center LLP,
Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[4,5]Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe.
Received 08.09.25.
Received in revised form 18.11.25.
Accepted for publication 24.11.25.

AGGLOMERATION OF SECONDARY PRODUCTS OF FERROCHROME PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THEIR STRENGTH CHARACTERISTICS

The study investigates the process of pelletizing secondary products of ferrochrome production with the aim of recycling and reintroducing them into the metallurgical cycle. The physico-chemical characteristics of sludges and dust emissions, their particle size distribution, moisture content, and concentrations of chromium, iron, and silicon oxides were analyzed. Laboratory experiments were conducted to form pellets using various binders, including bentonite, lime, sodium silicate, and organic additives, as well as their combinations. X-ray diffraction, microscopy, and chemical analysis methods were applied to characterize the materials. Pelletizing parameters–component ratios, mixture moisture, drying, and heat treatment conditions–were optimized considering their influence on crystalline phase formation and strength properties. Mechanical strength, thermal stability, and resistance of the granules to mechanical stress and agglomeration during transportation and furnace loading were evaluated. Pilot tests of the technology were carried out on industrial samples, and an economic and environmental assessment of its implementation was performed. The results demonstrated that the use of combined binders and rational technological regimes ensures the production of strong, heat-resistant, recyclable pellets, reducing waste volume and improving the resource efficiency of ferrochrome production.

Keywords: ferrochrome, agglomeration, binder, briquettes, brex, pellets, strength characteristics.

МРНТИ 53.01.05
https://doi.org/10.48081/SFBX2679

Л. С. Баймолданова[1], А. Д. Погребняк[2], *Р. Е. Сакенова[3], Г. С. Бектасова[4]
[1,3,4]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[2]Сумский государственный университет, Украина, г. Сумы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3533-242X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9218-6492
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6095-0129
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6746-4964
*e-mail: Sakenovarim@gmail.com

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ПОКРЫТИЯХ (TIALSIY)N/CRN ПОСЛЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНАМИ AU⁻

В данной работе представлены результаты комплексного исследования многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN, подвергнутых ионной имплантации ионами золота (Au^-) с энергией 60 кэВ и флюенсом 1×10^{17} ион/см². Целью исследования являлось изучение микроструктурных изменений и элементного распределения, возникающих в результате воздействия имплантации на структуру и состав покрытий. Для анализа использовались методы grazing-инцидентной рентгеновской дифракции (GIXRD), просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM), сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM), вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS), а также моделирование пробега ионов методом SRIM. Установлено, что после имплантации происходит аморфизация приповерхностной зоны толщиной до 20 нм, снижение размера кристаллитов с ~8 до ~4–5 нм, а также межслойное перемешивание, сопровождающееся искажением границ слоёв. SIMS и RBS анализ выявили селективное испарение азота, перераспределение легирующих элементов (Si, Y) и проникновение ионов золота на глубину ~20 нм. Полученные результаты демонстрируют существенное изменение фазового и элементного состояния покрытия и могут быть использованы при разработке функциональных наноструктурированных покрытий, предназначенных для эксплуатации в условиях радиационного воздействия и агрессивных сред.

Ключевые слова: нанослоистые покрытия, TiAlSiY(N)/CrN, ионная имплантация, фазовые превращения, XRD, HRTEM, аморфизация, ионное перемешивание.

Введение

Разработка нанокомпозитных многослойных покрытий на основе нитридов переходных металлов, таких как TiAlSiY(N) и CrN, является одним из перспективных направлений в области создания износостойких и термостойких

материалов для эксплуатации в экстремальных условиях. Комбинация этих покрытий позволяет достичь синергетического эффекта, связанного с высокой твёрдостью, стабильностью при высоких температурах и хорошей адгезией к подложке [1;2;3].

Добавление кремния и иттрия в TiN-систему способствует формированию аморфно-кристаллической матрицы, стабилизации наноразмерной зернистости и повышению термической стойкости. Исследования Zhao и др. [1, с.109194] показали, что TiAlSiN-покрытия, полученные методом имплантация ионов с погружением в плазму с последующим осаждением покрытия (Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition), сохраняют твёрдость до 45 ГПа даже при термической нагрузке. Этот метод представляет собой комбинированный процесс, при котором поверхность материала подвергается ионному бомбардированию из плазмы, а затем на неё наносится тонкая плёнка. Такая технология обеспечивает высокую адгезию покрытий, улучшает их микроструктуру и способствует формированию нанокомпозитной фазы. A Cselle и др. [2, с.345], используя методы TEM (Transmission Electron Microscopy) и SAED (Selected Area Electron Diffraction), подтвердили наличие текстурированной наноструктуры в TiAlSiN-плёнках.

В работе [3, с.1028] авторы провели детальный анализ структуры и свойств покрытий (TiAlSiY)N/CrN, выявив зависимость текстуры и микротвёрдости от параметров осаждения. В другой серии работ [8, с.4], авторы продемонстрировали возможность повышения износостойкости и межслойной стабильности за счёт мультиэлементного легирования и контроля толщины нанослоя. Эти исследования подчеркивают актуальность глубокой инженерии покрытий для условий фрикционных и термических нагрузок.

Метод ионной имплантации давно используется для модификации поверхностных слоёв ионно-плазменных покрытий. Согласно Masenya M. [4, с.123], внедрение тяжёлых ионов, включая золото, приводит к локальной аморфизации, каскадам смещений и перераспределению атомов, особенно в области до 20–30 нм от поверхности. Подобные эффекты подтверждаются и в обзоре МАГАТЭ и Allen [5, с. 45; 6, с. 78], где акцент сделан на образование дефектных зон и нарушении периодичности кристаллической решётки при имплантации.

Моделирование ионных пробегов с помощью программы SRIM [7, с.102] даёт возможность количественно оценить профиль имплантированных атомов и глубину радиационного повреждения, что широко применяется при интерпретации SIMS- и RBS-анализов. Ряд исследований показал, что даже при низких энергиях ионов возможно значительное изменение фазового состава в многослойных структурах.

Казахстанские и российские авторы также внесли вклад в изучение наноструктурных нитридных покрытий. В частности, в работах [9, с. 58; 10, с. 134] приведены результаты по морфологии, структуре и элементному распределению в TiAlSiY(N)/CrN-покрытиях при варьировании параметров осаждения и ионного воздействия. Срезовые SEM-EDS-анализы показали неоднородность

распределения Al и Ti, однако влияние ионной имплантации на границы слоёв и поведение легирующих элементов Si и Y остаётся малоизученным.

Дополнительный интерес представляют работы по изучению ионно-индуцированных фазовых превращений. Исследование Olivero и др. [11, с.210] на кристаллическом алмазе показало формирование аморфных слоёв и внедрённых графитовых каналов под действием ионного пучка. Аналогичные механизмы возможны и в нитридных системах при имплантации тяжёлыми ионами. Также показано, что имплантация может индуцировать сегрегацию отдельных элементов и искажать межфазные границы [12, с. 98; 13, с. 143].

Таким образом, несмотря на богатый массив данных, до сих пор неясно, как именно ионы золота влияют на структуру, текстуру и элементный состав покрытий (TiAlSiY)N/CrN вблизи границ слоёв. Необходимость комплексного исследования с использованием современных аналитических методов, включая HRTEM, STEM, EDS, SIMS и GIXRD, обосновывает актуальность настоящей работы.

Материалы и методы

В качестве исследуемых объектов использовались многослойные покрытия состава (TiAlSiY)N/CrN, осаждённые методом вакуумно-дугового напыления на подложки нержавеющей стали. Процесс осаждения проводился в среде аргон-азот при общем давлении ~0,4 Па [9, с. 56]. Для формирования слоистой структуры использовались два независимых мишенных катода: TiAlSiY (в виде композитной мишени) и Cr. Слои чередовались с толщиной (TiAlSiY)N порядка 18 нм и CrN – около 13 нм. Общая толщина покрытий составляла ~1,5 мкм. Температура подложки поддерживалась в диапазоне 450–500 °C.

После нанесения покрытия образцы подвергались ионной имплантации ионами золота (Au^-) с энергией 60 кэВ при флюенсе 1×10^{17} ион/см². Процесс имплантации проводился при комнатной температуре, под углом падения 7° для равномерного распределения ионов [10, с.102].

Многослойные покрытия состава (TiAlSiY)N/CrN были получены методом катодно-дугового осаждения на установке «Булат-6», расположенной в Сумском государственном университете, г.Сумы. В качестве подложек использовалась нержавеющая сталь марки 12Х18Н9Т (аналог SUS321), размером 18×20×2 мм. Перед нанесением покрытия подложки подвергались механической обработке и ионной очистке. Осаждение проводилось в атмосфере аргон–азот при общем давлении ~0,4 Па. Для формирования многослойной структуры применялись два независимых катода: композитный TiAlSiY и чистый Cr. Чередование слоёв осуществлялось за счёт автоматического вращения подложкодержателя со скоростью 8–10 об/мин, что обеспечивало равномерное распределение покрытия по поверхности. Толщина отдельных слоёв составляла: (TiAlSiY)N ~18 нм и CrN ~13 нм, общая толщина покрытия достигала 1,5–4 мкм. Контроль толщины и архитектуры многослойной структуры проводился по поперечным срезам в просвечивающем электронном микроскопе.

После нанесения покрытий образцы подвергались ионной имплантации ионами золота (Au^-) с энергией 60 кэВ и флюенсом 1×10^{17} ион/см² на ускорителе

Nissin High Voltage Co. Ltd. Имплантация проводилась в вакууме 10^{-4}–10^{-3} Па, при этом ионы Au^- генерировались в плазме с использованием Cs-источника и ускорялись до рабочей энергии 60 кэВ.

Для исследования микроструктуры были подготовлены поперечные срезы методом ионной шлифовки. Образцы предварительно истончались до толщины менее 100 мкм, после чего до прозрачного состояния для электронов доводились в ионном полировальном приборе (Gatan PIPS) с использованием Ar^+-ионов. Такой метод позволил минимизировать артефакты механической обработки и получить высококачественные срезы для HRTEM-анализа.

Анализ микроструктуры и элементного состава проводился с использованием просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM) и сканирующей TEM (STEM) на микроскопе JEOL JEM-2100F с разрешением 0,19 нм. Срезы подготавливались методом ионной шлифовки. Полученные изображения анализировались с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) для выявления зонной симметрии и дефектов кристаллической решётки.

Элементное распределение оценивалось с применением спектроскопии энергии дисперсии рентгеновского излучения (EDS), встроенной в STEM-режим, с разрешением по глубине ~1 нм. Для количественного анализа использовались стандартные эталонные образцы.

Глубинные профили имплантированных ионов, а также перераспределение компонентов анализировались с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS) и метода обратного рассеяния ионов (RBS). SIMS-анализ проводился на приборе CAMECA IMS 7f с использованием Cs^+ и O_2^+ ионов в режиме глубинного травления. Анализ RBS выполнялся с использованием He^+-ионов при энергии 2 МэВ и угле 170°.

Для оценки пробега ионов и радиационного повреждения использовалось моделирование в пакете SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter). Расчёты включали параметры смещения, потери энергии, профиль концентрации Au^- и образование первичных выбитых атомов (ПВА).

Структурный анализ проводился методом grazing-инцидентной рентгеновской дифрактометрии (GIXRD) на дифрактометре PANalytical X'Pert PRO с углом падения 15°. Использовалось излучение CuKα (λ = 1.5406 Å), шаг сканирования 0,02°, диапазон 2θ от 20° до 90°. Размер кристаллитов рассчитывался по формуле Дебая–Шеррера с учётом уширения пиков.

Результаты и обсуждения

Для оценки влияния имплантации ионами золота на кристаллическую структуру многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN проведён grazing-инцидентный рентгеновский дифракционный анализ (угол падения 15°). Результаты представлены на рисунке 1, где синей кривой обозначен образец до облучения, а красной – после.

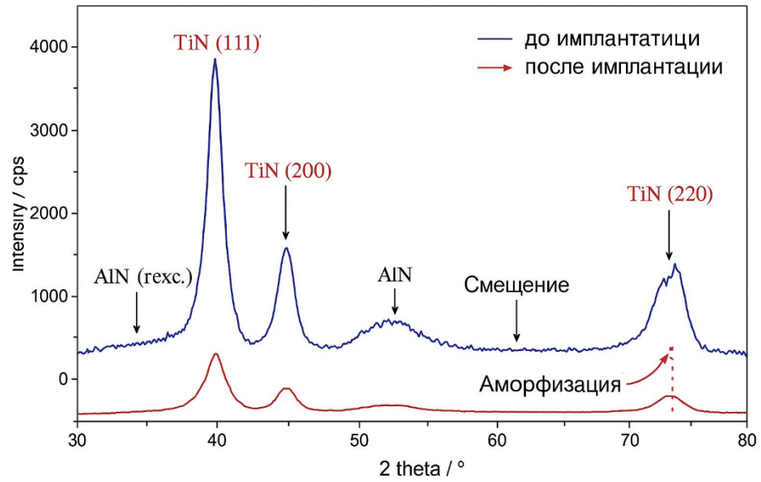


Рисунок 1 – GIXRD-дифрактограммы покрытия (TiAlSiY)N/CrN (угол падения 15°)

До имплантации в дифрактограмме наблюдаются выраженные пики, соответствующие плоскостям (111), (200) и (220) кубической фазы TiN с решеткой NaCl-типа (пространственная группа Fm3m), что свидетельствует о преимущественной текстуре роста. Дополнительно выявлены рефлексы от гексагональной фазы AlN, обусловленные наличием алюминия в системе.

После имплантации наблюдается общее снижение интенсивности основных дифракционных пиков, сопровождающееся изменением их формы. В частности, происходит уширение пиков – увеличение их ширины на уровне половины максимума, что указывает на снижение степени кристалличности. Наиболее выраженные изменения зафиксированы для рефлекса (220), который демонстрирует как уширение, так и смещение в сторону меньших углов. Эти признаки свидетельствуют о росте дефектности, возникновении внутренних напряжений и частичной аморфизации верхнего слоя покрытия. Особенно заметно это в поведении пика TiN(111), интенсивность которого значительно уменьшается, а контур становится менее чётким, что может быть связано с разрушением доминирующей текстуры и фрагментацией зёрен.

Также установлено снижение расчётного размера кристаллитов с ~8 нм до 4–5 нм (по формуле Дебая–Шеррера), что подтверждает фрагментацию зёрен в результате каскадов смещений. Наличие смещений дифракционных максимумов подтверждает развитие остаточных напряжений и изменение локальной плотности структуры. Это указывает на то что, GIXRD-результаты демонстрируют значительное структурное преобразование в зоне имплантации и развитие аморфной фазы.

Для изучения микроструктурных особенностей покрытия (TiAlSiY)N/CrN в исходном состоянии приведены на рисунке 2 с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM) и электронно-дифракционного анализа (Selected Area Electron Diffraction, SAED).

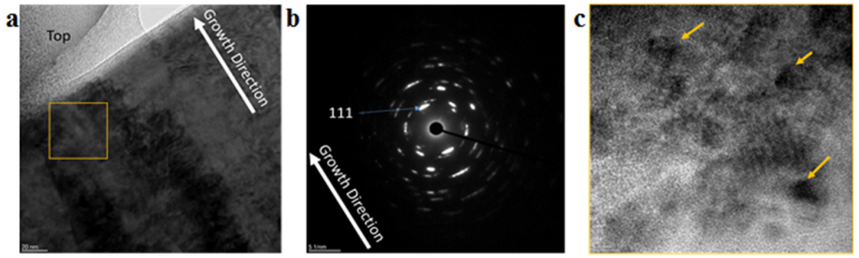


Рисунок 2 – HRTEM и SAED-изображения покрытия (TiAlSiY)N/CrN в исходном состоянии: (a) поперечный разрез с направленным ростом и чередующимися слоями (~18.6 нм); (b) SAED-дифракция с текстурой {111}; (c) нанозерна размером 5–7 нм

На изображении (рис. 2a) ясно различается направленность роста покрытия, обозначенная стрелкой «Growth Direction». Структура характеризуется выраженной столбчатой морфологией с преимущественной ориентацией роста вдоль кристаллографической оси [110]. Слои (TiAlSiY)N и CrN последовательно чередуются с характерной периодичностью около 18.6 нм, что соответствует расчетным значениям. Видимая толщина отдельных кристаллитов составляет ~5–7 нм, что свидетельствует о нанокристалличности покрытия.

Изображение (рис. 2b), полученное в режиме SAED, демонстрирует дифракционную картину, типичную для материалов с кубической решёткой типа NaCl. Наблюдается характерная зонная ось с индексом {111}, что подтверждает доминирующую текстуру роста покрытия. Диффракционные кольца имеют чётко выраженную сегментацию, что указывает на наличие текстурированных нанозёрен с определённой ориентировкой.

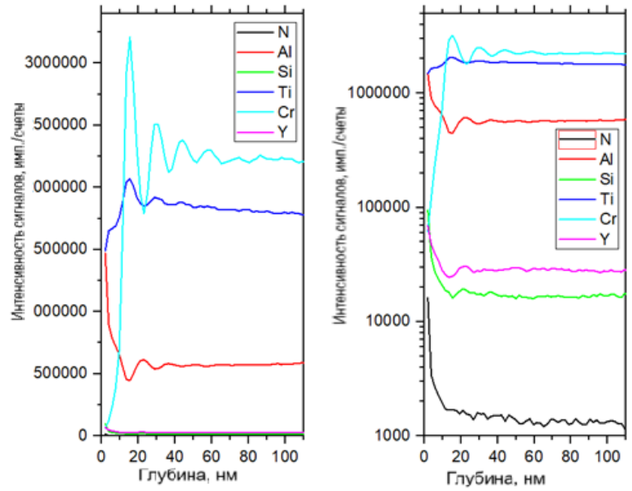
На фрагменте области высокого разрешения (рис. 2c), соответствующем выделенному прямоугольнику на рис. 2a, наблюдаются локальные колебания контраста, обусловленные различной ориентацией кристаллитов. Жёлтые стрелки указывают на границы нанозёрен, в пределах которых кристаллическая периодичность сохраняется. Отсутствие выраженной аморфной фазы и сохранение дифракционной картины подтверждают высокую степень кристалличности до ионной имплантации.

Итак, HRTEM и SAED-анализ подтверждают наличие многослойной, текстурированной нанокристаллической структуры с преимущественной ориентацией {111} в исходном состоянии покрытия. Эти результаты служат

отправной точкой для анализа структурных изменений, индуцируемых последующей ионной имплантацией.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты глубинного профилирования методом вторичного ионного масс-спектрометрического анализа (SIMS) многослойного покрытия (TiAlSiY)N/CrN, полученные при анализе двух различных кратеров. Исследование проводилось на образце с исходной шероховатостью порядка 2 мкм, что превышает глубину анализа (~1,4 мкм), что могло повлиять на точность глубинной оценки и вызвать некоторое рассеивание данных. Тем не менее, удалось разрешить структуру покрытия вплоть до шестого слоя CrN, находящегося на глубине около 86,9 нм. Средняя толщина одной пары слоёв составляла 14,4 нм, при условии равномерного распределения по глубине.

На рисунке 3 представлены результаты глубинного профилирования для многослойного покрытия (TiAlSiY)N/CrN, нанесённого на подложку, без воздействия имплантации. Анализ проводился с площадью сканирования 300×300 мкм и охватом 10% измеряемой поверхности. Профили ионов N^+, Al^+, Si^+, Ti^+, Cr^+ и Y^+ отображены как в линейной (рис.3, а), так и в логарифмической шкалах (рис.3, б), что позволяет детально рассмотреть как основные элементы, так и элементы-примеси на низких уровнях концентрации.



а) б)

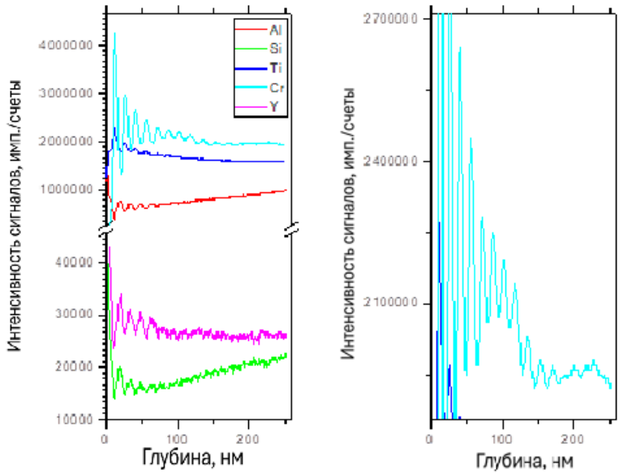
Рисунок 3 – Глубинные профили ионов N^+, Al^+, Si^+, Ti^+, Cr^+ и Y^+, полученные методом SIMS для образца № 1055 а) в линейной и б) логарифмической шкале. Площадь сканирования – 300×300 мкм, проанализированная область – 10 %

В линейной шкале чётко наблюдается резкое изменение интенсивности сигнала на начальном участке (до 20–25 нм), что соответствует приповерхностной зоне с повышенным содержанием Cr и Ti. Эта зона может быть обусловлена

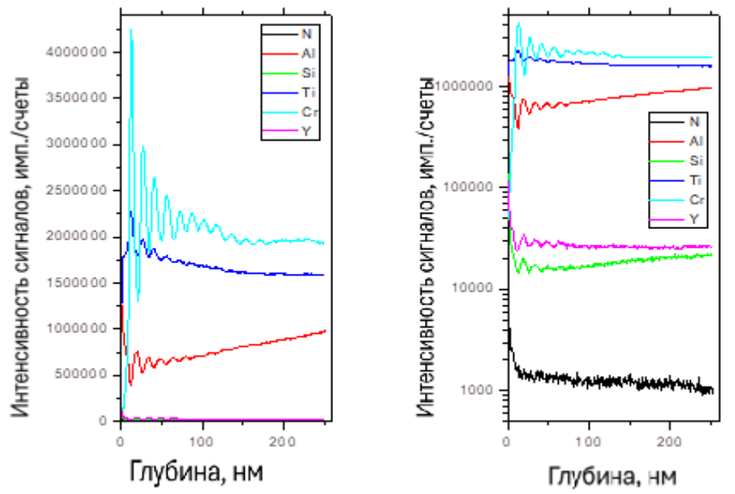
неровностями поверхности, диффузией элементов из подложки или наличием переходного слоя, формирующегося в процессе осаждения.

После стабилизации интенсивности сигналов элементы демонстрируют равномерное распределение по глубине: Ti и Cr сохраняют высокую концентрацию, характерную для CrN-слоёв, тогда как Al и Si проявляются на более низком уровне, что типично для слоя (TiAlSiY)N. При этом азот (N^+) остается основным анионом, поддерживающим нитридную фазу покрытия. Иттрий (Y^+) и кремний (Si^+) проявляют стабильные, но сравнительно низкие сигналы, что согласуется с их легирующей ролью и малым содержанием в составе покрытия. Логарифмическая шкала акцентирует внимание на элементах с низкой концентрацией, особенно на поведении Si и Y, которые распределены равномерно, без резких флуктуаций. Это подтверждает успешное совместное осаждение легирующих элементов и отсутствие выраженной сегрегации в объеме покрытия.

На рисунке 4 представлены результаты SIMS-анализа покрытия (TiAlSiY) N/CrN после ионной имплантации ионами Au^- (E = 60 кэВ, D = 1×10^{17} ион/см²). Данные получены по шести элементам (N^+, Al^+, Si^+, Ti^+, Cr^+, Y^+) с площади сканирования 500×500 мкм² при глубине анализа до ~230 нм. На рисунке 4а показаны глубинные профили элементов в линейной шкале. На рисунке 4б приведены те же профили в логарифмической шкале, что позволяет более наглядно рассмотреть поведение элементов с низкими концентрациями. На рисунке 4в представлены распределения элементов по отдельным каналам. На рисунке 4г детализирован профиль распределения ионов Cr^+, который позволяет проследить особенности межслоевой структуры покрытия после имплантации.



а) б)



в) г)

Рисунок 4 – Результаты повторного анализа SIMS по разным зонам покрытия. Показаны профили распределения ионов N^+, Al^+, Si^+, Ti^+, Cr^+ и Y^+ на глубину до 200 нм: а) глубинные профили элементов в линейной шкале;
б) глубинные профили элементов в логарифмической шкале;
в) распределение ионов по отдельным каналам;
г) профиль распределения Cr^+ с выделением межслоевой структуры

Во всех графиках наблюдается характерная зона перемешивания в пределах первых 20–30 нм, что соответствует расчетной глубине проникновения ионов золота (по SRIM – ~23,5 нм). В этой области происходит частичное перераспределение элементов между слоями, особенно заметное по снижению интенсивности азота (N^+), что подтверждает его селективное распыление и нестехиометрию.

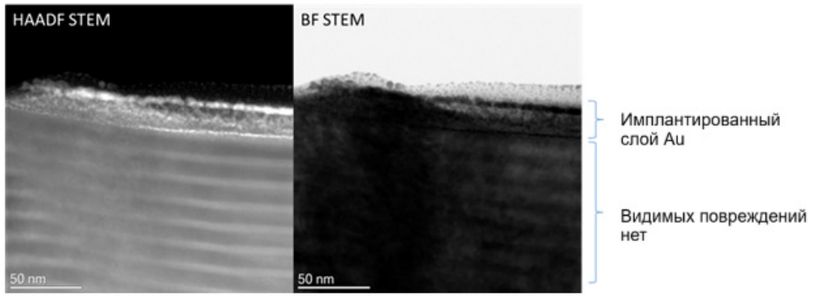
Al и Ti демонстрируют относительно стабильные уровни концентрации после переходной зоны, при этом Ti^+ имеет небольшое снижение в приповерхностной области, вероятно, вследствие смешивания с CrN-слоем.

Cr^+ проявляет пики на границах между слоями, что может указывать на остаточную периодичность многослойной структуры, несмотря на частичную аморфизацию.

Si^+ и Y^+, в отличие от основного состава, сохраняют малую, но стабильную концентрацию во всем объеме, без признаков поверхностной миграции, что указывает на их устойчивость и отсутствие агломерации.

Четвёртая диаграмма, отдельно показывающая поведение Cr^+, подчеркивает неоднородность распределения в приповерхностной зоне, а также возможное изменение кристаллографической ориентации после имплантации.

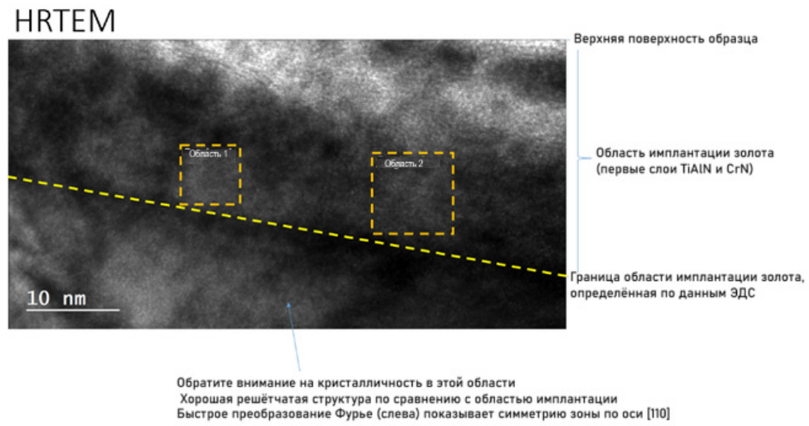
На рисунке 5 показаны HAADFи STEM сечения покрытия, как видно на рис.5а хорошо разрешаются слои (TiAl)Ни CrN, а в 5б представлены EDX (MAP) по сечению покрытия где видны Ti (19,37 %), Cr (18,73 %), Au вблизи поверхности. Ионы золотаполностью проникают сквозь слои AlTiN,и останавливаются вблизи следующей границы слоя CrN. Низкий уровень концентрации Sii Yследы видны в последующем участке покрытия.



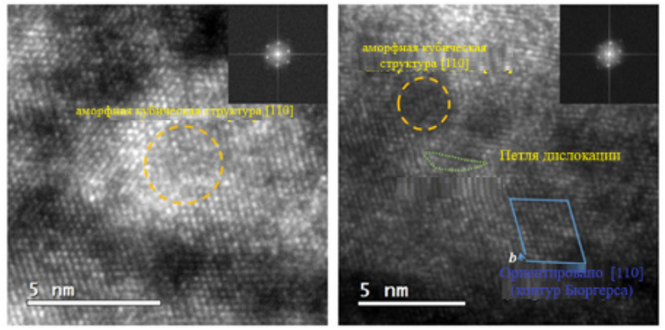
а) б)

Рисунок 5 – Результаты STEM-анализа покрытия TiAlSiY)N/CrN после имплантации Au^-: а) HAADF; б) BF-STEM

На рисунке 6 представлены результаты высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (HRTEM) многослойного покрытия (TiAlSiY)N/CrN после ионной имплантации Au^- ионов с энергией 60 кэВ, где а) поперечное HRTEM-изображение области между слоями покрытия (TiAlSiY)N/CrN после имплантации ионами Au^-, демонстрирующее границу проникновения и изменение кристалличности; б, в) увеличенные фрагменты: аморфные кубические области с ориентацией [110], винтовые и краевые дислокации в зоне повреждений. Итак на изображении (рис. 6а) отчётливо прослеживается граница проникновения ионов золота, которые проходят через первый слой (TiAlSiY)N толщиной ~ 18.6 нм и останавливаются в пределах подслоя CrN, что подтверждается данными элементного анализа (EDS). Максимальная глубина проникновения составила не более 20 нм.



а)



б) в)

Рисунок 6 – HRTEM-изображения покрытия после имплантации Au^-: граница проникновения, кристаллическая решётка [110], аморфные участки и петли дислокации

FFT-анализ показал наличие [110] зональной симметрии в неимплантированной области, что указывает на сохранённую кристаллическую решётку (рис. 6а, вставка). В то же время имплантированный участок (рис. 6б, в) характеризуется преимущественным формированием аморфных кубических областей с ориентацией [110], размером ~5 нм, а также наблюдаются типичные дефекты кристаллической решётки – винтовые и краевые дислокации. Эти изменения свидетельствуют о значительной радиационной повреждённости структуры покрытия в приповерхностной зоне, вызванной ионной имплантацией.

Полученные данные позволяют провести связь между выявленными структурными изменениями и потенциальными эксплуатационными

характеристиками покрытий. Снижение размера кристаллитов до 4–5 нм и формирование аморфных областей могут способствовать упрочнению покрытия за счёт механизма закрепления границ зёрен, что, как известно, ведёт к повышению твёрдости и сопротивлению пластической деформации. В то же время аморфизация приповерхностной зоны и наличие большого количества дефектов создают предпосылки для повышения износостойкости за счёт более равномерного распределения локальных напряжений и подавления зарождения трещин. Перемешивание границ слоёв и перераспределение легирующих элементов (Si, Y) также могут стабилизировать структуру при воздействии радиации и высоких температур, что является важным фактором для эксплуатации покрытий в агрессивных условиях. Таким образом, выявленные микроструктурные изменения напрямую определяют функциональные свойства (твёрдость, износостойкость и радиационную стойкость), что подчёркивает практическую значимость проведённого исследования.

Выводы

Проведённый комплексный анализ влияния ионной имплантации ионами золота (Au^-) с энергией 60 кэВ и флюенсом 1×10^{17} ион/см² на многослойные покрытия (TiAlSiY)N/CrN позволил установить существенные структурно-фазовые изменения в приповерхностной зоне. По данным GIXRD зафиксировано снижение интенсивности и уширение дифракционных пиков, что свидетельствует о росте дефектности и частичной аморфизации покрытия. Размер кристаллитов уменьшился с ~8 нм до 4–5 нм. HRTEM- и STEM-анализ выявил формирование аморфных областей толщиной ~5 нм, наличие винтовых и краевых дислокаций, а также межслоевого перемешивания на границах (TiAlSiY)N/CrN.

SIMS- и RBS-профили подтвердили проникновение ионов золота на глубину до ~20 нм с максимальной концентрацией вблизи межслоевых границ. Зафиксировано селективное распыление азота (в 3–4 раза выше, чем у Ti и Al), сопровождающееся локальной нестехиометрией, а также перераспределение легирующих элементов Si и Y, включая зоны их сегрегации.

Таким образом, ионная имплантация оказывает критическое воздействие на стабильность многослойных покрытий, изменяя их кристаллическую структуру и элементный состав. Полученные результаты имеют практическое значение при проектировании износо- и радиационно-стойких наноструктурированных покрытий. Перспективы применения разработанного подхода связаны с созданием защитных покрытий для рабочих элементов, эксплуатируемых в условиях высоких температур, интенсивного радиационного облучения и агрессивных сред, в частности для деталей газотурбинных установок и атомной энергетики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Zhao, F., Wang, L., & Wang, X.** Microstructure and properties of TiAlSiN ultra-hard coatings prepared by plasma immersion ion implantation and deposition with TiAlSi alloy cathodes. Vacuum, 174, 109194. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109194

2 **Cselle, T., Parlinska-Wojtan, M., Karimi, A., Michler, J.** Conventional and high resolution TEM investigation of the microstructure of graded TiAlSiN thin films // Israel Journal of Chemistry. – 2004. – Vol. 44. – P. 209–220. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.030

3 **Smyrnova, K. V., Pogrebnjak, A. D., Beresnev, V. M., Yakushchenko I. V., Oyoshi, K., Bondar, O. V., Zubar, T. I.** Microstructure and physical-mechanical properties of (TiAlSiY)N/CrN coatings // Metals and Materials International. – 2018. – Vol. 24. – № 5. – P. 1024–1035. – https://doi.org/10.1007/s12540-018-0110-y

4 **Masenya, M., Madhuku, M., Halindintwali, S., Mtshali, C.** Ion beam induced modification and nanostructures formation in thin SiC/Pd films on c-Si substrate // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2021. – Vol. 491. – P. 34–37. – https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.01.018

5 International Atomic Energy Agency. Surface modification of materials by ion implantations for industrial and medical applications. – Vienna : IAEA, 2000. – 93 p. – (IAEA-TECDOC-1165).

6 **Allen, F. I.** A review of defect engineering, ion implantation, and nanofabrication using the helium ion microscope // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2021. – Vol. 12. – P. 633–664. – https://doi.org/10.3762/bjnano.12.52

7 **Ziegler, J. F., Biersack, J. P., Littmark, U.** The stopping and range of ions in matter (SRIM) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2010. – Vol. 268. – № 11–12. – P. 1818–1823. – https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091

8 **Pogrebnjak, A. D., Bagdasaryan, A. A., Beresnev, V. M., Bondar, O. V., Yakushchenko, I. V., Ochsner, A.** Structure and properties of multilayer and gradient coatings based on nitrides of transition metals : A review // Reviews on Advanced Materials Science. – 2013. – Vol. 34. – P. 1–16.

9 **Pogrebnjak, A., Buranich, V., Ivashchenko, V., Baimoldanova, L., Rokosz, K., Raaen, S., Zukowski, P., Opielak, M., Rakhadilov, B., Beresnev, V., Erdybaevaba, N.** The Effect of Substrate Treatment on the Properties of TiAlSiYN/CrN Nanocomposite Coatings // Surfaces and Interfaces. – Vol.30, June 2022. – 101902.

10 **Maksakova, O. V., Pogrebnjak, A. D., Buranich, V. V., Ivashchenko, V. I., Baimoldanova, L. S., Rokosz, K., Raaen, S., Malovana, N.** Theoretical and experimental investigation of multiplayer (TiAlSiY)N/CrN coating before and after gold ions implantation // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes). – 2021. – Vol.25. – № 1. – P. 57–70. 10.1615/HighTempMatProc.2021038087

11 **Olivero, P., Amato, G., Bellotti, F., Giannazzo, F., Roccaforte, F., Calusi, S.** Direct fabrication of 3D buried conductive channels in single crystal diamond with ion microbeam induced graphitization // ArXiv preprint, 2016. – https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.10.068

12 **Perillat-Merceroz, G., Donatini, F., Thierry, R., Feuillet, G.** Structural recovery of ion implanted ZnO nanowires // ArXiv preprint, 2012. – https://doi.org/10.1063/1.4704697

13 **Arranz, A., Palacio, C.** Composition of tantalum nitride thin films grown by low-energy nitrogen implantation : a factor analysis study // ArXiv preprint, 2004. – https://doi.org/10.1007/s00339-004-3182-0

REFERENCES

1 **Zhao, F., Wang, L., & Wang, X.** Microstructure and properties of TiAlSiN ultra-hard coatings prepared by plasma immersion ion implantation and deposition with TiAlSi alloy cathodes. Vacuum, 174, 109194. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109194

2 **Cselle, T., Parlinska-Wojtan, M., Karimi, A., Michler, J.** Conventional and high resolution TEM investigation of the microstructure of graded TiAlSiN thin films // Israel Journal of Chemistry. – 2004. – Vol. 44. – P. 209–220. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.030

3 **Smyrnova, K. V., Pogrebnjak, A. D., Beresnev, V. M., Yakushchenko, I. V., Oyoshi, K., Bondar, O. V., Zubar, T. I.** Microstructure and physical-mechanical properties of (TiAlSiY)N/CrN coatings // Metals and Materials International. – 2018. – Vol. 24. – № 5. – P. 1024–1035. – https://doi.org/10.1007/s12540-018-0110-y

4 **Masenya, M., Madhuku, M., Halindintwali, S., Mtshali, C.** Ion beam induced modification and nanostructures formation in thin SiC/Pd films on c-Si substrate // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2021. – Vol. 491. – P. 34–37. – https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.01.018

5 International Atomic Energy Agency. Surface modification of materials by ion implantations for industrial and medical applications. – Vienna: IAEA, 2000. – 93 p. – (IAEA-TECDOC-1165).

6 **Allen, F. I.** A review of defect engineering, ion implantation, and nanofabrication using the helium ion microscope // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2021. – Vol. 12. – P. 633–664. – https://doi.org/10.3762/bjnano.12.52

7 **Ziegler, J. F., Biersack, J. P., Littmark, U.** The stopping and range of ions in matter (SRIM) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2010. – Vol. 268. – № 11–12. – P. 1818–1823. – https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091

8 **Pogrebnjak, A. D., Bagdasaryan, A. A., Beresnev, V. M., Bondar, O. V., Yakushchenko, I. V., Ochsner, A.** Structure and properties of multilayer and gradient coatings based on nitrides of transition metals : A review // Reviews on Advanced Materials Science. – 2013. – Vol. 34. – P. 1–16.

9 **Pogrebnjak, A., Buranich, V., Ivashchenko, V., Baimoldanova, L., Rokosz, K., Raaen, S., Zukowski, P., Opielak, M., Rakhadilov, B., Beresnev, V., Erdybaevaba, N.** The Effect of Substrate Treatment on the Properties of TiAlSiYN/CrN Nanocomposite Coatings // Surfaces and Interfaces. – Vol.30. – June 2022. – 101902.

10 **Maksakova, O. V., Pogrebnjak, A. D., Buranich, V. V., Ivashchenko, V. I., Baimoldanova, L. S., Rokosz, K., Raaen, S., Malovana, N.** Theoretical and experimental investigation of multiplayer (TiAlSiY)N/CrN coating before and after gold ions implantation // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes). – 2021. – Vol.25. – № 1. – P. 57–70. – 10.1615/HighTempMatProc.2021038087

11 **Olivero, P., Amato, G., Bellotti, F., Giannazzo, F., Roccaforte, F., Calusi, S.** Direct fabrication of 3D buried conductive channels in single crystal diamond with ion microbeam induced graphitization // ArXiv preprint, 2016. – https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.10.068

12 **Perillat-Merceroz, G., Donatini, F., Thierry, R., Feuillet, G.** Structural recovery of ion implanted ZnO nanowires // ArXiv preprint, 2012. – https://doi.org/10.1063/1.4704697

13 **Arranz, A., Palacio, C.** Composition of tantalum nitride thin films grown by low-energy nitrogen implantation: a factor analysis study // ArXiv preprint, 2004. – https://doi.org/10.1007/s00339-004-3182-0

Поступило в редакцию 20.07.25.
Поступило с исправлениями 05.08.25.
Принято в печать 29.09.25.

Л. С. Баймолданова[1], А. Д. Погребняк[2], *Р. Е. Сакенова[3], Г. С. Бектасова[4]
[1,3,4]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2]Сумы мемлекеттік университеті, Украина, Сумы қ.
20.07.25 ж. баспаға түсті.
05.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
29.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

AU⁻ ИОНДАРЫМЕН ИМПЛАНТАЦИЯЛАНҒАН (TIALSIY) N/CRN ЖАБЫНДАРЫНДАҒЫ МИКРОСТРУКТУРАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕР МЕН ЭЛЕМЕНТТІК ТАРАЛУ

Бұл мақалада алтын (Au⁻) иондарымен 60 кэВ энергияда және 1×10¹⁷ ион/см² флюенспен жүргізілген имплантациядан кейінгі көпқабатты (TiAlSiY)N/CrN жабындарының кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты — имплантация әсерінен жабын құрылымында және құрамында туындайтын микроструктуралық өзгерістер мен элементтік қайта таралуды зерттеу болды. Зерттеу барысында grazing-инцидентті рентгендік дифракция (GIXRD), жоғары рұқсатты өткізгіш электрондық

микроскопия (HRTEM), сканерлеуші өткізгіш электрондық микроскопия (STEM), екінші ретті иондық масс-спектрометрия (SIMS) әдістері және SRIM иондардың өту тереңдігін модельдеу қолданылды. Зерттеу нәтижелері бойынша имплантациядан кейін жабынның беткі қабатында (қалыңдығы шамамен 20 нм) аморфизация жүретіні, кристаллиттердің өлшемі ~8 нм-ден ~4–5 нм-ге дейін кішірейетіні, сондай-ақ қабатаралық араласу мен шекаралардың бұзылуы орын алатыны анықталды. SIMS және RBS талдаулары азоттың селективті булануын, легирлеуші элементтердің (Si, Y) қайта таралуын және алтын иондарының ~20 нм тереңдікке енуін көрсетті. Бұл нәтижелер жабынның фазалық және элементтік күйінің айтарлықтай өзгеріске ұшырайтынын дәлелдейді және радиациялық әсер мен агрессивті орта жағдайында жұмыс істеуге арналған функционалдық наноқұрылымды жабындарды әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: көпқабатты жабындар, TiAlSiY(N)/CrN, иондық имплантация, фазалық түрленулер, XRD, HRTEM, аморфизация, иондық араласу.

L. S. Baimoldanova[1], A. D. Pogrebnyak[2], *R. E. Sakenova[3], G. S. Bektassova[4]
[1,3,4]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[2]Sumy State University, Ukraine, Sumy.
Received 20.07.25.
Received in revised form 05.08.25.
Accepted for publication 29.09.25.

MICROSTRUCTURAL CHANGES AND ELEMENTAL REDISTRIBUTION IN (TIALSIY) N/CRN COATINGS AFTER AU⁻ ION IMPLANTATION

This paper presents the results of a comprehensive study of multilayer (TiAlSiY) N/CrN coatings subjected to gold (Au^-) ion implantation at an energy of 60 keV and a fluence of 1×10^{17} ions/cm². The aim of the study was to investigate the microstructural changes and elemental redistribution induced by ion implantation in the structure and composition of the coatings. Analytical techniques included grazing incidence X-ray diffraction (GIXRD), high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM), scanning transmission electron microscopy (STEM), secondary ion mass spectrometry (SIMS), and ion range modeling using the SRIM code. The results showed that ion implantation led to the formation of an amorphous surface layer up to 20 nm thick, a reduction in crystallite size from ~8 nm to ~4–5 nm, and interlayer mixing accompanied by distortion of layer boundaries. SIMS and RBS analysis revealed selective nitrogen sputtering, redistribution of alloying elements (Si, Y), and gold ion penetration to a depth of approximately 20 nm. These findings demonstrate significant changes in the phase and elemental state of the coatings and may be used in the development of functional nanostructured coatings designed for operation under radiation exposure and aggressive environments.

Keywords: multilayer coatings, TiAlSiY(N)/CrN, ion implantation, phase transformations, XRD, HRTEM, amorphization, ion mixing.

FTAMP 53.37.91
https://doi.org/10.48081/UEXW3240

Г. С. Бекимбаева[1], *Р. В. Сапинов[2], Ж. Шошай[3], Н. А. Куленова[4], С. Ю. Маркова[5]
[1,2,3,4]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7751-5393
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9334-5806
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1861-0539
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7063-4899
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0004-7062-4999
*e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz

ЕРТІС МЫС БАЛҚЫТУ ӨНДІРІСІНІҢ ҚОЖДАРЫНЫҢ МАТЕРИАЛДЫҚ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

Мысты пирометаллургиялық өңдеу кезінде техногендік қалдықтар, атап айтқанда үйінді қождардың көп мөлшері түзіледі. Мыс қожындағы мырыш пен темір сияқты құнды компоненттердің көп мөлшерде болуына байланысты қождарды қайта өңдеу өзекті мәселе болып табылады. Дәстүрлі түрде пирометаллургиялық қайта өңдеу – мысалы күйдіру қолданылады, нәтижесінде құрамында мыс, мырыш және т.б. металдары бар қож түзіледі, ол жиналады. Мыс қождарын термиялық өңдеу нәтижесінде күрделі минералогия ие түзілімдердің пайда болуына байланысты, гидрометаллургиялық өңдеуді қолдану ең оңтайлы нұсқа болып табылады. Техногендік шикізат - үйінді қождардың заттық құрамы мен сипаттамасын анықтау кезеңі өте маңызды, себебі ол гидрометаллургиялық өңдеудің оңтайлы режимін таңдауға тәуелді, мысты тиімдірек алу реагентті таңдауға, үрдістің ұзақтығы және ерітінділеу температурасын анықтауға байланысты болады. Жоғарыда аталған факторлар үрдіске әсерін тигізеді, себебі құрамында мыс бар қождардың ашылуы қождың физикалық көрсеткіштерімен айқындалады және ол қайта өңдеудің әрі қарай сатысын анықтайды. Жүргізілген зерттеулер нятижесінде Ертіс мыс балқыту зауытның қожының құрамында жалпы мыс мөлшері 0,52 %, мырыш құрамы – 2,9 %, ал темір мөлшері 33,90%құрайтыны анықталды. Қож сынамаларының орташа химиялық құрамы (% көл.): FeO≈43 %; SiO_2≈34 %; Al_2O_3≈6 %; CaO≈6 %; MgO≈1,5 %.

Кілтті сөздер: мыс балқыту қожы, материалдық құрамы, мыс, мырыш, темір, қайта өңдеу.

Кіріспе

Мысты өндіру мақсатында мыс құрамды шикізатті қайта өңдеу кезінде көп мөлшерде техногендік қалдықтар, соның ішінде мыс қождары түзілетіні белгілі [1]. Құрамында ауыр металдар бар мыс балқыту қождарының үйінділері қоршаған ортаға қауіп төндіруі мүмкін [2]. Қазақстан Республикасының аумағындағы үйінді қождар құрамында мыс мөлшері жоғары, мысалы Ертіс мыс балқыту өндірісінде 11,5 млн.тонна қож бар [3]. Қождардың технологиялық үрдістердің ерекшелігіне байланысты белгілі бір себептермен құнды компоненттердің едәуір мөлшері жоғалады, яғни құрамындағы мыс 0,4 %, ал мырыш 4 % дейін, темір 33 % [4] құрайды, және т.б. құнды компоненттер мыс балқыту қожын бағалы техногендік шикізат ретінде көрсетеді, себебі минералдық шикізаттағы мыс мөлшерінен көп болады [5]. Техногендік шикізат қазірдің өзінде жер бетіне шығарылғанын және сол арқылы энергия мен ресурстарды қайта өңдеуді қажет етпейтінін ескеру қажет [6]. Мыс балқыту қождарды қайта өңдеу экономикалық тұрғыдан тиімді және экологиялық тәуекелдерге байыныстыы мәселелерді шешеді [7], келесі зерттеуде мыс және т.б. пайдалы компонентерді, және темірдің алуын көздейтін пирометаллургиялық қайта өңдеуі ұсынылады, үрдістің оңтайлы көрсеткіштері кезінде: қышқыл концентрациясы 2,5М, температурасы 90 °С, ерітінділеу уақыты 120 минут, мыс алынуы≈ 95 % және темір алынуы ≈90 % байқалды және реагент ретінде күкірт қышқылы [8] қолданылды. Келесі зерттеу сонымен қатар пайдалы өнімдер, құрылыс материалдары, мысалы, жол төсемін салу үшін минералды құм [9] және байыту қалдықтарынан жасушалық тон [10] үшін шикізат ретінде алынатын гидрометаллургиялық өңдеуді қолданды. Сонымен қатар пирометаллуаргиялық әдістерді Сондай-ақ, пирометаллургиялық тәсілдерді қолданатын әдістер бар, мұнда мыс қожынан 1500 °С температурада әкті флюс ретінде және тотықсыздандырғыш - көміртекті қосу арқылы темір оксидінің тотықсыздандыру үрдісін жылдамдатады [11], сонымен қатар әртүрлі көміртегі бар тотықсыздандырғыштарды қолданады: кокс, антрацит және көмір, олар CO_2 газды ортада мыс қожының тотықсызлануына әсерін тигізеді [12]. Ең тиімдісі аралас әдістерді үйінді қождарда мыс жоғалуын азайтуға мүмкіндік беретін физико-химиялық әдістерді [13], қолдану болып табылады. Себебі мыс қожының құрамында темір қосылыстары оксид түрінде болады, ал үрдістің сәттілігі мыс қосылыстарының сульфидтенуіне байланысты, сәйкесінше қождағы магнетиттің вюститке дейін тотықсызлануы келесі механизм бойынша жүзеге асады:

$$Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO \quad (1)$$

$$Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO \quad (2)$$

Теориялық тұрғыдан магнетитті темір темірмен қалпына келтіруге болады:

$$Fe3O4 + Fe = 4FeO \quad (3)$$

Сонымен қатар барлық зерттеушілер ортақ тұжырымға келді, мыс балқыту қождарының қайта өңдеу сұлбасы көптеген көрсеткіштерге, яғни бастапқы шикізат құрамына, белгілі бір өндірістегі технологиялық сатыларға байлыныстыы. [14]. Бұл зерттеудің мақсаты кейіннен қайта өңдеудің технологикалық сұлбасын әзірлей отырып, Глубокое ауылының Ертіс мыс балқыту зауытының қождарының материалдық құрамын зерттеу болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Барлық тәжірибелер «Д.Серікбаев атындағы «Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ жүргізілді. Зерттеу объектісі – Шығыс Қазақстан облысының Глубокое кентінің мыс балқыту өндірісінің қождары (100 кг). Бірінші кезеңде шикізат жақты ұсатқыш көмегімен 5 мм фракцияға дейін ұнтақталды. Әрі қарай 1,5 кг шикізат төртен бір бөлікке бөлу әдісімен таңдалды және шарлы диірменіне жүктеліп 30 мин ішінде 150х215 мм өшемдегі шарлы диірменде Қ:Ш=1:9 қатынаста (Қ – қатты, Ш – шар енгізілуі) ұнтақтау жүргізілді. Алынған өнімнен салмағы 1 кг сынама алынды. Әрі қарай, сынамалар кептіру шкафында 48 сағат ішінде 80 °С температурада кептіріліп, 1 кг шикізат алынды. Содан кейін шикізат ірілігі бойынша класстарға бөлінді. Әр фракция әр класстың шығуын анықтау үшін таразымен өлшенді. Берілген мақсатқа жету үшін түскен сынаманың химиялық, фазалық құрамы және жылулық қасиеттері анықталды. Шикізаттың химиялық құрамын зерттеу үшін ICP-MS 7500 cx фирмы «Agilent technologies» (АҚШ) масс-спектрометрі қолданды. Зерттелетін материалдың заттық құрамын анықтау үшін Panalitical өндірісінің X›Pert PRO рентгендік дифрактометры қолданылды, ол материалдың сапалық құрамын анықтаудың жалпы қабылданған әдісі. Термогравиметриялық талдау METTLERTOLEDO синхронды термиялық талдау құралында жүргізілді. Тәжірибелер 10 °С /мин жылдамдықпен ауа ағынында 1000 °С дейін қыздырудың максималды температурасында жүргізілді. Сынама салмағы 100,36 мг. Қыздыру үрдісінде ДСК қисығындағы жылу эффектілері және ТГТ қисығындағы үлгі массасының өзгеруі параллель тіркелді. Сынамалар мен үлгілер бетінің топографиясы мен микроқұрылымын зерттеу үшін, нүктелік аймақтағы сапалы және сандық элементтік микроталдауы үшін, берілген сызық бойымен элементтердің таралу профильдерін құру, таңдалған учаскіде элементтердің таралу карталарын құру үшін «OXFORD Instruments Analytical Limited» (Ұлыбритания) компаниясының INCA Energy Penta FET X3 энергодисперсионндық микроталдау жүйесі бар «JEOL Ltd.» (Жапония) компаниясымен өндірілген JSM-6390LV растрлық электронды микроскоп қолданылды. Материалдар бетінің морфологиясын зерттеу үшін микроскоп BX-51 (Olympus, Жапония) қолданылды. Барлық өлшеулер 2 рет жүргізілді. 1 %-дан астам алшақтық болған кезде өлшемдер қайталанды.

Нәтижелер және талқылау

Сынама түйіршіктерінің жақты ұсатқышта және шарлы диірменде ұнтақтаудан кейінгі өлшемдерінің бөлінуі 1 кестеде көрсетілген.

1-кесте – Сынаманың жақты ұсатқышта және шарлы диірменде ұнтақтаудан кейінгі гранулометриялық құрамы

Ірілік классы, мм	Шығуы, %
+2,0	4,1
-2,0+1,0	42,3
-1,0+0,63	15,9
-0,63+0,315	14,7
-0,315+0,16	8,0
-0,16+0,071	6,6
-0,071+0,045	2,3
-0,045	6,1
Барлығы:	100,0

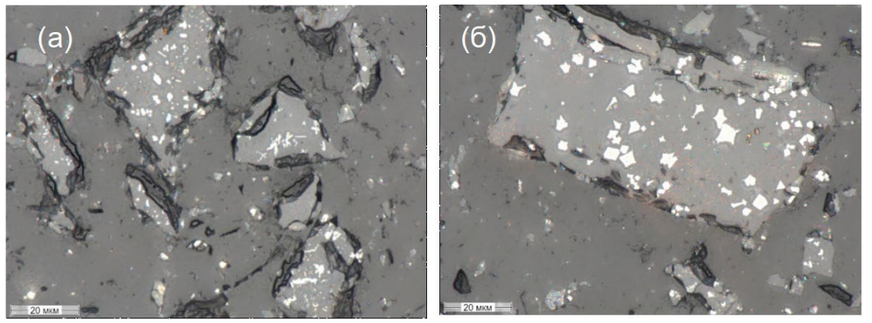
Мыс балқыту заутының қожының сынамасындағы негізгі химиялық элементтердің құрамы 2 кестеде көрсетілген. Жоғарыда келтірілген химиялық құрамнан көріп отырғандай, сынамадағы мыс құрамы – 0,52 %. Сынамадағы мырыш құрамы – 2,9 %. Темір құрамы 39,9 %.

2-кесте – Мыс қожының зерттелген сынамасының химиялық талдау нәтижелері

Элемент	**Өлшем бірлігі**	**Мәні**	**Элемент**	**Өлшем бірлігі**	**Мәні**
Li	г/т	10,26	In	г/т	0,78
Be	г/т	0,63	Sn	г/т	144,50
Na	%	1,55	Sb	г/т	305,60
Mg	%	2,61	Cs	г/т	0,92
Al	%	2,68	Ba	г/т	7321,00
P	г/т	1252	La	г/т	8,57
K	%	0,41	Ce	г/т	13,00
Ca	%	2,66	Pr	г/т	2,39
Sc	г/т	5,77	Nd	г/т	6,49
Ti	г/т	3444	Sm	г/т	1,12
V	г/т	70,26	Eu	г/т	0,56
Cr	г/т	520	Gd	г/т	1,89
Mn	г/т	2694	Tb	г/т	0,57
Fe	%	33,90	Dy	г/т	1,78
Co	г/т	167,15	Ho	г/т	0,31
Ni	г/т	73,07	Er	г/т	0,51
Cu	%	0,52	Tm	г/т	0,15
Zn	%	2,90	Yb	г/т	0,60
Ga	г/т	23,71	Lu	г/т	0,08
Ge	г/т	12,10	Hf	г/т	1,69
Se	г/т	1,41	Ta	г/т	0,57
Rb	г/т	32,93	W	г/т	0,86
Sr	г/т	313,70	Re	г/т	0,03
Y	г/т	16,02	Ir	г/т	0,01
Zr	г/т	193,74	Pt	г/т	0,01
Nb	г/т	6,23	Au	г/т	0,21
Mo	г/т	104,34	Hg	г/т	0,01
Ru	г/т	<0,001	Tl	г/т	0,42

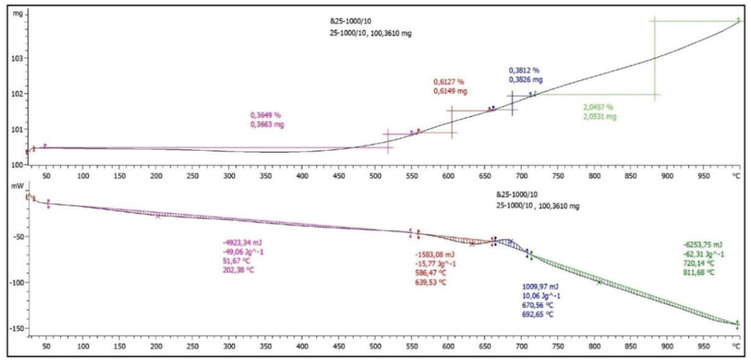
Rh	г/т	0,00	Pb	%	0,42
Pd	г/т	0,07	Bi	г/т	0,87
Ag	г/т	12,97	Th	г/т	2,63
Cd	г/т	3,33	U	г/т	2,56

Минералдық құрамы: құрамында мырыш бар фаялит – 99 % дейін; темір оксидтері, пирротин, пирит –1 % жуық. Мыс балқытатын қождың үстіңгі қабатының микроскопиялық суреттері 1 суретте көрсетілген. Құрамында мырыш бар фаялит сынаманың негізгі бөлігін құрайтын өткір бұрышты, тұрақты емес түйіршіктер түрінде байқалады. Олардың құрылымы біртексіз. Түйіршіктердің бір бөлігінде темір мен пирротин оксидтерінің микро қиылысуы байқалады. Зерттелетін шикізаттың заттық құрамын зерттеу мырыш пен мыстың қожда еріген түрінде болатындығын көрсетті. Қож сынамаларының орташа химиялық құрамы (% көл.): FeO≈43 %; SiO_2≈34 %; Al_2O_3≈6 %; CaO≈6 %; MgO≈1,5 %.



1-сурет – Темір оксидтерінің және пирротин микро қиылысқан түйіршіктері бар сұр түсті бұрышты, тұрақты емес түйіршіктер түріндегі құрамында мырыш бар фаялит (а), пирротин және темір оксидтерінің микро қиылысқан түйіршіктері фаялит түйіршіктері (б) (ақ түсті қосындылар)

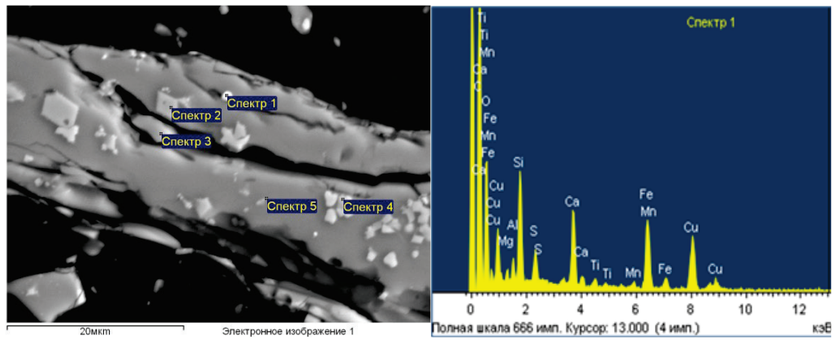
Термогравиметриялық зерттеудің нәтижелері сурет 2 көрсетілген.



2-сурет – Мыс балқыту қожының үлгілерін жылу әсерлері

Ұсынылған зерттеу нәтижелерінде келесі жылу әсерлерін байқауға болады. 50–550 ºС температуралар интервалында шағын эндотермиялық әсер бар 202 ºС шыңы температурасында – молекулярлық судың жоюлуы (масса жоғалуы - 0,61 %) байқалады. 586–670 ºС температуралар интервалында 639 ºС шыңы температурасында тағы да бір эндотермиялық эффект бар, ол тау жыныстарын құрайтын минералдардан конституциялық суды жоюға тән (массаның азаюы - 0,6 %). Әрі қарай 670 тен 720 ºС қа дейінгі аралықта кішкентай экзотермиялық әсер, 692 ºС шыңы темперасында (массаның жоғалуы 0,75%) байқалады. 720–1000 ºС температуралар интервалында 811 ºС температурасында жаңа фазалардың түзілуімен экзотермиялық шыңы (массаның жоғалуы 2,04 %) байқалады.

Үлгі бетінің морфологиялық зерттеуі (Сурет 3а) нүктелік микроталдауы құрамында мыс, мырыш, және бар екенін көрсетті (Сурет 3б).



(а) **(б)**

3-сурет – Үлгі бетінің морфологиясы (а) спектр 1 нүктелік микроталдауымен (б)

За суретінде белгіленген бес спектірінің нүктелік микроталдауы кесте 3 көрсетілген.

3-кесте – Спектр элементтерінің нүктелік микроталдауы

Спектр	O	Al	Si	S	Fe	Cu	Zn	Басқалары	Барлығы
1	35,91	1,98	8,65	2,42	16,84	23,9		10,3	100
2	38,57	2,50	8,23	0,49	32,83		4,32	13,06	100
3	44,34	2,28	11,29		20,93		3,62	17,54	100
4	38,33	200	9,05		34,41		2,90	13,31	100
5	42,51	2,03	11,71		19,83		4,09	19,83	100
Макс.	44,34	2,50	11,71	2,42	34,41	23,9	4,32		
Мин.	35,91	1,98	8,23	0,49	16,84	23,9	2,90		

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер мыс балқыту қождарының құрамында Fe 33,9 %, Cu 0,52 %, Zn 2,9 % мөлшерінде негізгі құнды элементтердің болуын көрсетті. Зерттелетін шикізаттың заттық құрамын зерттеу мырыш пен мыстың қожда еріген түрінде болатындығын көрсетті. Қож сынамаларының орташа химиялық құрамы (% көл.): FeO≈43 %; SiO_2≈34 %; Al_2O_3≈6 %; CaO≈6 %; MgO≈1,5 %. Кеннің құрамында ≈ 0,52 % мөлшерінде мыс болғандықтан, ал ол әр тоннасына 5 кг-ға дейін мыс мөлшеріне тең, сондықтан мысты дайын тауарлық өнім ретінде алу үшін шикізатты қайта өңдеу экономикалық қызығушылық тудыруы мүмкін. Мыс концентраттарын флотация әдісімен алуды зерттеу керек. Құрамында SiO_2 (34 %) көп мөлшерінің болуы силикагельдің пайда болуына әкеледі, ол күкіртқышқылды гидрометаллургиялық әдістермен өңдеуді қиындатуы мүмкін. Темір мен мырышты алу пирометаллургиялық әдістерді қолдана отырып, темірді металлға дейін тотықсындандырып, ал мырышты ұшпа зат ретінде алуға болады. Сонымен қатар балама өнім ақ күйе, мыс және темір сульфаттары ретінде алу мүмкіндіктерін зерттеу қажет. Жалпы, Ертіс мыс балқыту өндірісінің қождарының материалдық құрамын зерттеу тауарлық өнімдерді алу мақсатында қайта өңдеуге бағытталған зерттеулердің өзектілігін көрсетті. Бұл экологиялық мәселелерді экономикалық тартымды әдістермен шешуге мүмкіндік береді.

REFERENCES

1 **Zhai, Q., Liu, R., Wang, Ch., Wen, X., Li, X., Xie, Zh., Sun, W.** Mineralogical characteristics of copper smelting slag affecting the synchronous flotation enrichment of copper and arsenic // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – № 10. – P. 108871.

2 **Tian, H., Zhengqi, Guo, ZH., Pan, J., Zhu, D., Yang, C., Xue, Y., Li, S., Wang, D.** Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of copper slag // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – № 168. – P. 22.

3 **Ismailov, S. I., Alekseichuk, D. S.** Mining plan for the development of man-made mineral formations of the Irtysh copper smelter dumps (slag heaps № 1, 2, 3 and 5), Ust-Kamenogorsk, 2023. [Electronic resource]. – https://ecoportal.kz/Public/PubHearings/LoadFile/139590 (кіру күні 28.06.25).

4 **Kotelnikova, A. L., Ryabinin, V. F.** The composition features and perspective of use for the copper slag recycling Advances in recovery waste // Lithosphera – 2018. – № 11. – P. 133–139.

5 **Zuo, Z., Feng, Y., Dong, X., Luo, S., Ren D., Wang W., Wu Y., Yu Q., Lin H., Lin X.** Advances in recovery of valuable metals and waste heat from copper slag // Fuel Processing Technology. – 2022. – № 235. – P. 107361.

6 **Barros, K. S., Vielmo, V. S., Moreno, B. G., Riveros, G., Cifuentes, G., Bernardes, A. M.** Chemical Composition Data of the Main Stages of Copper Production from Sulfide Minerals in Chile: A Review to Assist Circular Economy Studies // Minerals. – 2022. – № 12. – P. 32.

7 **Akbari, A., Rahimi, E.** Effect of copper slag recovery on hydrometallurgical cut-off grades considering environmental aspects // Journal of Central South University, – 2016. – № 23. – P. 798–807.

8 **Akhmedov, M.** Research on the extraction of copper and other metals from copper slags using sulfuric acid leaching // Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent. – 2024. – № 14. – P. 7–12.

9 **Phiri, T., Pritam Singh, P., Nikoloski, A. N.** The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review// Minerals engineering. – 2021. – № 172. – P. 11.

10 **Jinliang, Zh., Mingwei, G., Chunfang Zh., Hua, G., Weijie, Zh., Chao, H., Fuxin, Zh.** CN102994765A - Method of processing waste copper slag (China). – 2014. – [Electronic resource]. – https://patents.google.com/patent/CN102994765A/en (кіру күні 28.06.25)

11 **Heo, J. H., Kim, B. S., Park, J. H.** Effect of CaO Addition on Iron Recovery from Copper Smelting Slags by Solid Carbon // Metallurgical and materials transaction. – 2013. – № 44. – P. 1352–1363.

12 **Li, X., Wei G., Zhu R., Tian B., Zhang H.** Coupling kinetics of high-temperature carbothermal reduction of copper slag under carbon dioxide atmosphere// Journal of CO_2 Utilization. – 2023. – № 77. – P. 2212–9820.

13 **Yusupkhodjaev, A. A., Khojiev, Sh. T., Valiev, X. R., Saidova, M. S., Omonkhonov, O. X.** Application of Physical and Chemical Methods for Processing Slags of Copper Production // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2019. – № 6. – P. 8.

14 **Potysz, A., Eric, D., Kierczak, J.** Perspectives regarding the use of metallurgical slags as secondary metal resources – A review of bioleaching approaches //Journal of Environmental Management, – 2018. – № 218. – P. 138–152.

30.09.25 ж. баспаға түсті.
16.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
06.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Г. С. Бекимбаева[1], *Р. В. Сапинов[2], Ж. Шошай[3], Н. А. Куленова[4]
[1,2,3,4]ВКТУ имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 30.09.25.
Поступило с исправлениями 16.10.25.
Принято в печать 06.11.25.

ИЗУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО СОСТАВА ШЛАКОВ ИРТЫШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

При пирометаллургической переработке меди образуется большое количество техногенных отходов, а именно шлаков, том чиле отвальных. Из-за значительного количество ценных компонентов, таких как цинк и железо в медном шлаке, переработка шлаков является актуальной задачей. Традиционно применяется пирометаллургическая перереботка – к примеру обжиг, в результате чего образуется шлак содержащий медь, цинк, и др.металлы, который в результате складируются. Медные шлаки имеют сложную минералогию из-за образований в результате термических обработок, следовательно примененение гидрометталлургической переработки наиболее оптимальный вариант. Этап определения вещественного состава и характеристики техногенного сырья – отвальных шлаков имеет важное значение, от этого зависит дальнейший выбор оптимального режима гидрометаллургической переработки, а именно выбор реагента, длительности процесса и температуры выщелачивания для более эффективного извлечения меди. Выше указанные факторы влият на процесс, поскольку степень вскрываемости медьсодержащих шлаков напрямую зависит от физических характеристик шлака, тем самым определяя дальнейший передел переработки. В результате проведенных исследований установлено, что общее содержание меди в шлаке Иртышского медеплавильного завода составляет 0,52 %, цинка 2,9 %, а железа 33,90 %. Средний химический состав проб шлака (%): FeO≈43 %; SiO_2≈34 %; Al_2O_3≈6 %; CaO≈6 %; MgO≈1,5 %.

Ключевые слова: медеплавильный шлак, материалный состав, медь, цинк, железо, вторичная переработка.

G. S. Bekimbayeva[1],*R. V. Sapinov[2], Zh. Shoshay[3], N. A. Kulenova[4]
[1,2,3,4]D. Serikbayev EKTU, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[2,3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 30.09.25.
Received in revised form 16.10.25.
Accepted for publication 06.11.25.

STUDY OF THE MATERIAL COMPOSITION OF SLAGS FROM THE IRTYSH COPPER SMELTER

Pyrometallurgical processing of copper produces large amounts of industrial waste, namely slag and tailings. Due to the significant amount of valuable components such as zinc and iron in copper slag, slag processing is a pressing issue. Traditionally, pyrometallurgical reprocessing is used, for example, roasting, which produces slag containing copper, zinc, and other metals. Traditionally, pyrometallurgical processing is used, such as roasting, which produces slag containing copper, zinc, and other metals, which is then stored. Copper slag has a complex mineralogy due to formations resulting from thermal processing, therefore the use of hydrometallurgical processing is the most optimal option. The stage of determining the material composition and characteristics of man-made raw materials – dump slag – is of great importance, as it determines the further selection of the optimal hydrometallurgical processing mode, namely the choice of reagent, process duration, and leaching temperature for more efficient copper extraction. The above factors influence the process, since the degree of copper-containing slag exposure directly depends on the physical characteristics of the slag, thereby determining the further processing. As a result of the conducted studies it was established that the total copper content in the slag of the Irtysh Copper Smelter is 0.52 %, zinc 2.9 %, and iron 33.90 %. The average chemical composition of the slag samples (%): FeO≈43 %; SiO_2≈34 %; Al_2O_3≈6 %; CaO≈6 %; MgO≈1.5 %.

Keywords: copper smelting slag, material composition, copper, zinc, iron, recycling.

МРНТИ 53.37.35
https://doi.org/10.48081/HESA1824

****А. К. Жаксыбекова[1], Д. А. Исагулова[2], П. А. Ковалев[3]***
[1,2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[3]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6168-4999
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0166-0225
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-3812
*e-mail: assyla.zhaksybekova@gmail.com

НАУЧНЫЙ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА МАРКИ 09Г2С

В статье исследуется влияние редкоземельных металлов (РЗМ), таких как церий (Ce), неодим (Nd) и диспрозий (Dy), на механические свойства стали 09Г2С, используя данные существующих научных исследований. Основное внимание уделено влиянию неметаллических включений (оксидов и сульфидов) на прочностные и износостойкие характеристики стали, 09Г2С, широко используемой в строительстве ответственных конструкций, таких как каркас локомотивов. а также возможности их оптимизации через добавление РЗМ.

Рассмотрены ключевые улучшения, такие как повышение прочности, термостоикости, износостоикости и коррозионной стоикости, при добавлении этих металлов в сталь. Обоснование этих эффектов основано на уже опубликованных результатах исследований, демонстрирующих, как редкоземельные элементы способствуют улучшению эксплуатационных характеристик материалов. В статье также акцентируется внимание на значении местных ресурсов РЗМ Казахстана для снижения стоимости легирования стали и зависимости от импорта. Особое внимание уделено церийному легированию стали, поскольку оно предлагает значительные улучшения при более доступной стоимости по сравнению с неодимом и диспрозием. Полученные выводы могут быть использованы при разработке новых легированных сталей с заданными эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: редкоземельные металлы, механические свойства, сталь 09Г2С, прочность, термостойкость, износостойкость, коррозионная стойкость.

Введение

В современном металлургическом производстве требования к химическому составу сталей становятся всё более высокими, что обусловлено необходимостью улучшения эксплуатационных характеристик материалов, таких как прочность,

износостойкость, коррозионная стойкость и устойчивость к высоким температурам. В частности, это особенно важно для сталей, используемых в производстве ответственных конструкций, таких как каркас локомотивов, где высокие нагрузки и влияние экстремальных температур требуют максимально качественного и долговечного материала.

На основе проведенных исследований, влияние неметаллических включений на свойства сталей, таких как 09Г2С, играет решающую роль в их эксплуатационных характеристиках. Неметаллические включения, такие как оксиды и сульфиды, могут существенно ухудшать прочностные и износостойкие характеристики материала. Эти включения, образующиеся на этапах плавки и легирования, оказывают влияние на структуру стали, создавая дефекты, которые могут снизить её долговечность и надежность. Исследования показали, что добавление редкоземельных металлов (РЗМ) в состав стали, таких как церий, неодим и диспрозий, эффективно способствует уменьшению дефектов, связанных с неметаллическими включениями [1, с. 89].

Материалы и методы

Казахстан обладает значительными ресурсами редкоземельных металлов, таких как церий (Ce), неодим (Nd) и диспрозий (Dy), которые могут быть использованы для улучшения механических свойств стали 09Г2С.

Таблица 1 – Месторождения РЗМ в Казахстане

Месторождение	Область	Редкоземельные металлы	Запасы РЗМ (приблизительные)	Примечания	Источник
Инкай	Южно-Казахстанская	Церий (Ce), Неодим (Nd), Лантан (La)	1,000-1,500 тонн оксидов РЗМ (примерно)	Месторождение урановых руд с примесью РЗМ	Ермеков Б.С. «Геология Казахстана», учебник, 2013, стр. 112
Жамбул	Жамбылская	Церий (Ce), Неодим (Nd), Диспрозий (Dy)	500-700 тонн оксидов РЗМ (приблизительно)	Фосфорные руды с примесью РЗМ	Геология и недропользование Казахстана, журнал, 2018, №4
Прибалхаш	Восточный Казахстан	Церий (Ce), Неодим (Nd)	300-500 тонн оксидов РЗМ	Урановые руды, содержащие РЗМ	Минералогия и петрография, журнал, 2019, №3, стр. 78
Шалкудан	Южно-Казахстанская	Церий (Ce), Лантан (La)	200-400 тонн оксидов РЗМ	Месторождение редкоземельных минералов	Геология и недропользование Казахстана, журнал, 2020, №2
Кокжиде	Восточный Казахстан	Церий (Ce), Лантан (La), Неодим (Nd)	150-250 тонн оксидов РЗМ	Месторождение редкоземельных минералов	Отчет Геологической службы Казахстана, 2017, стр. 92
Балкаш	Центральный Казахстан	Диспрозий (Dy), Тербий (Tb), Церий (Ce)	100-200 тонн оксидов РЗМ	Ожидаются новые геологоразведочные работы	Геология и недропользование Казахстана, журнал, 2021, №1
Куйректыколь	Караганди-нская	Церий (Ce), Лантан (La)	800-935,4 тысячи тонн РЗМ (прогнозные)	Одно из наиболее перспективных месторождений РЗМ в Казахстане	Минпром Казахстана, отчет о геологоразведочных работах, 2024

Исследования Ковалёва, Воронкова и Лаврова (2016) показали, что добавление редкоземельных металлов снижает количество неметаллических включений, улучшая механические свойства стали, уменьшая дефекты, такие как трещины и пористость, и повышая прочность. Работы Сопина и Летюкова (2015) доказали, что оптимизация процессов плавки и добавление редкоземельных элементов повышает коррозионную стойкость стали, что важно для эксплуатации в агрессивных средах. Исследование Ивановой и Морозова (2018) подтвердило, что неметаллические включения ухудшают прочностные и вязкостные характеристики стали, подчеркивая необходимость контроля их содержания. [2;3].

Применение редкоземельных металлов (церий, неодим, диспрозий) в стали 09Г2С значительно улучшает её механические, жаропрочные и коррозионные свойства, что делает материал более подходящим для ответственных конструкций, таких как каркас локомотивов, где важна высокая надежность. Эти элементы не только снижают содержание вредных включений, но и улучшают структуру стали, повышая её прочность, жаропрочность и коррозионную стойкость[4;5].

Церий, в виде оксида или металлической добавки, улучшает механические свойства стали, увеличивая прочность на растяжение до 1000–1400 МПа, износостойкость (снижение коэффициента трения на 15–25 %), термостойкость (выдержка температуры до 50–100 °C выше) и коррозионную стойкость (уменьшение скорости коррозии на 0.1–0.3 мм/год). Он также повышает усталостную прочность до 300–350 МПа и твердость на 200–250 НВ, что увеличивает долговечность и устойчивость материала. Стоимость церия составляет $ 30–50 за кг, что делает его экономически выгодным для использования в конструкциях, таких как каркас локомотивов. Эти результаты были продемонстрированы в научной работе Wang X. и соавторов, в статье «The effect of cerium on the mechanical properties and corrosion resistance of low-alloy steels», опубликованной в журнале Materials Science and Engineering: A (2015) [6;7;8].

Неодим (Nd_2O_3 или металлическая добавка) значительно улучшает механические и термические свойства стали. По данным исследования Liu Z. и соавторов (2018), добавление оксида неодима повышает прочность на растяжение до 1200–1500 МПа, улучшая стойкость к термическим расширениям и микротрещинам. Термостойкость увеличивается на 100–200 °C, позволяя эксплуатации при температурах до 800–900 °C. Износостойкость повышается (снижение коэффициента износа на 10–20%), а коррозионная стойкость увеличивается на 5–15 %. Усталостная прочность достигает 350–450 МПа, твердость – 230–270 НВ. Стоимость неодима варьируется от $60 до $100 за килограмм, что оправдывает его применение в высокотемпературных конструкциях, каркасах локомотивов. Эти данные были подтверждены в работе Liu Z. и соавторов, опубликованной в журнале Journal of Materials Science & Technology в 2018 году, в статье под названием «Effects of cerium on the wear resistance and corrosion resistance of steels» [9;10].

Диспрозий (Dy_2O_3 или металлическая форма) значительно улучшает термостойкость и механические свойства стали. Согласно Zhang Y. и соавторам

(2020), добавление диспрозия увеличивает термостойкость на 150–250 °C, позволяя использовать сталь при температурах до 1000–1200 °C, что критично для компонентов, таких как каркас локомотива. Износостойкость повышается на 20–30 %, снижая коэффициент трения, что важно для высокоскоростных нагрузок. Коррозионная стойкость улучшена, скорость коррозии составляет 0.05–0.15 мм/год. Прочность на растяжение достигает 1300–1600 МПа, усталостная прочность – 350–500 МПа. Твердость увеличивается до 270–300 HB. Микроструктурные исследования подтверждают улучшение фазовой стабильности при высоких температурах. Стоимость диспрозия – $150–250 за кг, что оправдывает его применение в экстремальных условиях эксплуатации. Эти результаты подтверждены в работе Zhang Y. и соавторов, опубликованной в журнале Materials Science and Engineering: A в 2020 году, в статье «Dysprosium addition to steel for enhancing high-temperature fatigue and oxidation resistance» [11;12].

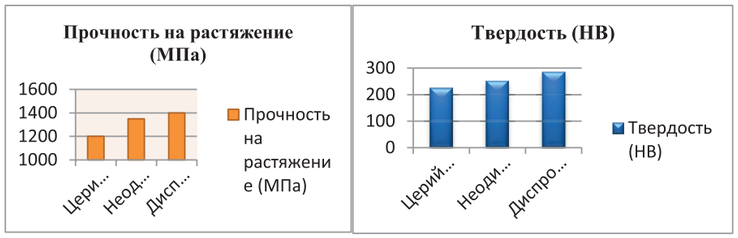


Рисунок 1 – Влияние редкоземельных металлов на прочность и твердость, данные получены из исследований
Wang X. (2015), Liu Z. (2018) и Zhang Y. (2020).

Редкоземельные металлы (РЗМ) влияют на процессы кристаллизации и модификации зерна стали, улучшая её литейные характеристики и повышая однородность структуры.

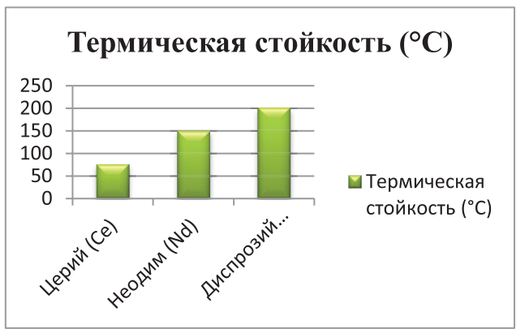


Рисунок 2 – Влияние редкоземельных металлов на термическую стойкость, данные получены из исследований
Wang X. (2015), Liu Z. (2018) и Zhang Y. (2020).

Это особенно важно для конструкций, таких как каркас локомотивов, требующих высокой надежности и долговечности. Введение РЗМ, таких как церий, неодим и диспрозий, улучшает механические свойства стали, включая пластичность, ударную вязкость и жаропрочность, а также её коррозионную стойкость. Исследования Н. М. Уляковой показали, что РЗМ положительно влияют на механические свойства сплавов [13].

Результаты и обсуждение

Целью исследования являлось изучение влияния церийсодержащих добавок на морфологию и распределение размеров неметаллических включений в низколегированной конструкционной стали марки 09Г2С. Эксперимент выполнен в лабораторных условиях с применением воспроизводимых методик, соответствующих стандартам металлургических исследований.

В качестве шихты использовалась низколегированная сталь марки 09Г2С по ГОСТ 19281–2014, приготовленная на основе чистых компонентов. Масса одной лабораторной плавки составляла 2 кг. Плавка осуществлялась в индукционной тигельной печи с графитовым тиглем при температуре 1580–1600 °C. Перед модификацией церийсодержащими добавками проводилось раскисление алюминием в количестве 0,03% по массе, что обеспечивало стабильное содержание остаточного кислорода и способствовало созданию благоприятных условий для эффективной реакции церия с неметаллическими примесями.

Церий вводился в виде металлического церия в количестве от 0 до 0,030 % по массе. Добавка вносилась в тигель после окончания раскисления при температуре 1585–1590 °C. Для обеспечения равномерного распределения церия и завершения его взаимодействия с неметаллическими фазами расплав выдерживался 3 минуты, после чего производился слив в предварительно подогретую чугунную изложницу (размеры: диаметр 30 мм, высота 100 мм).

После охлаждения слитков производилась заготовка образцов из центральной зоны поперечного сечения. Образцы шлифовались с использованием абразивных бумаг с зернистостью до 4000 грит, затем полировались алмазной пастой с зерном 1 μm и финально – оксидом алюминия до зеркального состояния. Травление не проводилось с целью сохранения структуры включений для точного морфологического анализа.

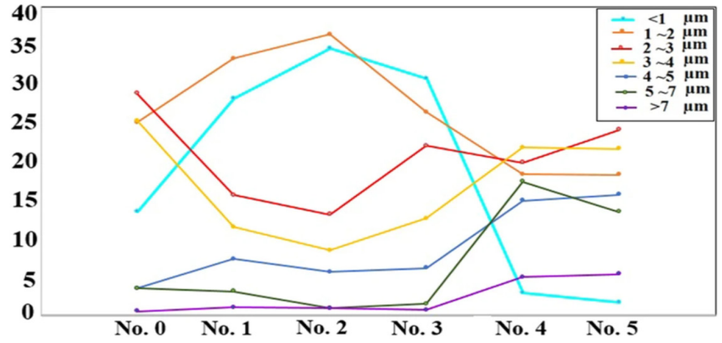


Рисунок 3 – Распределение размеров включений помощью ASPEX

Исследование морфологии и распределения размеров неметаллических включений проводилось на системе ASPEX (SEM/EDS) в режиме автоматического сканирования. Для каждого образца анализировалась площадь поверхности не менее 10 мм². Обнаруженные включения классифицировались по размеру с шагом 1 μm, что позволило оценить изменения, происходящие под действием различного содержания церия. Полученные результаты представлены в виде гистограмм (см. рисунок 3).

Можно отметить, что в образце No. 0 доминируют включения размером 2–3 μm, при этом процент включений размером 1–2 μm и 3–4 μm составляет почти 25 %, а доля включений размером более 7 μm составляет всего 1%. С переходом от образца № 0 к образцу № 2 наблюдается увеличение количества мелких включений и значительное уменьшение крупных. Включения явно уменьшаются после обработки церием в образце № 2. В образце № 2 доля включений размером <1 μm и 1–2 μm увеличивается до почти 33 % и 37 % соответственно, в то время как количество включений размером 2–4 μm уменьшается. Однако из-за значительного увеличения плотности включений при содержании церия, достигающем 0,0235 %, происходит столкновение и агрегация включений, что приводит к увеличению среднего размера включений в образце № 4 по сравнению с образцами № 2 и № 3. В образце № 3 наблюдается увеличение крупных включений размером от 2 до 7 μm, тогда как количество мелких включений <1 μm и 1–2 μm уменьшается. В образце № 5, содержащем действительно высокое количество церия, наблюдается значительное уменьшение мелких включений, но количество крупных включений, таких как размеры более 7 μm, увеличивается по сравнению с другими образцами.

Выводы

Анализ распределения размеров неметаллических включений, выполненный с использованием системы ASPEX, позволяет сделать важные выводы о влиянии церийсодержащих добавок на морфологию включений в стали и очертить направления для дальнейших исследований.

В исходном состоянии (образец No. 0), до модификации церийсодержащими добавками, включения в основном сосредоточены в диапазоне 2–3 μm. Доля частиц размером 1–2 μm и 3–4 μm составляет порядка 25 %, а включения крупнее 7 μm практически отсутствуют. Это указывает на наличие умеренно крупнодисперсной фазы без выраженной тенденции к укрупнению.

После модификации, в частности в образце № 2, наблюдается отчетливое измельчение включений: содержание мелких частиц (<1 μm и 1–2 μm) достигает совокупно почти 70 %. Это свидетельствует о высокоэффективной реакции церия с неметаллическими примесями и образовании мелкодисперсных фаз, что потенциально благоприятно для повышения прочностных и пластических характеристик стали. Уменьшение количества включений размером 2–4 μm указывает на разрушение более крупных включений и подавление процессов их роста. Однако отмеченное увеличение общей плотности включений при более высоких концентрациях церия (особенно в образцах № 3 и № 4) приводит к агрегации частиц. Это подтверждается увеличением доли включений среднего и крупного размера (2–7 μm), при одновременном снижении доли мелких включений. Таким образом, при превышении определенного порога содержания церия начинается процесс укрупнения за счёт слияния включений.

В образце № 5, содержащем наиболее высокую концентрацию церия, наблюдается снижение количества мелких включений и рост числа крупных, включая включения размером более 7 μm. Подобное перераспределение связано, вероятно, с насыщением системы активными элементами и выходом за пределы эффективного модифицирующего действия церия. Такие включения могут становиться стресс-активными зонами, снижая усталостную прочность и ударную вязкость материала.

Указанные результаты позволяют сделать предварительные выводы о том, что эффективность модификации включений церийсодержащими добавками имеет выраженную концентрационную зависимость. На текущем этапе наилучший результат по степени дисперсности и равномерности включений достигается при относительно низком содержании церия, близком к 0,01–0,015 %. Превышение этой концентрации сопровождается нежелательными агрегационными эффектами, что требует дальнейшего изучения.

В будущем планируется провести углублённые исследования механизма образования и эволюции включений в присутствии церия, с акцентом на кинетику их коагуляции, влияние остаточного кислорода, скорость охлаждения, а также исследование связи между морфологией включений и эксплуатационными свойствами получаемой стали. Особое внимание будет уделено подбору оптимального диапазона содержания церия, обеспечивающего стабильную мелкодисперсную структуру включений без риска агломерации. Такие исследования необходимы для повышения предсказуемости и управляемости процессов модификации и в перспективе позволят значительно улучшить качество и надёжность высокотехнологичных сталей [15].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 ОСМС, 1778-70. Общие спецификации по контролю качества металлургической продукции. Методы контроля неметаллических включений в сталях [Текст]. – М. : [б. и.], 1970.

2 **Ковалёв, Д. В., Воронков, А. Н., Лавров, О. В.** Влияние неметаллических включений на механические свойства сталей [Текст] // Известия высших учебных заведений. Металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 4. – С. 112–120.

3 **Сопин, А. Ю., Летюков, Ю. С.** Влияние неметаллических включений на коррозионную стойкость сталей [Текст] // Металлургия и химия. – 2015. – № 2(48). – С. 85–93.

4 **Иванова, Т. В., Морозов, В. В.** Структурно-фазовые изменения и влияние неметаллических включений на физико-механические свойства сталей [Текст] // Металлические материалы. – 2018. – Т. 55. – № 7. – С. 105–113.

5 **Zhang, Y., Chen, X., Li, B.** Dysprosium addition to steel for enhancing high-temperature fatigue and oxidation resistance [Текст] // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 763. – P. 92–101.

6 **Choudhary, M.** Influence of non-metallic inclusions on the properties of steels [Текст] // International Journal of Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 2, № 1. – P. 55–60.

7 **Горбунов, Ю. А.** Роль и перспективы редкоземельных металлов в развитии физико-механических характеристик и областей применения деформируемых алюминиевых сплавов [Текст] // Сибирский федеральный университет. – 2015. – С. 45–53.

8 **Сидельников, С. Б., Баранов, В. Н., Лопатина, Е. С., Трифоненков, Л. П.** Исследование влияния никеля и редкоземельных металлов на структуру и свойства литых и деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов [Текст] // Сибирский федеральный университет. – 2012. – С. 20–28.

9 **Невар, Н. Ф.** Роль редкоземельных металлов при модифицировании железобористых сплавов [Текст] // Вестник ТГУ. – 2015. – № 5(58). – С. 112–118.

10 Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России [Текст] // Ферросплавы. – 2018. – С. 37–42.

11 **Wang, X., Zhang, H., Li, Y.** The effect of cerium on the mechanical properties and corrosion resistance of low-alloy steels [Текст] // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 638. – P. 75–82.

12 **Liu, Z., Wang, S., Liu, J.** Effects of cerium on the wear resistance and corrosion resistance of steels [Текст] // Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Vol. 34, № 2. – P. 1–9.

13 **Улякова, Н. М.** Влияние редкоземельных металлов на механические свойства и жаропрочность титановых сплавов [Текст]. – М. : ВИАМ, 1993. – 7 с.

14 **Фиалковский, В. А.** Влияние редкоземельных элементов на свойства сплавов [Текст]. – СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 25–40.

15 **Kutznetsov, A.** Metallurgical aspects of steel treatment with rare earth metals [Текст] // Russian Journal of Metallurgy. – 2019. – Vol. 61, № 8. – P. 255–263.

REFERENCES

1 OSMS, 1778-70. Obshchie spetsifikatsii po kontrolyu kachestva metallurgicheskoy produktsii. Metody kontrolya nemetallcheskikh vklyuchenii v stalyakh [General specifications for quality control of metallurgical products. Methods of control for non-metallic inclusions in steels] [Text] // M. : 1970.

2 **Kovalyov, D. V., Voronkov, A. N., Lavrov, O. V.** Vliyanie nemetallcheskikh vklyuchenii na mekhanicheskie svoystva staley [Influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties of steels] [Text] // In Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Metallurgiya. – 2016. – № 4. – Vol. 59. – P. 112–120.

3 **Sopin, A. Yu., Letyukov, Yu. S.** Vliyanie nemetallcheskikh vklyuchenii na korrozionnuyu stoikost staley [Influence of non-metallic inclusions on the corrosion resistance of steels] [Text] // In Metallurgiya i khimiya. – 2015. – № 2(48). – P. 85–93.

4 **Ivanova, T. V., Morozov, V. V.** Strukturno-fazovye izmeneniya i vliyanie nemetallcheskikh vklyuchenii na fiziko-mekhanicheskie svoystva staley [Structural-phase changes and influence of non-metallic inclusions on physical and mechanical properties of steels] [Text] // In Metallicheskie materialy. – 2018. – № 7. – Vol. 55. – P. 105–113.

5 **Zhang, Y., Chen, X., Li, B.** Dysprosium addition to steel for enhancing high-temperature fatigue and oxidation resistance [Text] // In Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 763. – P. 92–101.

6 **Choudhary, M.** Influence of non-metallic inclusions on the properties of steels [Text] // In International Journal of Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 2, № 1. – P. 55–60.

7 **Gorbunov, Yu. A.** The role and prospects of rare earth metals in the development of physical-mechanical characteristics and application areas of wrought aluminum alloys [Text] // In Sibirsky federalny universitet. – 2015. – P. 45–53.

8 **Sidelnikov, S. B., Baranov, V. N., Lopatina, E. S., Trifonenkov, L. P.** Study of the influence of nickel and rare earth metals on the structure and properties of cast and wrought aluminum alloy semi-finished products [Text] // In Sibirsky federalny universitet. – 2012. – P. 20–28.

9 **Nevar, N. F.** The role of rare earth metals in the modification of iron-boron alloys [Text] // In Vestnik TSU. – 2015. – № 5(58). – P. 112–118.

10 Analysis of the use of rare earth metals in ferrous metallurgy of Russia [Text] // In Ferrosplavy. – 2018. – P. 37–42.

11 **Wang, X., Zhang, H., Li, Y.** The effect of cerium on the mechanical properties and corrosion resistance of low-alloy steels [Text] // In Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 638. – P. 75–82.

12 **Liu, Z., Wang, S., Liu, J.** Effects of cerium on the wear resistance and corrosion resistance of steels [Text] // In Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Vol. 34. – № 2. – P. 1–9.

13 **Ulyakova, N. M.** The influence of rare earth metals on mechanical properties and heat resistance of titanium alloys [Text] // Moscow : VIAM, 1993. – 7 p.

14 **Fialkovskiy, V. A.** The influence of rare earth elements on alloy properties [Text] // St. Petersburg : Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet, 2020. – P. 25–40.

15 **Kutznetsov, A.** Metallurgical aspects of steel treatment with rare earth metals [Text] // In Russian Journal of Metallurgy. – 2019. – Vol. 61, № 8. – P. 255–263.

Поступило в редакцию 11.04.25.
Поступило с исправлениями 23.05.25.
Принято в печать 18.07.25.

А. К. Жаксыбекова[1], Д. А. Исагулова[2], П. А. Ковалев[3]
[1,2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3]Ұлы Петр атындағы Санкт-Петербург мемлекеттік политехникалық университеті,
Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ.
11.04.25 ж. баспаға түсті.
23.05.25 ж. түзетулерімен түсті.
18.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

09Г2С МАРКАЛЫ ҚОРЫТПАНЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЖАҚСАРТУ ҮШІН СИРЕК ЖЕР МЕТАЛДАРЫН ҚОЛДАНУ ЖӨНІНДЕГІ ҒЫЛЫМИ ШОЛУ

Мақалада церий (Ce), неодим (nd) және диспрозий (Dy) сияқты сирек жер металдарының (РММ) бар ғылыми зерттеулердің деректерін пайдалана отырып, 09Г2С Болаттың механикалық қасиеттеріне әсері зерттеледі. Металл емес қоспалардың (оксидтер мен сульфидтер) Болаттың беріктігі мен тозуға төзімді өнімділігіне әсері, 09Г2С, Локомотив жақтауы сияқты жауапты құрылымдарды салуда кеңінен қолданылады. сондай-ақ оларды РММ қосу арқылы оңтайландыру мүмкіндіктері.

Бұл металдарды болатқа қосқанда беріктікті, ыстыққа төзімділікті, тозуға төзімділікті және коррозияға төзімділікті арттыру сияқты негізгі жақсартулар қарастырылады. Бұл әсерлердің негіздемесі сирек жер элементтерінің материалдардың өнімділігін жақсартуға қалай ықпал ететінін көрсететін жарияланған зерттеу нәтижелеріне негізделген. Мақалада сондай-ақ болатты легирлеу құнын төмендету және импортқа тәуелділік үшін Қазақстанның РММ жергілікті ресурстарының маңыздылығына назар аударылады. Болатты цериялық допингке ерекше назар аударылады, өйткені ол неодим мен диспрозияға қарағанда қол жетімді бағамен айтарлықтай жақсартуларды ұсынады. Алынған қорытындылар берілген пайдалану қасиеттері бар жаңа легирленген болаттарды әзірлеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: сирек кездесетін жер металдары, механикалық қасиеттер, 09Г2С болаты, беріктік, термиялық тұрақтылық, тозуға төзімділік, коррозияға төзімділік.

A. K. Zhaksybekova[1], D. A. Isagulova[2], P. A. Kovalev[3]
[1,2]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russian Federation, St. Petersburg.
Received 11.04.25.
Received in revised form 23.05.25.
Accepted for publication 18.07.25.

SCIENTIFIC REVIEW OF THE USE OF RARE-EARTH METALS TO IMPROVE THE MECHANICAL PROPERTIES OF 09G2S STEEL ALLOY

The article examines the effect of rare earth metals (REM), such as cerium (Ce), neodymium (Nd) and dysprosium (Dy), on the mechanical properties of steel 09G2C, using data from existing scientific research. The main attention is paid to the influence of non-metallic inclusions (oxides and sulfides) on the strength and wear-resistant characteristics of steel, 09G2C, widely used in the construction of critical structures such as the frame of locomotives. as well as the possibility of optimizing them through the addition of REM.

Key improvements such as increased strength, heat resistance, wear resistance, and corrosion resistance are considered when these metals are added to steel. The rationale for these effects is based on already published research results demonstrating how rare earth elements contribute to improving the performance of materials. The article also focuses on the importance of Kazakhstan's local REM resources for reducing the cost of alloying steel and dependence on imports. Special attention is paid to the solid steel alloying, as it offers significant improvements at a more affordable cost compared to neodymium and dysprosium. The findings can be used in the development of new alloy steels with specified performance properties.

Keywords: rare earth metals, mechanical properties, 09G2S steel, strength, thermal stability, wear resistance, corrosion resistance.

SRSTI 53.03.05

https://doi.org/10.48081/MMQL5744

A. K. Zhunusov[1], A. K. Zhunusova[2], *A. Ye. Kenzhebekova[3], A. G. Bakirov[4], R. A. Tyulyubaev[5]

[1,2,3,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3742-3467

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

*e-mail: kenzhebekova_psu@mail.ru

STUDY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF GRANULES OBTAINED FROM ALUMINUM SLAGS

This article presents the studies of the physicochemical properties of granules obtained by granulation of aluminum slags. During the studies, the granules were subjected to hardening firing at high temperatures to understand the chemistry of the process. To study the physicochemical properties, samples of granules obtained from aluminum slags were prepared, which were subjected to microanalysis by scanning electron microscopy, X-ray phase analysis and derivatographic studies. The studies showed that the main phases in the granules are Al_2MgO_4, $Al_{5,65}Mg_{2,39}O_{10}Si_{1,45}$, MgO_3Si, $Al_{2,4}O_{4,8}Si_{0,6}$, Al_2O_3. The main part of the studied granules is represented by spinel, mullite, aluminum oxide, sapphirine. Moreover, spinels in the phase composition of sample №. 1 amounted to 25.4 %, sapphirine 26.0 %, aluminum oxides 25 % and mullite accounts for 11.7 5, the rest is MgO_3Si (11.9 %). The theoretical temperature of the reduction of the main element of silicon by carbon is 1669 °C, and the complete destruction of mullite is achieved above 1500 °C. Therefore, granules obtained from aluminum slags are quite suitable for use as a batch in the production of ferrosilicon with aluminum.

Keywords: Aluminum slag, granules, aluminum oxide, high-temperature firing, derivatogram.

Introduction

Currently, in many countries, priority in state industrial policy is given to the introduction of low-waste and waste-free technologies, as well as environmentally friendly production processes that facilitate the integrated use of all types of raw materials [1;2]. Rising energy prices and tightening environmental requirements stimulate the development of modern waste-free processing technologies for aluminum waste. In this regard, the creation of effective methods for the disposal of aluminum chips and slags is becoming especially relevant and is of significant scientific, practical and economic interest.

One of the effective ways to improve the economic performance of industrial enterprises is to reduce the costs associated with the formation and disposal of

environmentally hazardous waste. Slags arising during the smelting of aluminum and its alloys are a complex mixture of high-temperature compounds, including metal residues, oxides and salts. When slag is removed from the surface of the melt, a significant amount of aluminum is lost with it - up to 70–80 % of the total slag mass [3;4;5].

The prospects for the development of the metallurgical industry must be considered through the prism of waste-free technologies. The issue of waste disposal is not limited to the return of metals to secondary circulation. A comprehensive solution to this problem will significantly improve the environmental performance of production and ensure the release of new types of commercial products, previously produced only from natural raw materials. It is important to implement modern approaches to the formation of added value in the processing of industrial waste, maximally implementing the concept of «No WASTE» [6;7], the essence of which is to export only economically valuable components outside the enterprise [8]. This idea can be illustrated by the example of processing aluminum slags. In order to effectively extract aluminum from removable and dump slags, specialists of NPF KOMTERM LLC have developed a waste-free technology for their processing. The process is based on smelting slags in arc furnaces with the addition of steel scrap and fluxes, which allows obtaining ferroaluminum and high-alumina synthetic slag. High-alumina slag can be used as a refining additive in steelmaking processes. The implementation of this technology in DC furnaces with a capacity of 0.5 tons made it possible to extract 98 % of aluminum from slags into the alloy [9].

The authors of the work [10] propose using secondary low-quality aluminum waste – aluminum chips, flux-free smelting slags, as well as the magnetic fraction of recycled scrap – to produce ferroaluminum, which is used as a deoxidizer in the steel industry. Semi-industrial tests have shown the economic efficiency and environmental feasibility of this approach: the use of cheap raw materials reduces the cost of production, and the costs of waste preparation are offset by savings in aluminum, traditionally used to produce ferroalloys.

The efficiency of aluminum slag processing processes depends on many factors. To select the most rational parameters of the aluminum slag processing technology, a technology for producing granules was chosen that ensures the minimum cost of the resulting ferrosilicon with aluminum.

Materials and methods

The studies of granule production were conducted in the laboratory of the Department of Metallurgy of the NJSC Toraighyrov University on a ZLSP 200 granulator. The general appearance of the granulator is shown in Figure 1.

Figure 1 – Granulator ZLSP 200

Mixtures with various wastes (ash and slag wastes, graphitized wastes from anode production, ferrosilicon screenings) were used as a charge.

The main objective of the study in this area is to study the mechanism of the influence of high-temperature roasting on the physicochemical properties of granules and the selection of the optimal type of metallized materials. The correct selection of metallized materials, which is best selected during the granulation process, and in the future during the reduction processes of obtaining ferrosilicon with aluminum, granules will have a positive effect on the chemistry of the process of obtaining ferrosilicon with aluminum.

During the research, aluminum slags were selected as the main starting materials. The chemical composition of the materials under study is given in Table 1. According to these data, the content of aluminum oxide (Al_2O_3) in aluminum slags reaches 67.8 %. In terms of fractional composition, aluminum slag is characterized by a finely dispersed fraction, which requires preliminary granulation or pelletizing for their effective use in metallurgical processes. The process of granulating aluminum slags with subsequent strengthening firing at high temperatures allows you to obtain a granulated material with the necessary strength characteristics. This will ensure ease of dosing and the ability to introduce granules into the composition of the charge in the production of ferrosilicon. Figure 2 shows granulated aluminum slag.

Figure 2 – Granulated aluminum slag

Table 2 – Chemical composition of the studied ash and slag waste and aluminum slags

Name of material	Chemical composition, %				
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
Aluminum slags	12,4	67,8	0,52	4,59	4,58

Thus, the development of a resource-saving technology for processing aluminum slags to obtain a commercial product will contribute to the implementation of the principles of waste-free production. However, for a complete understanding of the chemistry of the process and the influence of the product obtained from aluminum slags on the process of obtaining ferrosilicon, there is a need to study the physicochemical properties of the material under study.

Results and discussion

To study the physicochemical properties, samples of granules obtained from aluminum slags were prepared, which were subjected to microanalysis by scanning electron microscopy with the INCA Energy microanalysis system and an X'Pert PRO X-ray diffractometer at the Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute (Karaganda). Tables 2-3 and Figures 3–4 present the data on the parameters for processing elemental composition analyses based on EDS analysis data.

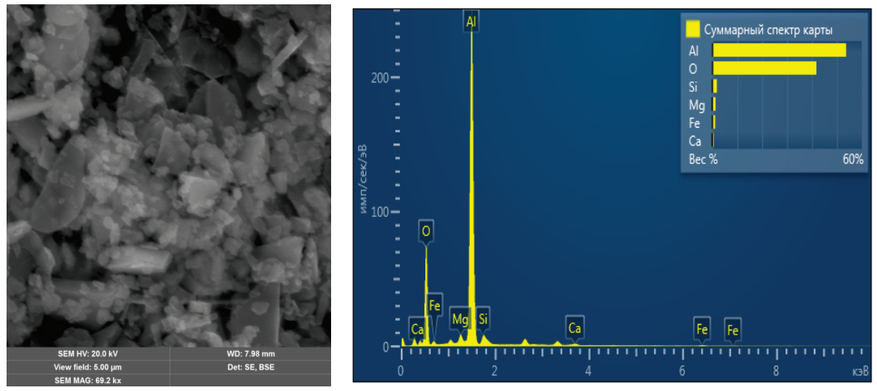


Figure 3 – Microanalysis and spectrogram of sample №1 (granules from aluminum slag)

Table 2 – Data of the processing parameters of the analyses of all elements of sample №1 (granules from aluminum slag)

Spectrum	Chemical composition, %										
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Cu	As	Pb
Spectrum 1	38,6	1,53	85,6	2,4	-	1,67	-	2,4	-	-	-
Spectrum 2	5,45	0,41	67,2	1,9	0,20	1,07	-	3,43	-	-	-
Spectrum 3	24,0	0,40	55,6	2,3	-	1,80	-	2,4	-	-	-
Spectrum 4	25,7	0,72	56,0	2,1	-	1,07	-	1,4	-	-	-
Spectrum 5	10,4	0,65	69,4	2,0	-	1,40	-	-	-	-	-

From the presented data in Figures 3 and Table 2 it is evident that the maximum amount of aluminum is found in spectra 1 and 5 – 85.6 and 69.4 respectively. Silicon is represented by a minimum amount, in all the studied spectra from 1.9 to 2.4 %. Iron, as well as silicon, is found in a small amount.,

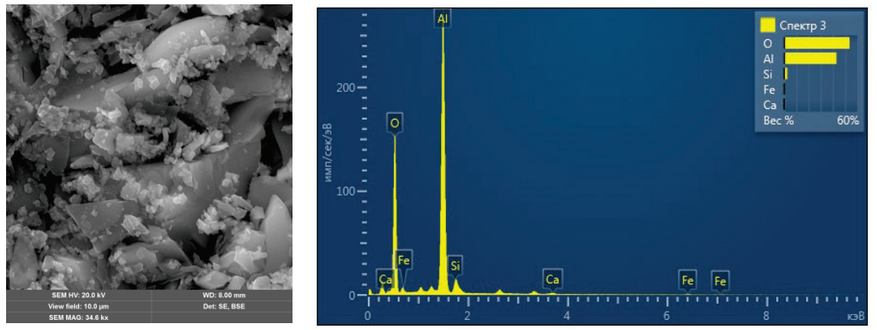


Figure 4 – Microanalysis and spectrogram of sample № 2 (granules from aluminum slag)

Table 3 – Data on the processing parameters of the analysis of sample №2 (granules from aluminum slag)

Spectrum	Chemical composition, %										
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	K	Mn	Na
Spectrum 1	28,3	0,70	83,0	1,05	-	1,04	1,07	-	-	-	-
Spectrum 2	38,1	-	70,2	3,00	-	1,03	1,04	-	-	-	-
Spectrum 3	30,1	0,63	12,0	2,05	-	1,30	1,07	-	-	-	-
Spectrum 4	32,6	1,10	15,3	0,20	-	1,06	-	-	-	-	-

In Table 3 and Figure 4, it is observed that the maximum amount of aluminum in spectrum 1 and 2 is 83.0 and 70.2. Such an amount of aluminum in these spectra is associated with the presence of aluminum oxide in the granules. From the EDS analysis data, it is clear that the main phases are Al_2O_3. The presence of spinel and mullite is also possible.

To confirm the results of the EDS analysis, X-ray phase analysis studies of the granules were carried out using an X'Pert PRO X-ray diffractometer manufactured by PANalytical. The need to study the phase composition of materials is that it directly determines the physicochemical properties, behavior of the material under various conditions and its suitability for further understanding the possibility of using it in the production of ferrosilicon.

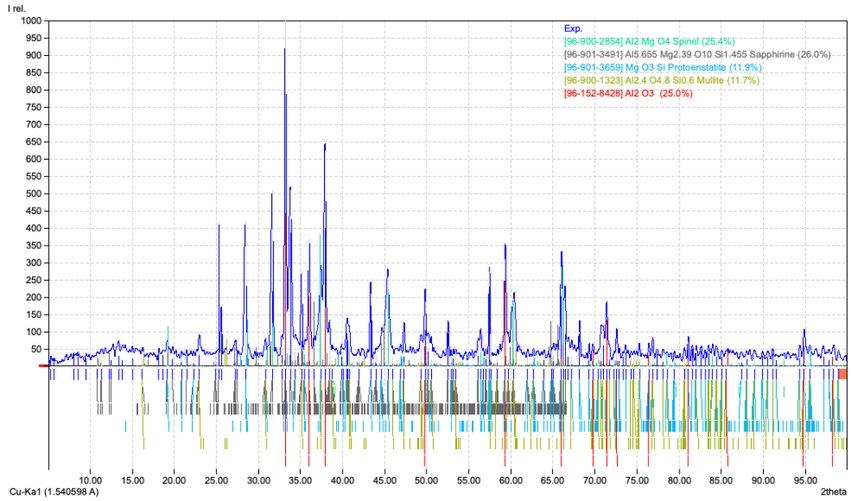


Figure 5 – X-ray of sample №1 (granules of aluminum slag)

Table 4 – Quantitative and qualitative phase composition of sample №1 (granules from aluminum slag)

Name of mineral	Formula	Mass fraction, %
Spinel	Al_2MgO_4	25,4
Sapphirine	$Al_{5,65}Mg_{2,39}O_{10}Si_{1,45}$	26,0
Protoencephalitis	MgO_3Si	11,9
Mullite	$Al_{2,4}O_{4,8}Si_{0,6}$	11,7
Aluminum oxide	Al_2O_3	25

From the X-ray diffraction data of sample №1 it is evident that the main phases in the granules of aluminum slag are Al_2MgO_4, $Al_{5,65}Mg_{2,39}O_{10}Si_{1,45}$, MgO_3Si, $Al_{2,4}O_{4,8}Si_{0,6,}$ Al_2O_3. The main part of sample №1 of aluminum slag is represented by spinel, mullite, aluminum oxide, sapphirine (Figure 5). Moreover, spinels in the phase composition of sample №1 amounted to 25.4 %, sapphirine 26.0 %, aluminum oxides 25 % and mullite accounts for 11.7 5, the rest is MgO_3Si (11.9 %).

Mullite is formed from free oxides by the reaction: $3Al_2O_3 + 2SiO_2 = 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. This is the most thermodynamically refractory and stable form of the compound.

Figure 6 shows the data from studies of thermal effects using the Synchronous Thermal Analyzer LR-STA-200 derivatograph.

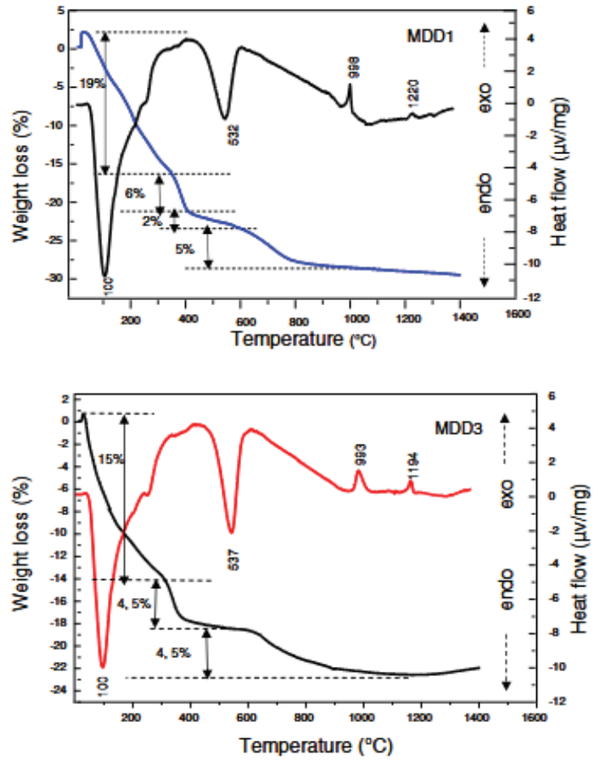


Figure 6 – Differential thermal analysis of granules

The analysis of the data presented in Figure 6 shows two endothermic peaks. The first of them is very intense, has a maximum located at 100 °C, it is caused by the removal of hygroscopic moisture. Which is accompanied by a mass loss in the temperature range from 20 °C to 400 °C. The second endothermic effect is recorded at 537 °C associated with the removal of hydrated moisture (kaolin dehydration). An insignificant mass loss is observed in the temperature range from 375 °C to 600 °C. In addition to these two endothermic peaks, the DTA curve contains other low-intensity exothermic effects not associated with any mass loss. When heating aluminum slag samples in an oxidizing environment at a temperature above 1200 °C, mullite and quartz are formed, which was previously detected in the X-ray phase and petrographic analysis data (Figures 3, 4, 5). The mullite phase in the structure of the granulated aluminum slag sample (granules) becomes the leading phase. In addition, starting from 1200 °C, the excess of silica leads to the crystallization of some minerals (cristobalite). At 1500 °C, an increase in the intensity of the peaks is observed for the samples, most likely caused by an increase in the amount of mullite. On the other hand, at this temperature,

the cristobalite peak disappears due to its transition to the glassy phase. The exothermic effect at a temperature of 1000 °C corresponds to the crystallization of mullite. The second less intense exothermic effect is observed at a temperature of 1194 °C for MDD3 and 1220 °C for MDD1, associated with the formation of secondary mullite as a result of the reaction of alumina formed from aluminum slag, most likely associated with the excess release of silica [11]. At 1500 °C, the formation of primary mullite crystals is observed, which are clearly visible in Figures 1 and 2. However, complete destruction of mullite is achieved above 1500 °C.

Financing information

The research is carried out within the framework of grant funding for scientific and (or) scientific and technical projects for 2024–2026 under project AP23488812 «Development and research of technology for smelting ferrosilicon with a high aluminum content using substandard ashes and aluminum slags».

Conclusions

Thus, the conducted studies have shown that the main phases in aluminum slags are Al_2MgO_4, $Al_{5,65}Mg_{2,39}O_{10}Si_{1,45}$, MgO_3Si, $Al_{2,4}O_{4,8}Si_{0,6,}$ Al_2O_3. The main part of the studied samples of aluminum slag is represented by spinel, mullite, aluminum oxide, sapphirine. Moreover, spinels in the phase composition of sample №1 amounted to 25.4 %, sapphirine 26.0 %, aluminum oxides 25 % and mullite accounts for 11.7 5, the rest is MgO_3Si (11.9 %). The theoretical temperature of reduction of the main element of silicon by carbon is 1669 °C, and complete destruction of mullite is achieved above 1500 °C. Therefore, granules obtained from aluminum slags are quite suitable for use as a charge in the production of ferrosilicon with aluminum. To improve the quality of granules to meet the requirements of recovery processes, quartzites, metallic material in the form of ferrosilicon screenings, or iron shavings must be added to the charge in the production of granules.

REFERENCES

1 **Гогин, В. Б., Шадаев, Д. А.** Современные направления развития технологии рециклинга алюминия [Текст] // Технология легких сплавов, 2006. – № 4. – С. 101–118.

2 **Леонтьев, Л. И., Понамарев, В. И., Шешуков, О. Ю.** Переработка и утилизация техногенных отходов металлургического производства [Текст] // Экология и промышленность России, 2016. – Т. 20. – № 3. – С. 24–27.

3 **Abdulkadir, A., Ajayi, A., Hassan, M. I.** Evaluating the chemical composition and the molar heat capacities of a white aluminum dross. Energy Procedia, 75. – 2015. – P. 2099–2105. – https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.326

4 **Adans, Y. F., Martins, A. R., Coelho, R. E., Das Virgens, C. F., Ballarini, A. D., Carvalho, L. S.** A simple way to produce γ-Alumina from aluminum cans by precipitation reactions. Materials Research, 19(5). – 2016. – P. 977–982. – https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0310.

5 **Adeosun, S. O., Sekunowo, O. I., Taiwo, O. O., Ayoola, W. A., Machado, A.** Physical and mechanical properties of aluminum dross. Advances in Materials, – 3 (2), 2014. – P. 6–10. – https://doi.org/10.11648/j.am.20140302.11.

6 **Lee, J., Jeon, H., Oh, D. G., Szanyi, J., Kwak, J. H.** Morphology-dependent phase transformation of γ-Al_2O_3. Applied Catalysis A: General, 2015. – 500. – P. 58–68. – https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.03.040.

7 **Itoh, T., Uchida, T., Matsubara, I., Izu, N., Shin, W., Miyazaki, H.** Preparation of γ-alumina large grain particles with large specific surface area via polyol synthesis. Ceramics International. – 41(3), 2015. – P. 3631–3638. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.028.

8 **Люнген, Х., Шпрехер, М.** Гибкие решения в сталелитейной отрасли для сокращения выбросов CO_2 и повышения эффективности производства [Текст] // Черные металлы. 2017. – № 11. – С. 64–71.

9 **Нехамин, С. М., Крутянский, М. М.** Плавка алюминиевых сплавов и отвальных шлаков в дуговых печах постоянного тока [Текст] // Цветные металлы. 2006. – № 9. – С. 113–115.

10 **Сачко, А. И., Артемов, Н. И., Микуляк, О. П., Варанов, А. А., Ладян М. И.** Перспективы использования в черной металлургии ферроалюминия, полученного из низкокачественных отходов алю миниевого производства [Текст] // Цветные металлы. 1986. – № 8. – С. 78–79.

11 **Lamouri, S., Hamidouche, M., Bouaouadja, N., Belhouchet, H., Garnier, V., Fantozzi, G., Trelkat, J. F.** Control of the alumina to alumina phase transformation for an optimized alumina densification. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, – 56 (2), 2017. – P. 47–54. – https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2016.10.001.

REFERENCES

1 **Gogin, V. B., Shadayev, D. A.** Sovremennye napravleniya razvitiya tekhnologii retsyklinga alyuminiya (po materialam 3-y konferentsii «Retsikling alyuminiya» [Modern trends in the development of aluminum recycling technology] [Text] // Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys. 2006. – № 4. – P. 101–118.

2 **Leont`ev, L. I., Ponomarev, V. I., Sheshukov, O. Yu.** Pererabotka i utilizatsija tekhnogennykh otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva [Processing and utilization of industrial wastes of metallurgical production] [Text] // Ekologija i promyshlennost Rossii = Ecology and industry of Russia, 2016. – Vol.20. – № 3. – P. 24–27.

3 **Abdulkadir, A., Ajayi, A., Hassan, M. I.** Evaluating the chemical composition and the molar heat capacities of a white aluminum dross [Text] // Energy Procedia, 75, – 2015. – P. 2099–2105. – https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.326.

4 **Adans, Y. F., Martins, A. R., Coelho, R. E., Das Virgens, C. F., Ballarini, A. D., Carvalho, L. S.** A simple way to produce γ-Alumina from aluminum cans by precipitation reactions [Text] // Mater. Res., 19(5). – 2016. – P. 977–982. – https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0310.

5 **Adeosun, S. O., Sekunowo, O. I., Taiwo, O. O., Ayoola, W. A., Machado, A.** Physical and mechanical properties of aluminum dross. Advances in Materials. – 3 (2), 2014. – P. 6–10. – https://doi.org/10.11648/j.am.20140302.11.

6 **Lee, J., Jeon, H., Oh, D. G, Szanyi, J., Kwak, J. H.** Morphology-dependent phase transformation of γ-Al_2O_3. Applied Catalysis A: General, 2015. – 500. – P. 58-68. – https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.03.040.

7 **Itoh, T., Uchida, T., Matsubara, I., Izu, N., Shin, W., Miyazaki, H.** Preparation of γ-alumina large grain particles with large specific surface area via polyol synthesis. Ceramics International. – 41(3), 2015. – P. 3631–3638. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.028.

8 **Lyngen, Kh, B., Shprekher, M.** Gibkiye resheniya v staleliteynoy otrasli dlya sokrashcheniya vybrosov CO_2 i povysheniya effektivnosti proizvodstva [Flexible solutions in the steel industry to reduce CO_2 emissions and increase production efficiency] [Text] // Chernye me tally = Black metals. 11, 2017.– P. 64–71.

9 **Nekhamin, S. M., Krutyanskiy, M. M.** Plavka alyuminiyevykh splavov i otval'nykh shlakov v dugovykh pechakh postoyannogo toka [Melting of aluminum alloys and dump slags in DC arc furnaces] [Text] // Tsvetnye metally = Non-ferrous metals, 2006, – № 9. – P. 113–115.

10 **Sachko, A. J., Artemev, N. I., Mikulyak, O. P., Baranov, A. A., Ladyan, V. J.** Perspektivy ispol'zovaniya v chornoy metallurgii ferroalyuminiya, poluchennogo iz nizkokachestvennykh otkhodov alyuminiyevogo proizvodstva [Prospects for the use in ferrous metallurgy of ferroaluminium obtained from low-quality wastes of aluminum production] [Text] // Tsvetnye metally = Non-ferrous metals, 1986. – № 8, P. 78–79.

11 **Lamouri, S., Hamidouche, M., Bouaouadja, N., Belhouchet, H., Garnier, V., Fantozzi, G., Trelkat, J. F.** Control of the alumina to alumina phase transformation for an optimized alumina densification. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 56 (2), 2017. – P.47–54. – https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2016.10.001.

Received 02.08.25.
Received in revised form 02.10.25.
Accepted for publication 08.10.25.

А. Қ. Жүнісов[1], А. Қ. Жүнісова[2], *А. Е. Кенжебекова[3], А. Г. Бакиров[4], Р. А. Тюлюбаев[5]
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
02.08.25 ж. баспаға түсті.
02.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
08.10.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

АЛЮМИНИЙ ҚОЖДАРЫНАН АЛЫНҒАН ТҮЙІРЛЕРДІҢ ФИЗИКАЛЫҚ-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада алюминий қождарды түйірлеу арқылы алынған гранулалардың физикалық-химиялық қасиеттерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеу барысында түйірлеу процессінің химизмін түсіну мақсатында жоғары температурада беріктендіру күйдіруіне ұшыратылды. Физикалық-химиялық қасиеттерін зерттеу үшін алюминий қождарынан алынған түйірлердің сынамалары дайындалып, олар сканерлеуші электрондық микроскопия әдісімен микроанализге, рентгенфазалық талдауға және дериватографиялық зерттеулерге ұшыратылды. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде түйірлерде Al_2MgO_4, $Al_{5,65}Mg_{2,39}O_{10}Si_{1,45}$, MgO_3Si, $Al_{2,4}O_{4,8}Si_{0,6}$, Al_2O_3 негізгі фазалар болып табылатыны анықталды. Зерттеліп жатқан түйірлердің негізгі бөлігі шпинель, муллит, алюминий оксиді және сапфириннен тұрады. Сонымен қатар, № 1 сынаманың фазалық құрамында шпинель 25,4 %, сапфирин 26,0 %, алюминий оксидтері 25 %, муллит 11,7 % құрайды, қалған бөлігі MgO_3Si (11,9 %) құрайды. Кремний элементін көміртекпен қалпына келтірудің теориялық температурасы 1669 °С құрайды, ал муллиттің толық бұзылуы 1500 °С-тан жоғары температурада жүзеге асады. Сондықтан алюминий қождарынан алынған түйірлер ферросилицийді алюминиймен өндіру кезінде шикіқұрам ретінде пайдалануға толықтай жарамды.

Кілтті сөздер: Алюминий қожы, түйірлер, алюминий оксиді, жоғары температуралы күйдіру, дериватограмма.

А. К. Жунусов[1], А. К. Жунусова[2], *А. Е. Кенжебекова[3],
А. Г. Бакиров[4], Р. А. Тюлюбаев[5]
[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 02.08.25.
Поступило с исправлениями 02.10.25.
Принято в печать 08.10.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНУЛ ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ШЛАКОВ

В данной статье приводятся исследования физико-химических свойств гранул полученных гранулированием алюминиевых шлаков. Гранулы в процессе исследований подвергались упрочняющему обжигу при высоких температурах для понимания химизма процесса. Для исследования физико-химических свойств были подготовлены пробы гранул полученных из алюминиевых шлаков, которые подверглись микроанализу растровой электронной микроскопией, рентгенофазового анализа и дериватографическим исследованиям. Проведенные исследования показали что основными фазами в гранулах являются Al_2MgO_4, $Al_{5,65}Mg_{2,39}O_{10}Si_{1,45}$, MgO_3Si, $Al_{2,4}O_{4,8}Si_{0,6}$, Al_2O_3. Основная часть исследуемых гранул представлена шпинелью, муллитом, оксидом алюминия, сапфирином. Причем шпинели в фазовом составе пробы № 1 составили 25,4 %, сапфирин 26,0 %, оксиды алюминия 25 % и на муллит приходится 11,7 5, остальное MgO_3Si (11,9 %). Теоретическая температура восстановления основного элемента кремния углеродом составляет 1669 °С, а полное разрушение муллита достигается выше 1500 °С. Поэтому, гранулы полученные из алюминиевых шлаков вполне пригодны для использования в качестве шихты при производстве ферросилиция с алюминием.

Ключевые слова. Алюминиевый шлак, гранулы, оксид алюминия, высокотемпературный обжиг, дериватограмма.

FTAMP 53.37.91
https://doi.org/10.48081/NETT2376

Г. М. Койшина[1], Е. Е. Жолдасбай[2], И. Н. Нурсаинов[3],
Ю. Б. Ичева[4], *Н. К. Досмухамедов[5]
[1,3,5]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2,4]Ө. А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті,
Қазақстан Республикасы, Жезқазған қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0592-3843
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9925-4435
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5914-9772
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1210-4363
*e-mail: nurdos@bk.ru

ҚАРА МЕТАЛЛУРГИЯ ШАҢЫН ҚАЙТА ӨҢДЕУДІҢ ХЛОРЛАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНЫҢ ЭКОНОМИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Жұмыста бұрын жүргізілген теориялық және эксперименттік зерттеулердің нәтижелері негізінде қорғасын, мырыш бар шаңды кешенді қайта өңдеуге арналған хлорлау технологиясының жалпы тұжырымдамасы тұжырымдалып, технологиялық схема жасалып, технологияның экономикалық тиімділігі бағаланды. Технологияға сәйкес, магниттік сепарация арқылы магниттік фракция шаңнан бөлініп, құрамында темірі жоғары (~70 %) темір бар өнім алынады. Құрамында мырыш пен қорғасынның көп мөлшері бар магниттік сепарациядан кейін алынған шаңның магниттік емес фракциясы бірінші кезеңде аммоний хлоридімен бірге төмен температуралы күйдіруге (450–500 °С) ұшырайды, одан тауарлық қорғасын возгондары мен мырыш концентрациясы бар клинкер алынады. Екінші кезеңде клинкерді кальций хлоридімен бірге жоғары температуралы күйдіру (850–900 °С) арқылы мырышты 98 %-ға дейін возгонға жоғары бөліп ала отырып мырыш мөлшері жоғары тауарлық өнімді (47,7 % Zn) алу жүзеге асырылады.

Қара металлургия шаңын кәдеге жарату бойынша әзірленген технологияның оң нәтижелері негізінде тауарлық өнімдерді ала отырып экономикалық тиімділік есептеулері жүргізілді. Алдын ала бағалау бойынша, тәулігіне 10 тонна шаңды өңдеудің нақты өнімділігі кезінде жылдық экономикалық тиімділік жылына 4 483 521,3 АҚШ долларын құрады.

Кілтті сөздер: шаң, қорғасын, мырыш, төмен температуралы күйдіру, жоғары температуралы күйдіру, возгондар, бөліп алу, экономикалық тиімділік.

Кіріспе

Электрдоғалы пештерде қара металл сынықтарын өңдеу кезінде түзілетін балқыту шаңдары, ауыр металдар (мырыш, қорғасын) мен темір тотықтарынан тұратын ұсақ бөлшектер мен құрамының салдарынан аса қауіпті болып саналады. Бұл майда бөлшектер адамның тыныс алу және ас қорыту жүйелеріне жеңіл түседі және жинала отырып күрделі ауруларды тудырады [1; 2; 3]. Оған қоса, шаң

түрінде металдар жоғалымы дайын өнім шығуын 2–5 %-ға төмендетеді. Жылына 1 млн тонна болат өндіретін металлургиялық кәсіпорындар үшін бұл жыл сайын 32 мың т дейін шаң алынуы мүмкін [4].

Көптеген қара металлургия кәсіпорындарында балқыту шаңының негізгі массасы өңделмейді, қоймаландыруға жіберіледі, осылайша ауқымды ауданды алып отырады. Шаңды ұстау және кәдеге жарату мәселелері оның дисперстілігіне, тұрақсыз химиялық құрамына және домна пештерінде пайдалануға қажетсіз, жоғары мырыш мөлшеріне байланысты. Аса күрделі мәселе, ылғал газ тазалау құрылғыларының жұмысында түзілетін шламдардан шаңды бөліп алу болып қалуда.

Өндірістік шаңдарда мырыш мөлшері 30 %-ға дейін жетуі және 60 % дейін темір тотықтары мен шамамен 20 % өзге қоспаларда (қорғасын, кремний, кальций мен т.б. тотықтар) шоғырлануы мүмкін. Металлургиялық өндіріске өңдеуге мырышқұрамды шаңды қайтару мүмкіндіктері қорытынды өнімдерінде (шойын, болат, ферроқорытпалар) мырыш мөлшерінің жоғарылауына әкеледі және олардың сапасын төмендетеді. Онымен қоса, балқыту процесінде шаңда мырыш деңгейінің жоғары болуы, процестің технологиялық режимі мен жабдықтардың қалыпты жұмысына кедергі келтіре отырып, пеште қақтардың түзілуіне әсер етеді [5; 6]. Мырышқұрамды шаң өңдеудің тиімді технологиясының жоқ болуы, мырыш пен өзге бағалы компоненттерді бөліп алу үшін қосымша шикізат көзі ретінде оның пайдаланылуын шектейді, бұл оның қоймаларда жиналуына әкеледі [7; 8].

Заманауи шаң өңдеу әдістері селективті мырыш, қорғасын мен өзге бағалы компоненттерді бөліп алу үшін экономикалық ақталатын өндірісті келтіруге мүмкіндік бермейді. Нәтижесінде көптеген металлургиялық кәсіпорындар осы шаңды сақтауға мәжбүр. Тиімді шаң өңдеу технологиясының ізденісі шешілуін талап ететін кілтті мәселелердің бірі болып қалуда. Шаңда қорғасынның жоғары мөлшері (6 % дейін) мақсатты өнімдерге селективті мырыш [9; 10], қорғасын мен өзге бағалы металдарды [11; 12] бөліп алудың жаңа тиімділігі жоғары технологияларының енгізілуін қиындатады.

Құрамында мырыш бар шаңның әлемдік жылдық жиынтық өсімі 10–15 млн. тоннаға бағаланады [13]. Бұл үрдіс Қазақстанның қара металлургия кәсіпорындарына да тән, онда шаңның жиналуының өсуімен қатар олардың жалпы шығарындылары байқалады. Құрамы күрделі шаңдардың пайда болуы мен жинақталу процесіне қара металл сынықтарын (құбырлар, рельстер және т.б.) өңдеумен айналысатын шағын және орта бизнестің өндірістік кәсіпорындарының қызметі елеулі үлес қосады. Қалдықсыз технологияларды ұйымдастыруға бейімделмеген шағын және орта бизнес кәсіпорындары сапасының төмендігіне байланысты шаңның мақсатты сатылымын таппайды, бұл олардың айтарлықтай жинақталуына әкеледі. Химиялық және фазалық құрамы бойынша алынған шаң болат өндірісінің дәстүрлі шаңына қарағанда әлдеқайда күрделі және оларды қайта өңдеу үшін жаңа ұтымды технологияларды әзірлеуді талап етеді.

Ертеректе біз орындаған жұмыстарда [14; 15], возгондарға қорғасын мен мырыштың жоғары бөлінуімен, «Казферросталь» ЖШС шарттарында металл

сыныктарын электрдоғалы пеште балқытудан кейін алынған шаңды өңдеудің технологиялық режимдері мен көрсеткіштері пайдаланылған. Жұмыстардың оң нәтижелері, шаңның хлор реагенттерімен: аммоний хлоридімен және кальций хлоридімен кезекпен екі сатыда ортақ жентектеу арқылы тауарлы возгондарға мырыш пен қорғасынның селективті бөлінуінің принципиалды мүмкіндігін көрсетті. Кешенді зерттеулерден алынған нәтижелері, тауарлы өнімдердің алынуымен кешенді шаң өңдеудің комбинирленген хлорлау технологиясының жалпы концепциясын тұжырымдауға және қорытынды технологиялық сұлбаны тұрғызуға мүмкіндік береді.

Берілген жұмыстың мақсаты – шаңнан тауарлы өнімдерге темір, мырыш пен қорғасынды кешенді бөліп алуға мүмкіндік беретін жалпы технологиялық сұлбаны жасау және технологияның экономикалық тиімділігін алдын ала бағалау.

Технологияның мәні, жоғары темір мөлшерімен 70 % темір құрамды өнімнің алынуымен магниттік сепарация жолымен шаңның магниттік фракциясын алдын ала бөліп алу болып келеді [14, 6 б.]. Магниттік сепарациядан кейін алынатын магниттік емес фракция екі сатылы хлорлау арқылы күйдіруге ұшырайды: бірінші сатыда – құрамында мырыш болатын тауарлы қорғасын возгондары мен клинкердің алынуымен аммоний хлоридімен төмен температурада күйдіріледі, екіншісінде – мырыштың жоғары бөлінуімен клинкер кальций хлоридімен жоғары температурада күйдіріледі [15, 106 б.].

Ұсынылып отырған технологиялық сұлба, қалдықтар көлемін азайта отырып және оларды ары қарай кәдеге жарату мүмкіндігін қамтамасыз ете отырып, мақсатты металдардың жоғары дәрежеде бөлінуіне қол жеткізуге мүмкіндік береді. Бұл кезде, аммоний хлориді және кальций хлориді тәрізді салыстырмалы арзан және қол жетімді реагенттердің пайдаланылуы салдарынан, процестің қол жетімді экономикалық тиімділігі қамтамасыз етіледі.

Реагенттердің, энергия мен металдардың құны жөніндегі қолжетімді деректерге негізделген алдын ала экономикалық бағалауына сәйкес, өңделетін шаңның жеткілікті көлемі мен хлорлау арқылы күйдіру процесінің көрсеткіштерін оңтайландыру шарттарында ұсынылып отырған технология рентабельді болып келеді. Өнеркәсіптік деңгейде берілген технологияны ендірудің экономикалық нысаналылығын және технологиялық көрсеткіштерін нақтылау үшін ары қарай қосымша зерттеулер мен тәжірибелі – өнеркәсіптік сынақтар қажет.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу нысаны – электрдоғалы пеште әртүрлі қара металл сынықтарын (құбырлар, рельстер және т.б.) өңдеуден алынған, «Казферросталь» ЖШС шаңы. Сынамалар тікелей электрдоғалы пеште балқытудан алынған шаңдардан алынды.

Бастапқы шаңның орташаланған элементтік құрамы 1 кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Бастапқы шаңның элементтік құрамы нәтижелері

Бастапқы сынама	Мөлшері, % масс.					
	Zn	Pb	Fe	SiO_2	O	Басқалар
Қара металл сынықтарын балқыту шаңы	34,24	4,12	32,86	5,3	21,17	2,31

1 кестеден көрініп тұрғандай шаңдар мырыш пен темірдің жоғары мөлшерімен сипатталады. Орташа есеппен ~3 % құрайтын, болат өндірісінде алынатын шаңда қорғасын мөлшерімен салыстырғанда, қорғасынның аса жоғары мөлшерін (4,12 %) айта кету керек.

Шаңның фазалық және рационалды құрамдары егжей тегжейлі [14, 5 б.; 14, 105 б.] жұмыста сипатталған.

Қара металл сынықтарын балқыту шаңдарын, одан темірді бөліп алу үшін магниттік сепарацияға жібереді. Магниттік фракцияға темір бөлінеді, бастапқы шаңда магнетиттегі мөлшерінен темірді қайта есептегенде 98 % құрады [14, 6 б.].

Магниттік сепарация процесінің материалдық балансы 2 кестеде келтірілген.

Алынған шаңның магниттік емес фракциясы, жоғарыда айтылғандай, NH4Cl бірге төмен температурада күйдірге ұшырайды. Тәжірибелер жүргізу әдістемесі келесідей болды. Магниттік сепарациядан кейін алынған шаңның магниттік емес фракциясы әртүрлі массалық қатынастарда аммоний хлоридінің берілген мөлшерімен араласқан. Аммоний хлоридінің шығыны қорғасын оксидін хлорлау үшін оның стехиометриялық қажетті мөлшерінен (СҚМ) 1,1-ден 1,7 есеге дейін өзгертілді. Тәжірибелердің температуралық аралығы – 300–600 °С. Барлық тәжірибелердегі магниттік емес шаң фракциясының бастапқы мөлшері тұрақты болды және 100 г құрады. Аммоний хлоридімен шаң қоспасы пештің реакция аймағына 100 мл/мин жылдамдықпен берілген аргонның инертті атмосферасында берілген температурада орнатылды. Барлық тәжірибелерде күйдіру ұзақтығы 60 минутты құрады. Тәжірибе нәтижесі және алынған оңтайлы параметрлер толығырақ [15, 105–109 б.] жұмыста келтірілген.

Оңтайлы көрсеткіштерде төмен температурада күйдіру процесінің материалдық балансы 3 кестеде келтірілген.

Кесте 2 – Шаңды магниттік сепарациялаудың материалдық балансы [14, 6 б.]

Өнімдер	Мөлшері		Zn		Pb		Fe		SiO_2		O		Басқа		Барлығы:	
	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%
Түседі:																
Бастапқы шаң	100	100	34,2	34,2	4,1	4,1	32,8	32,8	5,3	5,3	21,1	21,1	2,3	2,3	100	100
Барлығы:	**100**		**34,2**		**4,1**		**32,8**		**5,3**		**21,1**		**2,3**		**100**	
Алынды:																
Магниттік фракция	28,5	28,5	0,9	2,9	0,2	0,7	19,4	67,8	0,2	0,3	7,7	26,8	0,3	1,2	28,5	100
Магнитті емес фракция	71,5	71,5	33,3	46,7	3,9	5,4	13,4	18,8	5,1	7,2	13,4	18,8	2,0	2,7	71,5	100
Барлығы:	**100**	**100**	**34,2**		**4,1**		**32,8**		**5,30**		**21,1**		**2,3**		**100,0**	

Кесте 3 – Оңтайлы технологиялық көрсеткіштерде шаңның магниттік емес фракциясын күйдіру процесінің материалдық балансы: температура – 500 °С, күйдіру ұзақтығы – 60 минут, NH_4Cl шығыны – қорғасынды хлолау үшін стехиометриялық қажетті мөлшерінен 1,5 есе артық.

Өнімнің атауы	Көлемі		Pb			Zn			Fe			Si			Cl			O			Барлығы:
	г	%	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Түседі:																					
Шаңның магниттік емес фракциясы	100,0	95,96	5,48	5,48	100,0	46,74	46,74	100,0	18,87	18,87	100,0	3,39	3,39	100,0				22,77	22,77	100,0	100,0
NH_4Cl	4,21	4,04													2,79	66,3	100,0				4,21
Барлығы:	**104,21**	**100,0**	**5,48**		**100,0**	**46,74**		**100,0**	**18,87**		**100,0**	**3,39**		**100,0**	**2,79**		**100,0**	**22,77**		**100,0**	**104,21**
Алынды:																					
Клинкер	93,91	90,1	0,13	0,13	2,3	46,7398	49,77	99,9995	18,8699	20,09	99,9995	3,39	3,61	100,0				20,78	22,13	91,25	93,91
Возгондар	7,23	6,9	5,35	74,02	97,7	0,0002	0,003	0,0005	0,0001	0,001	0,0005				1,83	25,33	65,7	0,008	0,11	0,04	7,23
Газ, басқалар	3,07	2,9													0,96	31,13	34,31	1,99	64,58	8,72	3,07
Барлығы:	**104,21**	**100,0**	**5,48**		**100,0**	**46,74**		**100,0**	**18,87**		**100,0**	**3,39**		**100,0**	**2,79**		**100,0**	**22,78**		**100,0**	**104,21**

I – көлемі, г; II – мөлшері, %; III – бөлініп таралуы, %.

Төмен температурада күйдіруден кейін алынған клинкер ары қарай одан мырышты бөліп алу мақсатында, кальций хлоридімен бірге жоғары температурада күйдіру процесіне бағытталады. Зертханалық тәжірибелер әдістемесі мен нәтижелері [15, 105–106 б.] жұмыста егжей тегжейлі баяндалған. Оңтайлы көрсеткіштерде кальций хлоридімен бірге жоғары температурада күйдіру процесінің материалдық балансы 4 кестеде келтірілген.

Кесте 4 – Процестің оңтайлы көрсеткіштерінде кальций хлоридімен бірге клинкерді жоғары температурада күйдірудің материалдық балансы: t=900 °C, τ=60 минут, $CaCl_2$ шығыны – мырышты хлорлауға стехиометриялық қажетті мөлшерінен 1,3 есе артық

Өнім атауы	Көлемі		Pb			Zn			Fe			Si		
	г	%	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Тиелді:														
Клинкер	100,00	47,73	0,13	0,13	100,0	49,77	49,77	100,0	20,09	20,09	100,0	3,61	3,61	100,0
$CaCl_2$	109,50	52,27												
Барлығы:	**209,50**	**100,0**	**0,134**		**100,0**	**49,77**		**100,0**	**20,09**		**100,0**	**3,61**		**100,0**
Алынды:														
Клинкер	88,63	42,3	0,1315	0,148	98,0	0,55	0,62	1,1	20,09	22,67	99,995	3,61	4,08	100,0
Возгондар	103,04	49,2	0,0027	0,003	2,0	49,22	47,77	98,9	0,001	0,001	0,005			
Газ, басқалар	17,83	8,5												
Барлығы:	**209,50**	**100,0**	**0,134**		**100,0**	**49,77**		**100,0**	**20,09**		**100,0**	**3,61**		**100,0**

Ca			Cl			O			Басқалары			Барлығы:
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Тиелді:												
						22,13	22,13	100,0	4,25	4,25	100,0	100,0
39,49	36,1	100,0	70,00	63,9	100,0							109,5
39,49		**100,0**	**70,00**		**100,0**	**22,13**		**100,0**	**4,25**		**100,0**	**209,5**
Алынды:												
39,49	44,56	99,99	16,29	18,38	23,3	6,34	7,15	28,6	2,13	2,40	50,0	88,6
0,006	0,006	0,02	53,69	52,11	76,7	0,04	0,04	0,2	0,07	0,07	1,7	103,0
			0,02	0,14	0,03	15,75	88,33	71,2	2,06	11,53	48,3	17,8
39,49		**100,0**	**70,00**		**100,0**	**22,13**		**100,00**	**4,25**		**100,0**	**209,5**

I – көлемі, г; II – мөлшері, %; III – бөлініп таралуы, %.

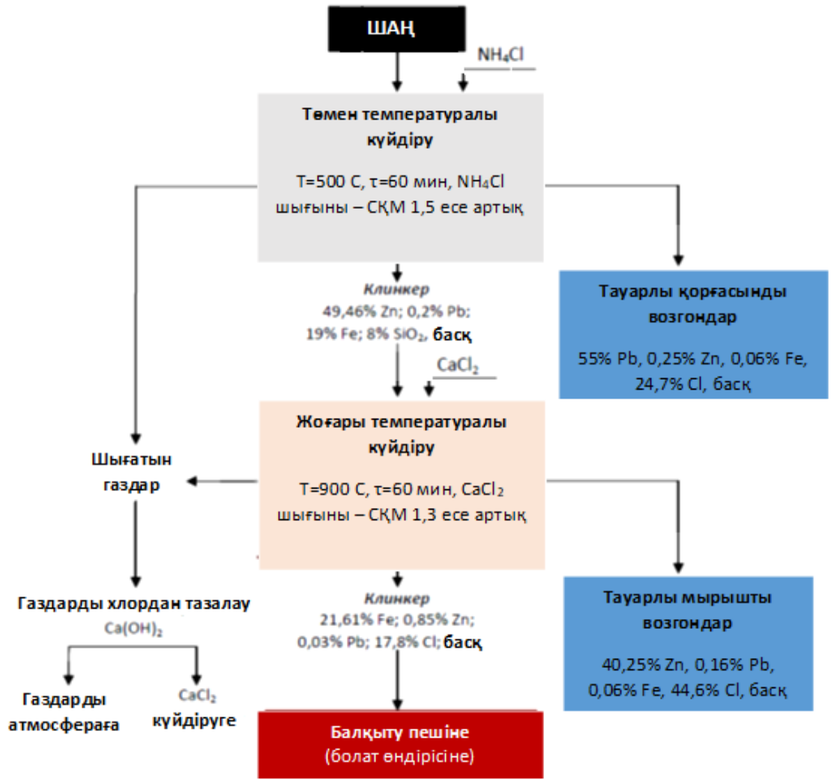
Шаңды екі сатыда хлорлап күйдіру шаңнан қорғасын мен мырышты возгондар түрінде бөліп алуға мүмкіндік береді, олар өзінің жоғары сапасы салдарынан танымал технологиялық сұлбалар бойынша тауарлы өнімдердің алынуына дейін жеңіл жеткізіледі.

Нәтижелер және талқылау

Электрлдоғалы пеште қара металл сыныктарын өңдеуден алынған, «Казферросталь» ЖШС (Алматы қ.) шаңдарын кешенді өңдеудің жұмыста жасалған комбинирленген хлорлау технологиясының жалпы тұжырымдамасы, екі сатыда өңдеу арқылы мақсатты өнімдерге темір, қорғасын мен мырышты селективті бөліп алуды қамтиды.

Жасалған технология бойынша алынатын жоғары сапалы қорғасын мен мырыш возгондары тауарлы өнімдер ретінде пайдаланылуы және ішкі нарықта өткізілуі, немесе, мәлім тәсілдермен (балқыту, электролиз) өңдеуден кейін, таза қорғасын мен мырыш алынуына дейін жеткізілуі мүмкін. Бұл кезде, ондағы қоспалардың минималды мөлшері төмен материалдық шығындармен ары қарай операцияларды жүргізуге мүмкіндік береді.

1-суретте шаң өңдеудің жалпы технологиялық сұлбасы келтірілген және жоғары сапалы тауарлы өнімдердің алынуын қамтамасыз ететін оңтайлы технологиялық көрсеткіштері көрсетілген.



1-сурет – Кешенді шаң өңдеу технологиясының сұлбасы

Салыстырмалы төмен температурада (450–550 °C) жүргізілетін бірінші хлорлау сатысы қорғасынды хлоридтер түрінде селективті бөліп алуға бағытталған. Тотықсыздандыру ортасы мен хлорлау агентін бақылап берудің пайдаланылуы қорғасын возгондарының жоғары дәрежесін қамтамасыз етеді, бұл кезде мырыш, темір мен өзге ілеспелі металдардың хлорлануы минимум болады. Алынған хлоридті возгондар конденсацияланады және ары қарай өңдеуге бағытталады.

Аса жоғары температураларда (850–900 °C) жүзеге асырылатын екінші сатысы, бірінші сатыдан кейін түзілетін клинкерден мырышты хлорлау мен бөліп алу үшін арналған. Клинкер екінші сатыдан кейін улы элементтер мөлшері минималды болатын материал болып келеді және экологиялық нормаларға сәйкес кәдеге жарауы мүмкін.

Осылайша, жасалған технология, электрдоғалы пештердің шаңдарын өңдеу үшін кешенд және тұрақты шешім ұсына отырып, «Казферросталь» ЖШС шаңдарынан бағалы металдарды бөліп қана қоймай, өндіріс қалдықтарынан болатын экологиялық жүктемені төмендетуге мүмкіндік береді. Электрдоғалы пеште металл сынықтарын өңдеуден алынған шаңдарды өңдеу бойынша жүргізілген зертханалық, үлкейтілген-зертханалық және технологиялық сынақтардың оң нәтижелерінің негізінде тәулігіне 10 т болатын меншікті өнімділігімен шаң өңдеу технологиясының экономикалық тиімділігін алдын ала есептеулері жүргізілді.

Есептеулер кезінде, төмен температуралық және жоғары температуралық күйдіру нәтижесінде алынған, тауарлы возгондардың құрамы жетекшілікке алынды, олар 5 кестеде келтірілген.

Кесте 5 – Төмен температурада күйдіруден алынған қорғасын возгондары және жоғары температурада күйдіруден алынған мырыш возгондарының химиялық құрамы

Элементтер	Мөлшері, % масс.	
	Қорғасын возгондары	Мырыш возгондары
Pb	74,25	0,005
Zn	0,005	47,39
Fe	0,001	0,001
O	0,06	0,04
Cl	25,41	51,7
Cu	0,001	0,002
Ca	0,02	0,08
K	0,02	0,02
Mg	0,01	0,005
Хлортотықтар	0,049	0,825

Мырыш возгондарының сапасын бағалау МЕСТ (ТШ): 4529-78 (кесте 6) сәйкес жүргізілді:

Кесте 6 – МЕСТ (ТШ): 4529-78 мырыш возгондары құрамы

Көрсеткіштер атауы	МЕСТ талаптары
Мырыш хлоридінің массалық үлесі ($ZnCl_2$), % кем емес	98
Тұз қышқылында ерімейтін заттардың массалық үлесі, % артық емес	0,01
Жалпы азоттың массалық үлесі (N), % артық емес	нормаланбайды
Сульфаттың массалық үлесі (SO_4),% артық емес	0,01
Темірдің массалық үлесі (Fe),% артық емес	0,001
Мыстың массалық үлесі (Cu),% артық емес	0,002
Қорғасынның массалық үлесі (Pb),% артық емес	0,005
Натрий, калий мен кальцийдің массалық үлесі (Na+K+Ca),% артық емес	0,1
Мырыш тотығына қайта есептегенде хлортотықтардың массалық үлесі, артық емес	1

Алынған қорғасын возгондарының сапасын бағалау МЕСТ (ТШ): 6-09-5383-88 (кесте 7) сәйкес жүргізілді:

Кесте 7 – МЕСТ (ТШ): 6-09-5383-88 қорғасын возгондары құрамы

Көрсеткіштер атауы	МЕСТ талаптары
Қорғасын (III) хлоридінің массалық үлесі, % кем емес	99
Суда ерімейтін заттардың массалық үлесі, % артық емес	0,05
Жалпы азоттың массалық үлесі (N), % артық емес	0,02
Сульфаттың массалық үлесі (SO_4),% артық емес	0,05
Темірдің массалық үлесі (Fe),% артық емес	0,001
Калий мен натрий қосындысының массалық үлесі (K+Na),% артық емес	0,002
Кальцийдің массалық үлесі (Ca),% артық емес	0,002
Магнийдің массалық үлесі (Mg),% артық емес	0,01

Экономикалық тиімділігін есептеу кезінде пайдаланылған бастапқы деректер:
Шаңда мырыш мөлшері 46,74 %;
Шаңда қорғасын мөлшері 5,48 %;
Тауарлы өнімге мырыштың жалпылама бөлінуі 98 %;
Тауарлы өнімге қорғасынның жалпылама бөлінуі 97 %;
09.06.25 ж. 1 т мырыш хлоридінің құны– 871,9 $;
09.06.25 ж. 1 т қорғасын хлоридінің құны – 33 906 $.
Шығынның ескерілуінсіз шаң өңдеуден түсетін пайда:

$$A_{Me} = ((G_{шаң} * Me_{баст}) * \varepsilon_{Me}) * B,$$

мұндағы: $G_{шаң}$ – шаң көлемі, т; $Me_{баст}$ – шаңда мырыш, қорғасын мөлшері, %; ε_{Me} – жалпылама бөлінуі, %; В – 1 т металл құны.

$$A_{Pb} = ((10*5,48)*97\%)*33906 = 17\,957,3\ \$.$$
$$A_{Zn} = ((10*46,74\%)*98\%)*871,9 = 3\,993,75\ \$,$$

Қорғасын мен мырыш хлоридін сатудан түсетін жалпы пайда:

$$A = A_{Pb} + A_{Zn} = 3\,993,75\ \$ + 17\,957,3\ \$ = 21\,951,05\ \$.$$

Өзіндік құнын есептеу

Тәжірибе деректері бойынша 1 т шаңды төмен температурада күйдіру үшін шығындалатын электрқуат мөлшері – 528 кВт құрайды; 1 т клинкерді жоғары температурада күйдіру үшін шығындалатын электрқуат мөлшері – 984 кВт:

Күйдіру мен балқытуға жұмсалатын электрқуаты шығынының есебі:

$$C_{төм.темп\ күйд} = B * G_{шаң}^{Pb} * D;$$
$$C_{жоғ.темп\ күйд} = B * G_{шаң}^{Zn} * D;$$

мұндағы: В – электрқуатының шығыны, кВт; $G_{шаң}^{Me}$ – мөлшері (Me - қорғасын, мырыш), т., D – 1 кВт электрқуатының құны – 0,061 $;

Сонда тәулігіне электрқуатының шығыны:

$$C_{төм.темп\ күйд} = 17,12\ \$,$$
$$C_{жоғ.темп\ күйд} = 264,85\ \$$$

Тәулігіне қорғасынды айдау үшін қажетті аммоний хлоридінің (NH4Cl) шығыны – 0,42 т;

$$E = F * G_{NH4Cl};$$

мұндағы: F – 1 т аммоний хлоридінің құны, 355,43 $; G_{NH4Cl} – NH4Cl – көлемі, т.

Сонда NH4Cl шығыны құрайды:

$$E = 149,28\ \$$$

Тәулігіне мырышты айдау үшін қажетті кальций хлоридінің ($CaCl_2$) шығыны – 10,28 т;

$$H = K * G_{CaCl2};$$

мұндағы: K – 1 т кальций хлоридінің құны, 925,89 $; – G_{CaCl2} – $CaCl_2$ мөлшері, т.

$CaCl_2$ шығыны:

$$H = 9\ 518,15\ \$$$

Сонда шығындар құрайды:

$$L = 9\ 667,43\ \$$$

Шығындарды ескере отырып, тәулігіне 10 тонна шаңды өңдеудің экономикалық тиімділігі:

$$M = A_{кіріс} - B_{шығыс};$$

$$C = 21\ 951,05 - 9\ 667,43 = 12\ 283,62\ \$$$

Осылайша, шаң өңдеуден түсетін жылдық экономикалық тиімділігі құрайды: 4 483 521,3 $ АҚШ.

Орнатылған экономикалық тиімділігіне, шаң құрамында кездесетін, мырыш пен қорғасын сияқты бағалы металдарды бөліп алу, сонымен қатар қауіпті қалдықтарды жою шығындарын қысқарту есебінен қол жеткізіледі. Технология,

қоршаған ортаға әсерін азайтатын және қатаң нормалар мен стандарттарға сәйкес келетін өңдеудің экологиялық қауіпсіз әдістерін пайдалануды болжап отыр.

Алынған нәтижелер, ұсынылып отырған технологияның жоғары рентабельділігін және оны өнеркәсіпте ендіру потенциалын көрсетеді. Технологиялық процесті ары қарай зерттеу және оңтайландыру шаң өңдеудің меншікті өнімділігін ұлғайтуға және экономикалық тиімдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Нарық жағдаятын талдаудың алдын ала нәтижелері экономикалық модельдің тұрақтылығын қамтамасыз ететін, бөлініп алынатын металдарға тұрақты сұранысты көрсетеді. Зертханалық деңгейде алынған, нәтижелерді растау мақсатында өнеркәсіптік шарттарда сынамалы тәжірибелерді жүргізу және технологияны эксплуатациялаудың шынайы шарттарына бейімдеу жоспарлануда.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің 2023–2025 жылдарға арналған «Су ресурстарын, жануарлар мен өсімдіктер дүниесін ұтымды пайдалану, экология» басым бағыты бойынша гранттық қаржыландыру шеңберінде AP19679572 «Тауарлық өнімдерді ала отырып болат балқыту өндірістерінің мырыш шаңын кәдеге жаратудың жаңа технологиясын әзірлеу» жобасында жүргізілді.

Қорытынды

Жоғары сапалы мақсатты тауарлы өнімдерге темір, қорғасын мен мырышты кешенді бөліп алуға бағытталған, жұмыста жасалған экологиялық таза, қалдықсыз комбинирленген технологиясы, оның жоғары дәрежеде коммерцияландырылуын көрсетеді. Технологияның ары қарай дамуы мен ендірілуі қара және түсті металлургияның қорғасын-, мырышқұрамды шаңдарының жиналуын алдын алуға әсер ететін болады, бұл қосымша шикізат көзінің өңдеуге енгізілуі есебінен кәсіпорындардың технологиялық күйін біршама жақсартады және қоршаған ортаның күйін ауқымды арттырады. Технологияның пайдаланылуы, жаңа жұмыс орындарын құра отырып, қосымша өндірістің ұйымдастырылуынан тұратын ауқымды әлеуметтік мәнге ие болады.

Кейінгі жүргізілетін зерттеулердің келешегі, қара және түсті металлургияның майда шаңдарының жинақталу мәселесін ары қарай талдауына, және жұмыста ұсынылып отырған технологияны жатқызуға болатын «жасыл технология» негізінде оларды тиімді шешу жолдарын табуға байланысты.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Досмухамедов, Н. К., Меркулова, В. П.** Концептуальные проблемы горно-металлургического комплекса (часть 2): Утилизация промышленных отходов // Горный журнал Казахстана. – 2010. – № 2 (58). – С. 33–39.

2 **Каренов, Р. С.** Эколого-экономические проблемы деятельности предприятий горно-металлургического комплекса Республики Казахстан // Вестник КарГУ. – 2014. – № 1. – С. 58–65.

3 **Adno, Y.** Mining and Metallurgical Complex of Kazakhstan: Problems and Prospects of Development // Russia and New States of Eurasia. – 2021. – № II (LI). – P. 99–114. – https://doi.org/10.20542/2073-4786-2021-2-99-114.

4 **Большина, Е. П.** Экология металлургического производства / Е. П. Большина // Курс лекций. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС». – 2012. – 155 с.

5 **Доронин, И. Е.** Свойства и механизм образования пыли в сталеплавильном производстве // Металлург. – 2011. – № 12. – С. 37–43.

6 **Свяжин, А. Г.** Механизм образования пыли при производстве стали // Сталь. – 1999. – № 12. – С. 78–81.

7 **Guézennec, A. G., Huber, J. Ch., Patisson, F. et al.** Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles // Powder Technology. – 2005. – Vol. 157. – P. 2–11.

8 **Sammut, M. L., Rose, J., Fiani, E.** Determination of zinc speciation in basic oxygen furnace flying dust by chemical extractions and X-ray spectroscopy // Chemosphere. – 2008. – Vol. 70. – P. 1945–1951.

9 **Симонян, Л. М.** Утилизация пыли сталеплавильных печей с продувкой расплава // Экология и промышленность России. – 2011. – С. 4–7.

10 **Топоркова, Ю. И., Блудова, Д., Мамяченков, С. В., Анисимова, О. С.** Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки // iPolytech Journal. – 2021. – Т. 25, № 5. – С. 643–680.

11 **Патрушов, А. Е., Немчинова, Н. В., Черных, В. Е., Тютрин, А. А.** Современные методы переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 4. – С. 183–190.

12 **Черноусов, П. И.** Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии: монография. М. : ИД «МИСиС». – 2011. – 428 с.

13 **Попов А. А.** К вопросу проблемы утилизации цинксодержащей пыли сталеплавильных производств // Науковедение. – 2015. – № 7. – С. 1–10.

14 **Koishina, G.M., Zholdasbay, E.E., Argyn, A.A., Icheva, Yu.B., Kurmanseitov, M.B., Dosmukhamedov, N.K.** Iron extraction from dust from scrap metal smelting in electric arc furnaces by magnetic separation // Metallurgist. – 2024. – Vol. 7. – P. 1–7.

15. Dosmukhamedov, N.K., Koishina, G.M., Zholdasbay, E.E., Kurmanseitov, M.B. Lead extraction in low-temperature dust roasting during metal scrap melting in electric arc furnace together with ammonium chloride // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 28. – P. 104–109.

REFERENCES

1 **Dosmukhamedov, N. K., Merkulova, V. P.** Konceptual`ny`e problemy` gorno-metallurgicheskogo kompleksa (chast` 2): Utilizaciya promy`shlenny`x otxodov [Conceptual problems of the mining and metallurgical complex (Part 2): Industrial waste management] // Gorny`j zhurnal Kazaxstana. – 2010. – Vol. 2 (58). – P. 33–39.

2 **Karenov, R. S.** E`kologo-e`konomicheskie problemy` deyatel`nosti predpriyatij gorno-metallurgicheskogo kompleksa Respubliki Kazaxstan [Ecological and economic problems of the activities of enterprises of the mining and metallurgical complex of the Republic of Kazakhstan] // Vestnik KarGU. – 2014. – Vol. 1. – P. 58–65.

3 **Adno, Y.** Mining and Metallurgical Complex of Kazakhstan: Problems and Prospects of Development // Russia and New States of Eurasia. – 2021. – № II (LI). – P. 99–114. – https://doi.org/10.20542/2073-4786-2021-2-99-114.

4 **Bol`shina, E. P.** E`kologiya metallurgicheskogo proizvodstva / E.P. Bol`shina [Ecology of metallurgical production / E.P. Bolshina] // Kurs lekcij. – Novotroiczk : NF NITU «MISiS». – 2012. – 155 p.

5 **Doronin, I. E.** Svojstva i mexanizm obrazovaniya py`li v staleplavil`nom proizvodstve [Properties and mechanism of dust formation in steelmaking] // Metallurg. – 2011. – Vol. 12. – P. 37–43.

6 **Svyazhin, A. G.** Mexanizm obrazovaniya py`li pri proizvodstve stali [The mechanism of dust formation in steel production] // Stal`. – 1999. – Vol. 12. – P. 78–81.

7 **Guézennec, A. G., Huber, J. Ch., Patisson, F. et al.** Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles // Powder Technology. – 2005. – Vol. 157. – P. 2–11.

8 **Sammut, M.L., Rose, J., Fiani, E.** Determination of zinc speciation in basic oxygen furnace flying dust by chemical extractions and X-ray spectroscopy // Chemosphere. – 2008. – Vol. 70. – P. 1945–1951.

9 **Simonyan, L. M.** Utilizaciya py`li staleplavil`ny`x pechej s produvkoj rasplava [Disposal of dust from steelmaking furnaces with melt purging] // E`kologiya i promy`shlennost` Rossii. – 2011. – P. 4–7.

10 **Toporkova, Yu. I., Bludova, D., Mamyachenkov, S. V., Anisimova, O. S.** Obzor metodov pererabotki py`lej e`lektrodugovoj plavki [Overview of methods for processing electric arc melting dusts] // iPolytech Journal. – 2021. – Vol. 25. – № 5. – P. 643–680.

11 **Patrushov, A.E., Nemchinova, N.V., Cherny`x, V.E., Tyutrin, A.A.** Sovremenny`e metody` pererabotki texnogennogo sy`r`ya e`lektrostaleplavil`nogo proizvodstva [Modern methods of processing man-made raw materials of electric steelmaking] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. – 2018. – Vol. 22. – № 4. – P. 183–190.

12 **Chernousov, P. I.** Recikling. Texnologii pererabotki i utilizacii texnogenny`x obrazovanij i otxodov v chernoj metallurgii: monografiya [Recycling. Technologies of processing and utilization of man-made formations and waste in ferrous metallurgy : monograph] // M. : ID «MISiS». – 2011. – 428 p.

13 **Popov, A. A.** K voprosu problemy` utilizacii cinksoderzhashhej py`li staleplavil`ny`x proizvodstv [On the issue of the problem of disposal of zinc-containing dust from steelmaking plants] // Science. – 2015. – № 7. – P. 1–10.

14 **Koishina, G. M., Zholdasbay, E. E., Argyn, A. A., Icheva, Yu. B., Kurmanseitov, M. B., Dosmukhamedov, N. K.** Iron extraction from dust from scrap metal smelting in electric arc furnaces by magnetic separation // Metallurgist. – 2024. – Vol. 7. – P. 1–7.

15 **Dosmukhamedov, N. K., Koishina, G. M., Zholdasbay, E. E., Kurmanseitov, M. B.** Lead extraction in low-temperature dust roasting during metal scrap melting in electric arc furnace together with ammonium chloride // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 28. – P. 104–109.

13.06.25 ж. баспаға түсті.
02.17.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Г. М. Койшина[1], Е. Е. Жолдасбай[2], И. Н. Нурсаинов[3], Ю. Б. Ичева[4], *Н. К. Досмухамедов[5]
[1,3,5]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2,4]Жезказганский университет имени О. А. Байконурова,
Республика Казахстан, г. Жезказган.
Поступило в редакцию 13.06.25.
Поступило с исправлениями 02.17.25.
Принято в печать 19.08.25.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХЛОРИРУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

В работе на основании результатов, ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований сформулирована общая концепция хлорирующей технологии для комплексной переработки свинец-, цинксодержащей пыли и разработана технологическая схема и проведена оценка экономической эффективности технологии. Согласно технологии, предварительно путем магнитной сепарации осуществляется выделение магнитной фракции из пыли с получением железосодержащего продукта с высоким содержанием (~70 %) железа. Немагнитная фракция пыли, полученная после магнитной сепарации с большим содержанием цинка и свинца, на первой стадии подвергается низкотемпературному спеканию (450–500 ° С) совместно с хлоридом аммония с получением товарных свинцовых возгонов и клинкера, с концентрацией в нем цинка. На второй стадии путем высокотемпературного спекания (850–900 °С) клинкера совместно с хлоридом кальция осуществляется высокое до 98 % извлечение цинка в возгоны с получением товарной продукции с высоким содержанием цинка (47,7 % Zn).

На основании положительных результатов разработанной технологии по утилизации пылей черной металлургии с получением товарных продуктов проведены расчеты экономической эффективности. По предварительной оценке, при удельной производительности переработки пыли 10 т/сутки, годовая экономическая эффективность составила 4 483 521,3 $ США в год.

Ключевые слова: пыль, свинец, цинк, низкотемпературное спекание, высокотемпературное спекание, возгоны, извлечение, экономическая эффективность.

G. M. Koishina[1], E. E. Zholdasbay[2], I. N. Nursainov[3], Yu. B. Icheva[4], *N. K. Dosmukhamedov[5]
[1,3,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2,4]Zhezkazgan University named after O. A. Baikonurov,
Republic of Kazakhstan, Zhezkazgan.
Received 13.06.25.
Received in revised form 02.07.25.
Accepted for publication 19.08.25.

ASSESSMENT OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF CHLORINATING TECHNOLOGY FOR PROCESSING FERROUS METALLURGY DUST

The paper presents a general concept of a chlorination technology for the integrated processing of lead- and zinc-containing dust based on the results of previous theoretical and experimental studies. A technological scheme has been developed, and an economic efficiency assessment of the technology has been conducted. According to the technology, magnetic separation is first used to isolate the magnetic fraction from the dust, resulting in an iron-containing product with a high iron content (~ 70%). The non-magnetic fraction of the dust, obtained after magnetic separation and containing high levels of zinc and lead, undergoes low-temperature sintering (450–500°C) in the first stage, along with ammonium chloride, to produce lead distillates and clinker, which has a high concentration of zinc. In the second stage, high-temperature sintering (850–900 °C) of the clinker with calcium chloride allows for the extraction of up to 98 % of zinc into the distillates, resulting in a final product with a high zinc content (47.7 % Zn).

Based on the positive results of the developed technology for the disposal of dust from ferrous metallurgy with the production of marketable products, calculations of economic efficiency have been carried out. According to preliminary estimates, with a specific processing capacity of 10 tons per day, the annual economic efficiency amounted to $4,483,521.30 per year

Keywords: Dust, lead, zinc, low-temperature sintering, high-temperature sintering, distillates, extraction, economic efficiency.

SRSTI 53.37.29

https://doi.org/10.48081/INET8577

***A. B. Kuandykov**[1]

[1]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6075-1603

*e-mail: azeka200892@mail.ru

REFINING OF PRIMARY ALUMINUM FROM VANADIUM

The paper investigates the technology of refining primary aluminum from vanadium impurities, based on flux treatment with boron-containing fluxes.

In the Pavlodar region of the Republic of Kazakhstan, on the basis of local enterprises, the production of primary aluminum and products based on local raw materials is developing.

The main problem in the production of primary aluminum on the basis of JSC «Kazakhstan Electrolysis Plant» is the presence of undesirable vanadium impurities, which pass into metal during electrolysis from baked anodes based on calcined coke (vanadium content up to 800 ppm) of the local enterprise LLP UPNK-PV (Pavlodar, Kazakhstan).

The authors investigated the process of ladle refining of aluminum from vanadium using the Al-B (3 % B) alloy.

Laboratory and industrial tests have shown a decrease in the vanadium content by an average of 78 % in the bulk of the metal, with an increase in its content in volume up to 5–10 % of the ladle capacity. It was found that mixing leads to a certain averaging of the vanadium content in the ladle volume.

Keywords: aluminum, metallic impurities, refining, vanadium, flux.

Introduction

The Pavlodar region of Kazakhstan is emerging as a significant hub for primary aluminum production, with its industrial core comprising JSC «Aluminum of Kazakhstan» and JSC «Kazakhstan Electrolysis Plant». The expansion of this cluster is bolstered by a network of local manufacturers supplying essential downstream products, including aluminum wire rod, alloyed aluminum, and cast wheel rims. A critical raw material for the electrolysis process, calcined petroleum coke, is sourced domestically from suppliers such as LLP UPNK-PV.

A principal challenge in this production chain is ensuring metal purity, specifically concerning the removal of deleterious impurities. The refinement of aluminum and its alloys remains a persistent focus of global metallurgical research, driven by increasingly stringent performance requirements for finished goods. Aluminum melts inherently contain a range of impurities – including hydrogen, alkali metals (Na, Li, Ca), and non-metallic inclusions (oxides, carbides) – which detrimentally influence the material's physical and chemical properties.

A prominent issue at JSC «Kazakhstan Electrolysis Plant» is vanadium contamination in primary aluminum. Vanadium is introduced into the molten metal during electrolysis

via baked anodes, which are manufactured using local calcined coke from LLP UPNK-PV. This coke contains vanadium concentrations as high as 800 ppm. The resulting metal often fails to comply with the GOST 11069-2001 standard, which mandates a vanadium content below 0.02 wt.%. This impurity problem consequently restricts the utilization of domestic raw materials in anode production, despite their strategic availability.

A promising metallurgical approach to mitigate this issue involves the application of boron-containing fluxes or master alloys to sequester vanadium into stable intermetallic compounds, facilitating its removal from the melt. Industrial-scale trials have evaluated several methodologies:

Direct addition of H_3BO_3 to electrolytic cells: While this method demonstrated effective refining, it resulted in accelerated degradation of the cell bottom lining.

Introduction of boron-based flux into casting molds: This technique yielded only a marginal reduction in vanadium concentration (4–6 ppm).

Incorporation of boron into the anode paste prior to baking: This approach likewise failed to achieve a significant decrease in the vanadium content of the final product.

In conclusion, the development of an effective and industrially viable method for vanadium removal is a critical scientific and technical imperative for the advancement and sustainable growth of the aluminum production cluster in Kazakhstan.

Materials and methods

Primary aluminum production in Kazakhstan is concentrated at JSC «Kazakhstan Electrolysis Plant» (JSC KEP). The facility's integrated operations encompass an aluminum electrolysis shop with an inline casting department, an anode production plant, and auxiliary divisions [7]. With an annual output exceeding 250,000 tons, the plant manufactures primary aluminum of grades A7, A8, and A85 (Table 1).

Table 1 – Aluminum grades according to GOST 11069-2001

Grade	Impurity,[%], no more									Al,[%], not less
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ga	Ti	Other impurities (each separately)	
A85	0.06	0.08	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.008	0.02	99.85
A8	0.10	0.12	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.02	99.80
A7	0.15	0.16	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03	0.01	0.02	99.70
A7E	0.08	0.20	0.01	-	0.02	0.04	0.03	0.01	0.02	99.70

The core electrolysis process at JSC KEP is based on GP-320 cell technology, which was developed by the Chinese institute GAMI. The potline infrastructure comprises two parallel buildings, each approximately one kilometer in length, housing 288 electrolytic cells configured in a series electrical circuit. These cells operate at a nominal amperage of 320–330 kA [7].

Anode manufacturing is conducted in a dedicated complex, which is systematically organized into four primary sections: a green anode preparation unit, an anode storage warehouse, a baking furnace, and an assembly zone for finished anodes [7].

The molten aluminum produced by electrolysis is transferred to the casting department, where it is processed into standardized 20-kilogram ingots.

Key material consumption metrics for the plant's operations are summarized in Table 2.

Table 2 – Approximate consumption of raw materials [8]

Material	Specific consumption, [kg / t]	Annual consumption, [tons / year]
Alumina	1930	482 500
Petroleum coke	0.365	91 250
Liquid coke	0.0964	24100
Aluminum fluoride	22	5500
Cryolite	1	250

For aluminum refining, fluxes of the following compositions are used [9]:

– 50 % cryolite + 50 % sodium chloride;
– 50 % cryolite + 50 % aluminum fluoride;
– 23 % cryolite + 30 % sodium chloride + 47 % potassium chloride;
– 23 % cryolite + 47 % sodium chloride + 30 % potassium chloride;
– carnalite flux.

The total consumption of flux is 1–2 kg per 1 ton of aluminum. Raw materials used for fluxes are supplied according to the following requirements [7]:

– cryolite in accordance with GOST 10561;
– aluminum fluoride according to GOST 19181;
– sodium chloride according to GOST 13830 and GOST 11314;
– potassium chloride according to GOST 4568;
– glass mesh (filter) SSF-Z, SSF-4.

The experience of using these fluxes shows the impossibility of removing vanadium from

primary aluminum.

The authors carried out studies on ladle refining of raw aluminum. The chemical composition of raw aluminum is presented in table 3.

Table 3 – Chemical composition of raw aluminum

Al, [%]	Si, [%]	Fe, [%]	Cu, [%]	Mn, [%]	Mg, [%]	Zn, [%]	Cr, [%]	Ti, [%]	V, [%]
98.53	0.117	1.1545	0.0186	0.0079	0.0260	0.0879	0.002	0.017	0.033

The initial phase of the investigation involved laboratory-scale refining trials conducted in the Metallurgy Laboratory of Toraighyrov University. The experimental procedure was as follows: raw aluminum was remelted in a GW-MF-25 induction

crucible furnace. Upon reaching a temperature of 850 °C, an Al–B master alloy was introduced into the melt at a dosage of 1.2–2 kg per ton of aluminum. Following a 10–20 minute holding period within the induction furnace to ensure homogenization, the melt was transferred to a ladle preheated to 750 °C.

This ladle was subsequently placed in a muffle furnace and maintained at 750 °C for 30 minutes. This dwell time was allocated to facilitate the gravitational settling of the newly formed vanadium-bearing intermetallic compounds. After the settling period, the aluminum was cast sequentially into three separate ladles to obtain representative samples from the beginning, middle, and end of the cast for subsequent vanadium analysis. The entire experimental sequence was performed in triplicate to ensure statistical reliability.

Microstructural characterization of the aluminum samples, both before and after treatment with the Al–B master alloy, was performed using a Metam-32 metallographic microscope. The unrefined aluminum microstructure exhibited distinct VAl_3 intermetallic inclusions (Figure 1a). In contrast, the refined sample's microstructure revealed the presence of VB_2 (Figure 1b) and AlB (Figure 1c) phases, alongside residual VAl_3 particles, confirming the reaction of boron with vanadium.

In the second phase, collaborative pilot-scale trials were undertaken with JSC «Kazakhstan Electrolysis Plant» to assess the process efficacy on an industrial scale. The objective was to reduce the vanadium content from an initial concentration of 0.0210 wt.% in raw aluminum.

The pilot test protocol was designed to integrate with the existing production flow:

A 7.2-ton capacity vacuum ladle was pre-charged with the Al–B master alloy at the specified dosage rate of 1.2–2 kg per ton of aluminum.

The prepared ladle was then transported to the electrolysis building and filled directly with molten aluminum tapped from the operating electrolytic cells.

The filled ladle was moved to the foundry, where the metal was allowed to settle for a period of 1 to 4 hours. This extended settling time was implemented to maximize the separation and sedimentation of the denser vanadium intermetallic compounds from the bulk aluminum melt [9, 10].

Following the settling process, the refined metal was decanted into a mixer for subsequent casting operations.

a) VAl_3 (×200 μm) b) VB_2 (×200 μm) c) AlB (×200 μm)

Figure 1 – Microstructure of raw aluminum before and after refining

Results and discussion

Economic and strategic analysis indicates that a full transition to calcined coke from LLP UPNK-PV for anode production at JSC «Kazakhstan Electrolysis Plant» would double the annual supply of domestic coke from 51.875 thousand tons to 103.750 thousand tons. This shift would significantly enhance the localization of the aluminum production value chain in Kazakhstan. However, this strategic imperative is contingent upon the development of a reliable method for mitigating the associated vanadium impurity.

To address this, the authors investigated a refining process employing an Al–B (3 % B) master alloy, introduced ex situ into a vacuum ladle. The results from both laboratory and pilot-scale trials confirm the efficacy of this method, demonstrating an average vanadium reduction of 78 % in the primary melt. A critical finding of this study is the pronounced segregation behavior of the resulting vanadium-bearing intermetallics. These compounds exhibit a strong tendency to settle, leading to a significant concentration of vanadium in the bottom 5–10 % of the ladle. Conversely, it was observed that agitation of the melt counteracts this effect, resulting in a more uniform, albeit higher overall, distribution of vanadium.

Data presented in Tables 4 and 5 substantiate that the treatment with the Al–B master alloy effectively sequesters approximately 78 % of the vanadium into insoluble intermetallic phases, facilitating their physical separation from the molten aluminum. The sedimentation of these dense particles during the casting process accounts for the gradient in vanadium concentration, with the highest levels detected in the final fractions of metal to be poured. While mechanical stirring homogenizes the vanadium distribution temporarily, the terminal portions of the melt transferred to the mixer consistently retain elevated impurity levels, as the settling process recommences during subsequent quiescent periods.

Financing information

This publication was prepared within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for the Zhas Galym competition under the IRN project AP19175493 «Development of a technology for refining primary aluminum using filters with an active surface».

Conclusions

1) A ladle-based refining methodology utilizing an Al–B master alloy was developed and validated, proving effective for the removal of vanadium from primary aluminum, with an average extraction efficiency of 78 %.

2) The process is characterized by the gravitational settling of vanadium-rich intermetallic compounds, which accumulate in the bottom of the treatment ladle. This phenomenon results in a substantially elevated vanadium concentration in the final 5–10 % of the cast metal.

3) While melt agitation promotes a homogeneous distribution of vanadium, it does not prevent the subsequent settling of intermetallics. Consequently, even with stirring,

the last fractions of metal discharged into the mixer exhibit persistently high impurity levels, necessitating their separate handling or re-processing.

REFERENCES

1 **Vives, C.** Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part I. Working principle and metallurgical results, Metallurgical Transactions B, 1989. – № 20. – P. 623–629.

2 **Gorlanov, E. S., Batrachenko, A. A., Smailov, B. S., Morozov, A. Y.** Role of vanadium in aluminum electrolyzer melts, Metallurgist. 2019. – Vol. 62. – № 9–10. – P. 1048–1053.

3 **Gorlanov, E. S., Batrachenko, A. A., Smailov, B. S., Skvortsov, A. P.** Testing baked anodes with an increased vanadium content, Metallurgist. – 2018. – Vol. 62. – № 1–2. – P. 62–69.

4 **Khaliq, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G. A., Grandfield, J. F.** Removal of vanadium from molten aluminum-part I, Metallurgical and Materials Transactions. – 2014. – P. 752–768.

5 **Khaliq, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G. A., Grandfield, J. F.** Removal of vanadium from molten aluminum-part II. Kinetic analysis and mechanism of VB2 formation, Metallurgical and Materials Transactions. 2014. – P. 769–783.

6 **Kuandykov A. B., Bakirov A. G., Zhunusov A. K., Bykov P. O.** Granular filters from Ekibastuz coal ash for refining primary aluminum // Science and Technology of Kazakhstan, 2022, № 4. – P. 80–90.

7 **Ibragimov, A. T., Pack, R. V.** Aluminum Electrometallurgy, Kazakhstan Electrolysis Plant, Dom Pechati, Pavlodar, 2009. – 326 p.

8 **Li, Q., Chen, Q.** Experimental investigation and thermodynamic calculation of the Al-rich corner in the ternary Al-Ti-V system // Materials & Design, 2017. – P. 339–347.

9 **Zhang, H., Lin, J., Liang, Y., Xu, S., Xu, Y., Shang, S. L., Liu, Z. K.** Phase equilibria of Ti–Al–V system at 1300 °C // Intermetallics, 2019. – P. 10669.

10 **Wang J., Rong M. H., Tang C. Y., Rao G. H., Zhou H. Y.** Development of thermodynamic database of Ti-V-based hydrogen storage alloys // Materials Science Forum, 2013. – P. 577–582.

REFERENCES

1 **Vives, C.** Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part I. Working principle and metallurgical results, Metallurgical Transactions B, 1989. – № 20. – P. 623–629.

2 **Gorlanov, E. S., Batrachenko, A. A., Smailov, B. S., Morozov, A. Y.** Role of vanadium in aluminum electrolyzer melts, Metallurgist. 2019. – Vol. 62. – № 9–10. – P. 1048–1053.

3 **Gorlanov, E. S., Batrachenko, A. A., Smailov, B. S., Skvortsov, A. P.** Testing baked anodes with an increased vanadium content, Metallurgist. – 2018. – Vol. 62. – № 1–2. – P. 62–69.

4 **Khaliq, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G. A., Grandfield, J. F.** Removal of vanadium from molten aluminum-part I, Metallurgical and Materials Transactions. – 2014. – P. 752–768.

5 **Khaliq, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G. A., Grandfield, J. F.** Removal of vanadium from molten aluminum-part II. Kinetic analysis and mechanism of VB2 formation, Metallurgical and Materials Transactions. 2014. – P. 769–783.

6 **Kuandykov A. B., Bakirov A. G., Zhunusov A. K., Bykov P. O.** Granular filters from Ekibastuz coal ash for refining primary aluminum // Science and Technology of Kazakhstan, 2022, № 4. – P. 80–90.

7 **Ibragimov, A. T., Pack, R. V.** Aluminum Electrometallurgy, Kazakhstan Electrolysis Plant, Dom Pechati, Pavlodar, 2009. – 326 p.

8 **Li, Q., Chen, Q.** Experimental investigation and thermodynamic calculation of the Al-rich corner in the ternary Al-Ti-V system // Materials & Design, 2017. – P. 339–347.

9 **Zhang, H., Lin, J., Liang, Y., Xu, S., Xu, Y., Shang, S. L., Liu, Z. K.** Phase equilibria of Ti–Al–V system at 1300 °C // Intermetallics, 2019. – P. 10669.

10 **Wang J., Rong M. H., Tang C. Y., Rao G. H., Zhou H. Y.** Development of thermodynamic database of Ti-V-based hydrogen storage alloys // Materials Science Forum, 2013. – P. 577–582.

Received 11.11.25.
Received in revised form 18.11.25.
Accepted for publication 24.11.25.

***А. Б. Куандыков**[1]
Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
11.11.25 ж. баспаға түсті.
18.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
24.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ВАНАДИЙДЕН БАСТАПҚЫ АЛЮМИНИЙДІ ТАЗАРТУ

Мақалада құрамында бор бар ағындармен ағынмен өңдеуге негізделген бастапқы алюминийді ванадий қоспаларынан тазарту технологиясы зерттелген.

Қазақстан Республикасының Павлодар облысында жергілікті кәсіпорындар базасында бастапқы алюминий және жергілікті шикізаттан жасалған өнімдер өндірісі дамуда.

«Қазақстандық электролиз зауыты» АҚ базасында бастапқы алюминий өндірісіндегі негізгі проблема «УПНК-ПВ» ЖШС жергілікті кәсіпорнының (Павлодар қ., Қазақстан) күйдірілген кокс негізінде күйдірілген анодтардан электролиз кезінде металға ауысатын қажетсіз ванадий қоспаларының болуы (ванадий мөлшері 800 ppm дейін) болып табылады.

Авторлар al-B (3% B) қорытпасын қолдана отырып, ванадийден алюминийді шөмішпен тазарту процесін зерттеді.

Зертханалық және өнеркәсіптік сынақтар ванадий құрамының Шелек көлемінен 5–10 %-ға дейін ұлғаюымен металл көлемінде орта есеппен 78 %-ға төмендегенін көрсетті. Араластыру Шелек көлеміндегі ванадийдің орташа мөлшеріне әкелетіні анықталды.

Кілтті сөздер: алюминий, металл қоспалары, тазарту, ванадий, ағын.

***А. Б. Куандыков**[1]
Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
Поступило в редакцию 11.11.25.
Поступило с исправлениями 18.11.25.
Принято в печать 24.11.25.

РАФИНИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО АЛЮМИНИЯ ОТ ВАНАДИЯ

В статье исследована технология очистки первичного алюминия от примесей ванадия, основанная на флюсовой обработке борсодержащими флюсами.

В Павлодарской области Республики Казахстан на базе местных предприятий развивается производство первичного алюминия и продукции из местного сырья.

Основной проблемой при производстве первичного алюминия на базе АО «Казахстанский электролизный завод» является наличие нежелательных примесей ванадия, которые переходят в металл при электролизе из обожженных анодов на основе прокаленного кокса (содержание ванадия до 800 ppm) местного предприятия ТОО «УПНК-ПВ» (г. Павлодар, Казахстан).

Авторами исследован процесс ковшевого рафинирования алюминия от ванадия с использованием сплава Al-B (3 % B).

Лабораторные и промышленные испытания показали снижение содержания ванадия в среднем на 78 % в объеме металла при увеличении его содержания в объеме до 5–10 % от объема ковша. Установлено, что перемешивание приводит к некоторому усреднению содержания ванадия в объеме ковша.

Ключевые слова: алюминий, металлические примеси, рафинирование, ванадий, флюс.

SRSTI 53.37.35

https://doi.org/10.48081/NFBN7376

V. Yu. Kulikov[1], *Y. A. Baiseitova[2], T. V. Kovaleva[3], Sh. N. Tulegenova[4]

[1,2,3,4]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6191-8569
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8412-6627
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1186-1805
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0750-1233
*e-mail: aglanovna@mail.ru

ANALYSIS OF SAMPLES PRODUCED BY MELTING USING BRIQUETTES MADE FROM SHH15 METAL TURNINGS

The problem of secondary processing of fine industrial waste remains a pressing issue for many metallurgical enterprises due to its impact on production efficiency and the environmental situation in the surrounding area. This is especially relevant for foundries, where coarse scrap, such as defective castings and sprues, is reused directly, while fine-grained waste from mechanical processing is typically discarded. A significant proportion of such waste is formed during the machining of high-carbon chromium steel ShH15, widely used in the manufacture of bearing parts. The operations of grinding, turning, and polishing result in the formation of fine powder-like particles that are difficult to recycle due to oxidation and contamination with lubricants and cooling fluids. An effective way to utilize this material is through the cold briquetting method, which consists of mixing the steel dust with binders and compacting it under pressure into briquettes suitable for melting in induction or arc furnaces. This approach not only reduces the volume of waste sent to landfills but also returns valuable alloying components to the production cycle, improving resource efficiency. Additionally, briquetting helps reduce the environmental burden and contributes to the development of closed-loop metallurgical technologies. When properly formulated, the resulting briquettes exhibit sufficient strength, low porosity, and compatibility with melting processes. Optimized compositions allow the use of briquettes as cost-effective charge material, promoting sustainable steel production practices [1;2;3].

Keywords: cold briquetting, bearing steel waste, mechanical processing, microstructure, resource recovery, porosity, strength characteristics, sustainable metallurgy.

Introduction

The optimization of energy consumption and forming effort in the compaction of ferrous metal shavings remains a critical task when choosing equipment and technology for cold briquetting [1;2]. Prior works highlight the advantage of using molds with movable matrices, which reduce frictional resistance, minimize tool wear, and improve the final product's integrity [3; 4]. In contrast, much of the available research into

pressing steel and cast iron chips has been conducted using dies with fixed matrices, where higher wall friction significantly increases force demand and leads to rapid wear of tooling components.

The primary objective of this research is to analyze how both design factors and operating parameters of the cold pressing process affect energy characteristics during the densification of ShH15 steel powder waste [5;6;7]. The study also seeks to improve compaction parameters and refine mold configuration, thus extending die life and enhancing the technological viability of recycling steel waste originating from machining processes [8].

Materials and methods

Based on a series of preliminary experimental trials, it was established that the most effective briquette composition consists of 85 % steel grinding waste derived from ShH15 steel, 5 % sodium silicate (liquid glass), and 10 % bentonite clay. This formulation demonstrated optimal results in terms of structural integrity and ease of molding [9].

The pressing parameters that yielded the best outcomes included pre-drying at a temperature of 80 °C for a duration of 90 minutes, followed by compression at a force of 60 kN. Under these conditions, the resulting briquettes achieved a compressive strength threshold of approximately 589 MPa, indicating their suitability for further use in metallurgical processes [10].

The elemental analysis of the base steel and the briquetted samples is detailed in Table 1, highlighting the consistency of chemical composition before and after processing.

Table 1 – The elemental composition of steel and briquettes made from waste materials.

Elements	**C**	**Cr**	**Si**	**Mn**	**Ni**	**S**	**P**	**Fe**
Content in steel, %	0,95…1,05	1,3…1,6	0,17…0,37	0,2…0,4	≤ 0,3	≤ 0,02	≤ 0,027	Ост.
Content in briquette, %	1,06	1,42	0,31	0,21	0,10	0,01	0,02	96,90

Experimental work was conducted in the laboratories of the International Center for Materials Science at NPJSC «Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov». Test specimens were obtained by melting briquetted powder derived from ShH15 steel machining waste (see Figure 1).

In addition to laboratory studies, pilot-scale testing of the developed technology was carried out at LLP «KMZ named after Parkhomenko» (Republic of Kazakhstan). Within the framework of these trials, steel grade 40Kh was melted with the addition of briquettes produced from fine ShKh15 chips into the charge. This stage made it possible to assess the technological applicability and industrial efficiency of the proposed approach, as

well as to confirm the feasibility of using briquettes in the foundry charge without deterioration of the quality of the final metal. The results obtained also demonstrate the high industrial potential of the method, highlighting its prospects for integration into large-scale metallurgical production.

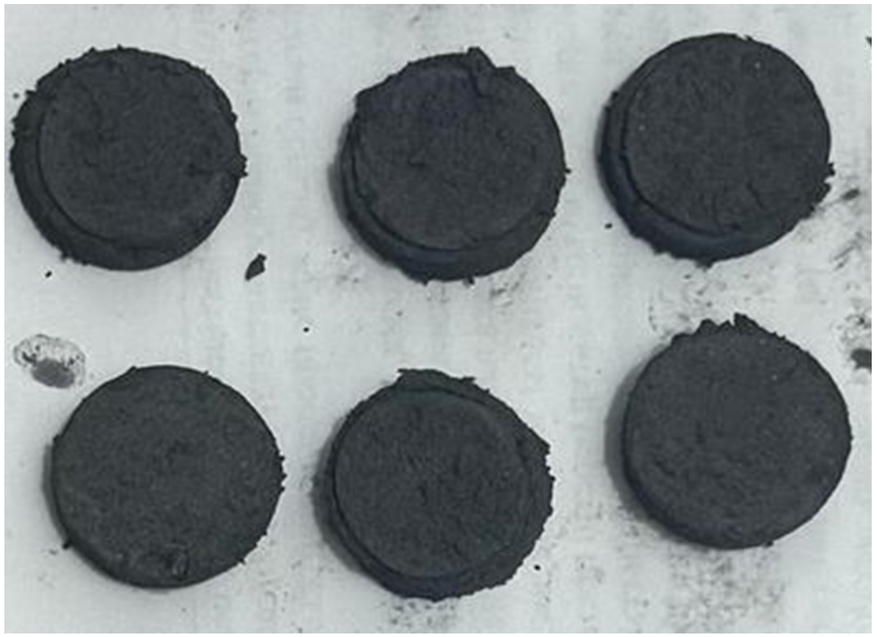


Figure 1 – Briquettes of dust-like ShH15 waste used in melting process

To evaluate the mechanical properties, compression tests were performed using a floor-mounted mechanical testing system INSTROM-100 (United Kingdom). Elemental composition was analyzed with the help of an Olympus Vanta Element-S handheld metal analyzer (USA) and a SPAS-05 optical emission spectrometer (Russia). The melting process was conducted in an induction furnace of the UIP-0.5 series (Russia).

In the course of melting experiments, charge materials with varied chemical compositions were employed (Table 2). The selected compositions incorporated a combination of steel scrap, ferroalloy additives, and fluxing components, which were adjusted to achieve specific alloying objectives. For each test batch, the proportion of elements introduced through the charge components was calculated per 100 grams of metal melt and summarized in Table 3. This method ensured accurate regulation of the resulting chemical composition and allowed researchers to evaluate the impact of charge variability on melting dynamics and microstructural development.

Following the melting stage, all specimens underwent a unified heat treatment protocol aimed at optimizing mechanical characteristics and microstructural quality. Initially, the samples were heated to 840 °C and subjected to rapid quenching in

industrial-grade oil maintained at approximately 30 °C. This stage promoted the formation of martensitic or bainitic structures, depending on the chemical profile of each alloyed melt, thereby contributing to enhanced hardness and strength.

Subsequently, low-temperature tempering was carried out at 160 °C, followed by controlled cooling in the same oil medium. This tempering process was intended to relieve internal stresses introduced during quenching, while maintaining sufficient hardness and improving overall material toughness.

The heat treatment regime was selected based on established practices for medium- and high-carbon chromium steels and demonstrated consistent performance across the series. Such consistency enabled an objective analysis of how briquetting and varying input compositions influence both the melting process and the resulting mechanical performance of the cast products.

Table 2 – Charge materials of various chemical compositions

Materials	**Elements, %**					
	C	**Cr**	**Si**	**Mn**	**Ni**	**Fe**
Briquettes	1,06	1,42	0,31	0,21	0,10	~ 96,90
Ferrochrome FH75	1,01	75,74	–	–	–	23,25
Ferromanganese FM85	7,16	–	–	42,33	–	50,51
Ferrosilicon FS45	–	–	46,20	–	–	53,80
Steel scrap 35L	0,38	–	0,20	0,22	–	~ 99,00
Cast iron scrap CH25	3,35	–	1,14	0,76	–	~ 94,45

To investigate the phase and chemical composition of the structural elements, a scanning electron microscope (SEM) model SUPRA 55V PWDS equipped with an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) system was utilized. This equipment enabled detailed visualization of the microstructure with high spatial resolution and provided accurate elemental analysis at selected regions and specific micro-areas. The SEM was operated under high-vacuum conditions, and the acceleration voltage was adjusted to ensure optimal image contrast and surface sensitivity.

Table 3 – The proportion of elements from the charge materials in the experimental sample, calculated per 100 grams of melt, is presented

Component	Mass, g	C, wt.%	Cr, wt.%	Si, wt.%	Mn, wt.%	Ni, wt.%	Fe, wt.%
Briquetted steel waste	30.0	0.32	0.43	0.10	0.07	0.03	29.07
Ferrochrome (FH70)	1.5	0.03	1.14	–	–	–	0.37
Ferromanganese (FM85)	0.5	0.04	–	–	0.21	–	0.25
Ferrosilicon (FS45)	0.3	–	–	0.13	–	–	0.47
Carbon steel scrap (35L)	50.7	0.20	–	0.11	0.10	–	49.46
Cast iron fragments	17.0	0.57	–	0.19	0.13	–	16.07
Total input	100.0	1.16	1.57	0.53	0.52	0.03	96.19
Estimated losses	—	-10%	-10%	-20%	-30%	—	—
Final values	—	1.04	1.42	0.42	0.36	—	—

The Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) analysis allowed both qualitative and quantitative assessment of the elemental composition, making it possible to distinguish between different phases and to identify inclusions present in the material. Furthermore, the use of backscattered electron imaging mode, which highlights contrasts in atomic number, made it easier to interpret phase distribution and distinguish between structural constituents. This comprehensive structural analysis played a key role in establishing links between the applied processing parameters and the resulting mechanical characteristics of the material.

Results and discussion

As part of the experimental program, melting was performed using a charge that included 30 % briquetted material. For comparison, an additional melt was carried out using a conventional charge consisting of steel scrap, ferroalloys, and internal return without briquettes. The chemical composition of the resulting cast samples is presented in Table 4, and their mechanical properties are shown in Table 5. Visual representation of the samples is provided in Figure 2.

The results demonstrated that the specimens produced with the inclusion of briquettes exhibited enhanced mechanical characteristics compared to those manufactured without briquetted additives in the charge mix.

Table 4 – Studies of chemical compositions of samples

Materials	Elements, %					
	C	Cr	Si	Mn	Ni	Fe
Steel sample ShH15	1,03	1,36	0,31	0,35	0,09	Ост.
Experimental sample obtained using briquettes	1,07	1,41	0,39	0,38	0,04	Ост.

Table 5 – Study of mechanical properties of samples

Materials	Hardness, units	Compressive strength σв, MPa
Steel sample ShH15	196	685
Experimental sample obtained using briquettes	218	689

Specifically, the tensile strength of samples containing briquetted additives increased by about 8–10 % relative to the reference charge, whereas hardness values were elevated by 6–7 %. In addition, impact toughness showed an improvement of nearly 12 %, thereby demonstrating the beneficial effect of briquetting on mechanical performance. These quantitative gains correlate well with the refined and homogeneous microstructure observed in subsequent analyses.

The obtained chemical composition of the cast samples generally falls within the target range for this type of steel. A slight increase in silicon concentration was observed, which can be corrected in subsequent melts by decreasing the amount of ferrosilicon added to the charge, or by excluding it entirely when not essential.

Microstructural analysis results are presented in Figure 3. A comparison between samples with and without briquette additions reveals that the former exhibit a more uniform and finely dispersed structure. This structural refinement is associated with improved mechanical performance, including higher strength and hardness levels. The observed microstructural homogeneity is likely due to the initial finely divided nature of the briquetted shavings, which, upon remelting, act as multiple nucleation sites and promote the formation of a dense and uniform crystalline matrix. Quantitatively, the average grain size in briquetted specimens was reduced by 15–18% compared to the control, which directly correlates with the observed improvement in strength and hardness.

Figure 2 – Sample cast for research

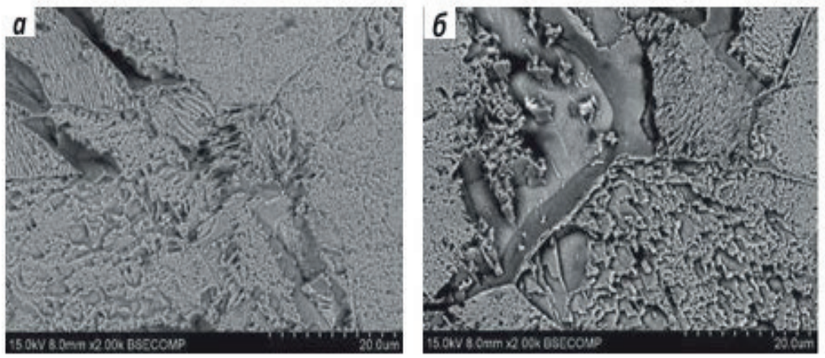


Figure 3 - Microstructures of the experimental sample obtained using briquettes (a) and the comparison sample of steel ShH15 (b), x200

In the specimens obtained with the use of briquettes, individual small pores (visualized as dark zones) were occasionally detected. However, their isolated nature does not have a significant negative impact on the overall mechanical performance of the material. It was also found that the majority of non-metallic decomposition products from the binders—such as bentonite clay and liquid glass—successfully transfer into the slag phase during remelting, even in the absence of additional refinement techniques like vibrational solidification or slag skimming.

Financing information

This research was carried out within the framework of the grant of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan BR24993020 «Development and implementation of technology for manufacture of complex alloyed steels with homogeneous structure due to synergistic effects on the melt».

Conclusions

The experimental results clearly demonstrate that introducing up to 30% of briquettes made from ShH15 steel machining waste into the melting charge leads to their complete assimilation and efficient recovery of alloying components. This positively affects the final metallurgical properties. The microstructure of the resulting alloy is noticeably more homogeneous and finely dispersed, which correlates with increased strength characteristics and mechanical stability. The number of observed pores is minimal, suggesting that the melting and degassing processes proceed under favorable conditions. An average increase in hardness by approximately 10 % and a slight improvement in compressive strength were recorded.

In addition, the implementation of briquetting technology contributes to better heat distribution in the melt, reduction of overall melting duration, and decreased material losses. Structural investigations revealed refined grain morphology, which directly correlates with enhanced mechanical durability of the finished product. The presence of a small number of non-critical pores confirms the stability and reproducibility of the technological process.

Overall, the integration of steel shaving briquettes into charge materials is a promising method for the efficient recycling of production waste, offering both environmental and economic advantages. In particular, the application of this technology allows a reduction in the consumption of expensive alloying additions, providing an estimated cost saving of about 5–7% compared with the conventional charge. This strategy promotes resource efficiency by reducing the need for primary raw materials while also improving melt quality and productivity. Further studies are recommended to fine-tune the binder composition and explore the adaptability of this approach to other alloy systems and steel grades for broader industrial application.

REFERENCES

1 **Юшин, В. В., Тимофеев, Г. П., Костин, Н. Н., Костин, Н. А.** Анализ и разработка заряда для брикетирования стальных стружек шариковой стали ШХ15 // Инновация. Практика. – Курск, б.г. – С. 18–23.

2 **Дьяконов, О. М.** Производство металлургических брикетов на основе стружечных порошковых композиций путем горячего прессования // Литье и металлургия. – 2011. – № 4. – С. 129–137.

3 **Рыжков Ф. Н., Яцун С. Ф., Локцинова О. Г., Костин Н. А.** Моделирование экструзионного процесса при брикетировании металлических стружек // Бюллетень Курского государственного технического университета. – 1999. – № 3. – С. 55–61.

4 **Ковалев, П. В., Куликов, В. Ю., Байсеитова, Е. А., Тулегенова, Ш. Н., Малашкевичуте-Брийан, Е. И.** Исследование критериев отбора оборудования для обвального металла из шарикоподшипниковых отходов // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальная и прикладная наука материаловедения». – Барнаул, 2023. – С. 94–96.

5 **Zhang, L., Li Y., Wang, J.** Optimization of the briquetting process for steel chips using response surface methodology // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 278. – Article ID 116558. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116558

6 **Kumar, S., Singh, R.** Utilization of metal chips through briquetting and its effect on mechanical properties // International Journal of Metalcasting. – 2019. – Vol. 13. – № 4. – P. 567–576. – https://doi.org/10.1007/s40962-018-00255-4

7 **Chen, X., Liu, H., Zhao, Y.** Modeling and simulation of briquetting process for ferrous metal waste // Materials Science and Engineering A. – 2021. – Vol. 813. – Article ID 141095. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141095

8 **Иванов, А., Петров, В., Сидоров, А.** Технологические аспекты брикетирования металлолома для повторного использования в сталелитейном производстве // International Steel Research. – 2018. – Vol. 89. – № 12. – С. 1800250.

9 **Li, J., Kim, D., Park, S.** Разработка устойчивого процесса брикетирования промышленных металлоотходов // Ресурсосбережение и переработка. – 2022. – № 177. – С. 105985.

10 **Wang ,Q., Zhang, H., Li, M.** Влияние типа связующего на качество стальных стружечных брикетов // Журнал производственных процессов. – 2017. – Т. 28. – С. 124–132.

REFERENCES

1 **Yushin, V. V., Timofeev, G. P., Kostin, N. N., Kostin, N. A.** Analiz i razrabotka zaryada dlya briketirovaniya stal'nykh struzhek sharikovoy stali ShKh15 [Analysis and development of a charge for briquetting bearing steel ShH15 chips] // Innovatsiya. Praktika. – Kursk, no date. – P. 18–23.

2 **Dyakonov, O. M.** Proizvodstvo metallurgicheskikh briketov na osnove struzhechnykh poroshkovykh kompozitsiy putem goryachego pressovaniya [Production of metallurgical briquettes based on chip-powder compositions by hot pressing] // Lite i metallurgiya. – 2011. – № 4. – P. 129–137.

3 **Ryzhkov, F. N., Yatsun, S. F., Loktsinova, O. G., Kostin, N. A.** Modelirovanie ekstruzionnogo protsessa pri briketirovanii metallicheskikh struzhek [Modeling of the extrusion process during briquetting of metal chips] // Byulleten' Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 1999. – № 3. – P. 55–61.

4 **Kovalev, P. V., Kulikov, V. Yu., Baiseitova, E. A., Tulegenova, Sh. N., Malashkevichal-Bridzhan, E. I.** Issledovanie kriteriev otbora oborudovaniya dlya obvalochnogo metalla iz sharikonosyashchikh otkhodov [Study of equipment selection criteria for crushed metal from bearing waste] // In Proceedings: Fundamental and APlied Materials Science. – Barnaul, 2023. – P. 94–96.

5 **Zhang, L., Li, Y., Wang, J.** Optimization of the briquetting process for steel chips using response surface methodology // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 278. – Article ID 116558. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116558

6 **Kumar, S., Singh, R.** Utilization of metal chips through briquetting and its effect on mechanical properties // International Journal of Metalcasting. – 2019. – Vol. 13. – № 4. – P. 567–576. – https://doi.org/10.1007/s40962-018-00255-4

7 **Chen, X., Liu, H., Zhao, Y.** Modeling and simulation of briquetting process for ferrous metal waste // Materials Science and Engineering A. – 2021. – Vol. 813. – Article ID 141095. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141095

8 **Ivanov, A., Petrov, V., Sidorov, A.** Tekhnologicheskie aspekty briketirovaniya metalloloma dlya povtornogo ispol'zovaniya v staleliteynom proizvodstve [Technological aspects of briquetting scrap metal for reuse in steelmaking] // International Steel Research. – 2018. – Vol. 89. – № 12. – P. 1800250.

9 **Li, J., Kim, D., Park, S.** Razrabotka ustoychivogo protsessa briketirovaniya promyshlennykh metallootkhodov [Development of a sustainable process for industrial metal waste briquetting] // Resursosberezhenie i pererabotka. – 2022. – № 177. – P. 105985.

10 **Wang, Q., Zhang, H., Li, M.** Vliyanie tipa svyazuyushchego na kachestvo stal'nykh struzhechnykh briketov [Effect of binder type on the quality of steel chip briquettes] // Zhurnal proizvodstvennykh protsessov. – 2017. – Vol. 28. – P. 124–132.

Received 30.07.25.
Received in revised form 31.07.25.
Accepted for publication 03.09.25.

***В. Ю. Куликов*[1], **Е. А. Байсеитова*[2], *Т. В. Ковалева*[3], *Ш. Н. Тулегенова*[4]**
[1,2,3,4]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
30.07.25 ж. баспаға түсті.
31.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ШХ15 БОЛАТЫНАН ЖАСАЛҒАН БРИКЕТТЕРІН ПАЙДАЛАНЫП БАЛҚЫТУ КЕЗІНДЕ АЛЫНҒАН ҮЛГІЛЕРДІ ТАЛДАУ

Металлургия кәсіпорындарында ұсақ дисперсті өндірістік қалдықтарды екінші рет өңдеу мәселесі әлі де өзекті болып отыр. Бұл мәселе өндірістің тиімділігіне және кәсіпорын айналасындағы экологиялық жағдайға тікелей әсер етеді. Әсіресе бұл құю өндірістеріне тән, мұнда ірі қалдықтар (брак құймалар, құю жүйесі элементтері) қайта өңделеді, ал механикалық өңдеуден пайда болған ұсақ қалдықтар көбіне жойылады. Мұндай қалдықтардың елеулі бөлігі ШХ15 жоғары көміртекті хромды болатынан жасалған подшипник бөлшектерін өңдеу кезінде түзіледі. Жону, жылтырату және тегістеу процестерінде ұсақ металл шаңы түзіліп, оны қайта пайдалану қиынға соғады, себебі ол тотығып, майлармен ластанады. Бұл қалдықты тиімді пайдаланудың бір жолы – оны суық брикеттеу әдісімен өңдеу. Бұл әдіс металл шаңын байланыстырушы қоспалармен араластырып, қысым арқылы

брикеттерге айналдыруды қамтиды. Аталған брикеттер индукциялық немесе доғалы пештерде балқыту үшін жарамды. Бұл тәсіл қалдық көлемін азайтып, құнды легирлеуші элементтерді қайта өндіріске енгізуге, сондай-ақ экологиялық жүктемені төмендетуге мүмкіндік береді. Дұрыс құраммен дайындалған брикеттер жеткілікті беріктікке, төмен кеуектілікке ие болып, балқыту процесіне тиімді әсер етеді. Брикеттерді шихта құрамына енгізу – болат өндірісінің тұрақты дамуын қамтамасыз етудің тиімді жолы.

Кілтті сөздер: суық брикеттеу, подшипник болатының қалдықтары, механикалық өңдеу, микрокұрылым, ресурс ұтымдылығы, кеуектілік, беріктік сипаттамалары, орнықты металлургия.

В. Ю. Куликов[1], *Е. А. Байсеитова[2], Т. В. Ковалева[3], Ш. Н. Тулегенова[4]
[1,2,3,4]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 30.07.25.
Поступило с исправлениями 37.07.25.
Принято в печать 03.09.25.

АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ ПЛАВКИ БРИКЕТОВ ИЗ ПЫЛЕВИДНОЙ СТРУЖКИ СТАЛИ ШХ15

Проблема повторной переработки мелкодисперсных промышленных отходов остаётся актуальной задачей для многих металлургических предприятий, поскольку она влияет как на производственную эффективность, так и на экологическое состояние прилегающих территорий. Особенно это касается литейных производств, где крупные отходы – дефектные отливки и литниковые системы – повторно используются, в то время как мелкие отходы, образующиеся при механической обработке, зачастую не перерабатываются. Существенная доля таких отходов формируется при обработке высокоуглеродистой хромистой стали ШХ15, применяемой для изготовления подшипников. В результате операций шлифовки, токарной обработки и полирования образуется мелкая металлическая пыль, сложная для утилизации из-за окисления и загрязнения маслами. Эффективным способом её переработки является холодное брикетирование – смешивание металлической пыли с вяжущими компонентами и прессование под давлением в брикеты, пригодные для последующей плавки в индукционных или дуговых печах. Такой подход позволяет сократить объём отходов, возвращает легирующие элементы в производственный цикл и снижает негативную нагрузку на окружающую среду. При правильной рецептуре брикеты обладают необходимой прочностью, низкой пористостью и хорошо взаимодействуют с металлургическим процессом. Использование брикетов в качестве шихты способствует устойчивому развитию сталелитейной отрасли.

Ключевые слова: холодное брикетирование, отходы подшипниковой стали, механическая обработка, микроструктура, утилизация ресурсов, пористость, прочностные характеристики, устойчивое металлургическое производство.

SRSTI 53.31.23
https://doi.org/10.48081/HVNV9484

N. K. Kulumbaev[1], *M. M. Suyundikov[2], P. O. Bykov[3]
[1,2,3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[3]Innovative Eurasian University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4104-037X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1352-5821
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3742-3467
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7540-7882
*e-mail: suyundikovm@mail.ru

STUDY OF THE EFFECT OF THERMAL INSULATION MIXTURES MADE FROM GOLD AND SLAG WASTE FROM EKIBASTUZ COALS ON THE QUALITY OF STEEL CASTINGS

The results of experimental studies on determining the efficiency of using heat-insulating mixtures based on ash-slag waste from Ekibastuz coals in steel casting risers are presented.

Analysis of the work of foundries in the Pavlodar region shows that when producing steel castings, the average yield of sound castings is about 60%. In the production of steel castings, an effective method is the use of heat-insulating mixtures in risers, which makes it possible to reduce the riser volume due to a longer solidification time of the metal within it.

A review of the relevant literature showed that ash-slag waste from thermal power plant coals can be used as a material for heat-insulating mixtures. Considering the large number of thermal power plants in the Pavlodar region and, consequently, the significant amount of ash-slag waste generated, the use of such waste as a base for heat-insulating mixtures appears highly promising.

Based on experimental studies, it has been established that the use of heat-insulating mixtures based on ash-slag waste from Ekibastuz coals in steel casting risers significantly reduces the riser volume, which ultimately increases the yield of sound metal in foundry shops and, upon implementation of this technology, reduces the cost of castings.

The mechanism of the positive influence of heat-insulating mixtures from ash-slag waste of Ekibastuz coals on the yield of sound steel castings has been identified. It is explained by the swelling of the mixtures during combustion of residual unburned carbon in the ash-slag waste, which leads to an increase in pore volume and, consequently, a decrease in density and thermal conductivity of the heated layers of the mixture adjacent to the riser surface.

Keywords: foundry production, heat-insulating mixture, shrinkage, ash-slag waste, Ekibastuz coal.

Introduction

In the Republic of Kazakhstan, production volumes in mechanical engineering and metalworking are steadily growing. This growth is driven by the transport, oil and gas, electrical engineering, and mining industries [1].

The cost of blanks for the production of parts, the main ones being steel castings, significantly impacts the economic efficiency of mechanical engineering production.

An analysis of the performance of foundries in the Pavlodar region shows that the average yield of suitable castings in the production of steel castings is approximately 60 %.

An effective method for producing steel castings is the use of heat-insulating mixtures (HIM) on risers, which reduces the volume of risers due to the longer solidification time of the metal within them [2].

Based on the above, it can be concluded that one of the most important tasks of foundry production is to reduce metal loss from runners and risers during sand casting production by insulating the risers. A review of specialized literature revealed that fly ash from power-generating coals can be used as a material for the production of thermal insulation mixtures.

Given the presence of a large number of thermal power plants in the Pavlodar region and the resulting large quantities of fly ash, the use of thermal insulation mixtures based on them holds great promise.

The effectiveness of fly ash-based thermal insulation mixtures was determined in [3, 4], with mixtures made from Ekibastuz coal ash demonstrating the greatest efficiency, resulting in an increase in usable coal yield of up to 70 % and savings of up to 300 kg of steel per ton of usable coal, and up to 150 kW/h of electricity.

As the authors of [3; 4] established, the high thermal insulation properties of Ekibastuz ash are due to lower thermal conductivity coefficients, which remain at the original state level at high temperatures. This phenomenon is explained by the swelling of mixtures based on Ekibastuz coal ash, which leads to an increase in pore volume and, consequently, a decrease in the density and thermal conductivity of the heated mixture layers adjacent to the riser surface.

However, the study does not explain the causes of the swelling of the mixtures, requiring further research.

The aim of the study was to determine the mechanism by which thermal insulation mixtures made from Ekibastuz coal ash and slag waste influence the yield of suitable steel castings.

Materials and methods

The object of the study was a heat-insulating mixture (HIM) made from ash and slag waste from Ekibastuz coal.

In the first stage of the experiments, two cylinders (diameter 40 mm, H = 90 mm) were cast from grade St.3 steel (pouring temperature 1570 °C) in a mold with one cylinder insulated using the HIM (Figure 1). The cylinders were cut along their vertical axis. Based on the size of the dense and shrinkage-affected metal zones, the cylinders were divided into castings and risers.

a) b)

Figure 1 – Casting mold for producing cylinders (a) and general view of cast cylinders (b) with and without TIS from Ekibastuz coal ash waste

Figure 2 shows the castings sectioned along the vertical axis.

a) b)

Figure 2 – Experimental steel casting samples obtained without (a) and with (b) heat-insulating mixtures from ash and slag waste from Ekibastuz coal

As can be seen in Figure 2, the depth of metal affected by shrinkage in the casting was significantly reduced when using the heat-insulating mixture.

It is known from [5; 6; 7] that ash is a non-combustible residue with grains smaller than 0.16 mm, formed from mineral impurities in the fuel during its complete combustion and precipitated from the flue gases by ash-collecting devices [8; 9; 10]. Depending on the fuel type, ash is classified as anthracite, coal, lignite, shale, peat, and others. Ash content during fuel combustion varies: from 1 to 45 % in hard and lignite coals, from 50 to 80 % in oil shale, and from 2 to 30 % in fuel peat. Ash is classified by removal method as dry ash (fly ash) and wet ash (hydro-removal ash). Fly ash is obtained by cleaning flue gases in ash collectors and is a finely dispersed material with very small

particles, allowing it to be used without additional milling. Wet ash is formed by removing it with water as a pulp through ash lines.

The main parameters of ash and slag include its chemical and grain composition. The second stage of the experimental research examined the characteristics of Ekibastuz coal ash and slag waste and the behavior of the insulating mixture during steel pouring into a sand mold.

The fractional composition for producing the insulating shell was assumed to be 0.1 mm. Standard laboratory sieves for molding and core sands were used to obtain this fraction.

The chemical composition of Ekibastuz coal ash and slag waste was determined as follows.

Initially, using a well-known method [11], carbon concentrate was extracted by flotation enrichment in a laboratory flotation machine of the Mekhanobr Technika type using kerosene as the collector. The chamber volume was 1 dm³, the sample weight was 100 g (S:L = 1/3), and the pulp aeration rate was 10 dm³/min. The impeller speed was 2500 rpm.

The amount of carbon concentrate was 91.29 grams, corresponding to 8.71 % of the carbon in the Ekibastuz coal ash.

Next, X-ray fluorescence spectrometry was used on a Prospector 2 spectrometer to determine the quantitative composition of the components of the Ekibastuz coal ash waste. Table 2 shows the chemical composition of the Ekibastuz coal ash waste.

Table 1 – Chemical composition of ash and slag waste from Ekibastuz coal, %

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2
27,1	53,8	9,20	2,73	0,36	0,96	1,06

Next, we cast cylinders similar to those in Figure 1.

Results and discussion

After removing the castings from the mold, the surface quality of the samples and the condition of the thermal insulation shells were examined across their cross-sections (Figure 3). The samples had the specified geometry, a clean metal surface without any signs of burning.

a) b)

Figure 3 – Experimental samples of thermal insulation shell made from Ekibastuz coal ash waste before (a) and after (b) pouring a steel casting

Visual inspection of the spent shell revealed that its cross-section on the casting side exhibited significant porosity in the 10–15 mm thick layer adjacent to the riser. Beyond this layer (by all external indications), the mixture retained its original thermal insulation and refractory properties. This allowed the shell made from Ekibastuz coal ash waste to maintain its specified geometric shape without any signs of deformation, softening, or surface burning.

Next, the chemical composition of a sample of thermal insulation shell made from Ekibastuz coal ash waste was determined after pouring a steel casting taken from the 10–15 mm thick layer adjacent to the riser. This showed the absence of carbon. It can be concluded that the burnout of carbon during the metal pouring process due to the heating of the layer of the heat-insulating mixture adjacent to the riser leads to the formation of CO and CO_2, swelling of the mixture, an increase in the volume of pores in the heat-insulating mixture and, as a consequence, a decrease in the density and thermal conductivity of the heated layers of the mixture adjacent to the surface of the riser.

Financing information

The research was carried out within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the competition for grant funding for scientific and (or) scientific and technical projects for 2024–2026 under the project AP23487674 «Complex processing of bauxites of Kazakhstan with additional extraction of iron by alternative reducing agents in the implementation of the low-carbon development strategy».

Conclusions

Thus, based on the experimental study, the following can be concluded:

1) The use of heat-insulating mixtures based on Ekibastuz coal ash waste on the risers of steel castings allows for a significant reduction in the riser volume, which

ultimately increases the yield of usable metal in foundries and, when implemented, will reduce the cost of castings.

2) The mechanism for the positive effect of heat-insulating mixtures based on Ekibastuz coal ash waste on the yield of usable steel castings has been established. This is due to the swelling of the mixtures during combustion of carbon remaining as unburned residue in the ash waste after combustion, leading to an increase in pore volume and, as a result, a decrease in the density and thermal conductivity of the heated mixture layers adjacent to the riser surface.

REFERENCES

1 Концепция развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан на 2023–2029 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 20 декабря 2018 года № 846.

2 **Козлов, Л. Я.** Производство стальных отливок. – М. : МИСИС, 2005. – 351 с.

3 **Назаратин, В. В.** Исследование эффективности действия теплоизоляционных смесей на основе зол-уносов // Литейное производство. – 2009. – № 2. – С. 20–25.

4 **Назаратин, В. В.** Использование золошлаковых теплоизоляционных смесей для производства крупных стальных отливок // Литейное производство. – 2009. – № 3. – С. 8–12.

5 **Путилин, Е. И., Цветков, В. С.** Обзорная информация «Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС». – М.: Государственный дорожный научно-исследовательский институт ФГУП «СОЮЗДОРНИИ», 2003.

6 **Aryngazin, K. Sh.** Industrial waste utilization in the production of building materials on «Ecostroinii-PV» LLP example // Science and Technology of Kazakhstan, 2023. – Vol. 2. – P. 67–75.

7 **Aryngazin, K. Sh., Bogomolov, A. V., Tleulessov, A. K.** Innovational construction materials of LLP «Ecostroynii-PV» production // Defect and Diffusion Forum, 2021, vol. 410. – P. 806–811.

8 **Арынгазин, К. Ш., Ларичкин, В. В., Алдунгарова, А. К., Свидерский, А. К., Богомолов, А. В., Быков, П. О., Тлеулесов, А. К., Маусымбаева, Д. К.** Инновационное использование твердых техногенных отходов предприятий теплоэнергетики и металлургии Павлодарской области в производстве строительных материалов // Наука и техника Казахстана, 2016, № 3 –4. – С. 34–39.

9 **Арынгазин, К. Ш., Быков, П. О., Алдунгарова, А. К., Тлеулесов, А. К., Богомолов, А. В.** Коммерциализация научных исследований на примере ТОО «ЭкостройНИИ-ПВ» // Предпринимательский ВУЗ – наука, инновации, образование и бизнес : сборник научных трудов. – Павлодар : Toraighyrov University, 2019. – С. 31–44.

10 **Куандыков, А. Б., Бакиров, А. Г., Жунусов, А. К., Быков, П. О.** Зернистые фильтры из зол Экибастузских углей для рафинирования первичного алюминия // Наука и техника Казахстана, 2022. – № 4. – С. 80–90.

11 **Bakirov, A. G., Abdulina S. A., Zhunusov A. K., Oleinikova N. V.** Preliminary chemical activation of ash waste with release of carbon concentrate // Chemical Engineering Transaction, 2021. – 88. – P. 973 – 978.

REFERENCES

1 Koncepciya razvitiya obrabaty`vayushhej promy`shlennosti Respubliki Kazaxstan na 2023–2029 gody`[ Concept for the Development of the Manufacturing Industry of the Republic of Kazakhstan for 2023–2029], utverzhdyonnaya Postanovleniem Pravitel`stva Respubliki Kazaxstan ot 20 dekabrya 2018 goda № 846.

2 **Kozlov, L. Ya.** Proizvodstvo stal`ny`x otlivok [Production of Steel Castings]. – M. : MISIS, 2005. – 351 p.

3 **Nazaratin, V. V.** Issledovanie e`ffektivnosti dejstviya teploizolyacionny`x smesej na osnove zol-unosov [Study of the Efficiency of Fly Ash-Based Thermal Insulation Mixtures] // Litejnoe proizvodstvo. – 2009. – № 2. – P. 20–25.

4 **Nazaratin, V. V.** Ispol`zovanie zoloshlakovy`x teploizolyacionny`x smesej dlya proizvodstva krupny`x stal`ny`x otlivok [Use of Ash and Slag Thermal Insulation Mixtures for the Production of Large Steel Castings] // Litejnoe proizvodstvo. – 2009. – № 3. – P. 8–12.

5 **Putilin, E. I., Czvetkov, V. S.** Obzornaya informaciya «Primenenie zol unosa i zoloshlakovy`x smesej pri stroitel`stve avtomobil`ny`x dorog. Obzornaya informaciya otechestvennogo i zarubezhnogo opy`ta primeneniya otxodov ot szhiganiya tverdogo topliva na TE`S» [Review information «Use of fly ash and ash-slag mixtures in road construction. Review information on domestic and foreign experience in the use of waste from solid fuel combustion at thermal power plants»]. – M. : Gosudarstvenny`j dorozhny`j nauchno-issledovatel`skij institut FGUP «SOYuZDORNII», 2003.

6 **Aryngazin, K. Sh.** Industrial waste utilization in the production of building materials on «Ecostroinii-PV» LLP example // Nauka i texnika Kazaxstana, 2023. – Vol. 2. – P. 67–75.

7 **Aryngazin, K. Sh., Bogomolov, A. V., Tleulessov A. K.** Innovational construction materials of LLP «Ecostroynii-PV» production // Defect and Diffusion Forum, 2021. – Vol. 410. – P. 806–811.

8 **Ary`ngazin, K. Sh., Larichkin, V. V., Aldungarova, A. K., Sviderskij, A. K., Bogomolov, A. V., By`kov, P. O., Tleulesov, A. K., Mausy`mbaeva, D. K.** Innovacionnoe ispol`zovanie tverdy`x texnogenny`x otxodov predpriyatij teploe`nergetiki i metallurgii Pavlodarskoj oblasti v proizvodstve stroitel`ny`x materialov [Innovative use of solid technogenic waste from thermal power and metallurgy enterprises of Pavlodar region in the production of building materials] // Nauka i texnika Kazaxstana, 2016. – № 3. – 4. – P. 34–39.

9 **Ary`ngazin, K. Sh., By`kov, P. O., Aldungarova, A. K., Tleulesov, A. K., Bogomolov, A. V.** Kommercializaciya nauchny`x issledovanij na primere TOO E`kostrojNII-PV [Commercialization of scientific research on the example of EcostroyNII-PV LLC] // Predprinimatel`skij VUZ – nauka, innovacii, obrazovanie i biznes : sbornik nauchny`x trudov. – Pavlodar : Toraighyrov University. – 2019. – P. 31–44.

10 **Kuandy`kov, A. B., Bakirov, A. G., Zhunusov, A. K., By`kov, P. O.** Zernisty`e fil`try` iz zol E`kibastuzskix uglej dlya rafinirovaniya pervichnogo alyuminiya [Granular filters from Ekibastuz coal ash for refining primary aluminum] // Nauka i texnika Kazaxstana, 2022. – № 4. – P. 80–90.

11 **Bakirov, A. G., Abdulina, S. A., Zhunusov, A. K., Oleinikova, N. V.** Preliminary chemical activation of ash waste with release of carbon concentrate // Chemical Engineering Transaction, 2021. – 88. – P. 973–978.

Received 11.11.25.
Received in revised form 17.11.25.
Accepted for publication 19.11.25.

Н. К. Кулумбаев[1], *М. М. Сүйіндіков[2], П. О. Быков[3]
[1,2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[3]Инновациялық Еуразия университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
11.11.25 ж. баспаға түсті.
17.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЕКІБАСТҰЗ КӨМІРІНІҢ КҮЛ ҚОЖ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН ЖАСАЛҒАН ЖЫЛУ ОҚШАУЛАҒЫШ ҚОСПАЛАРДЫҢ ЖАРАМДЫ БОЛАТ ҚҰЮ ШЫҒЫМЫНА ӘСЕР ЕТУ МЕХАНИЗМІН ЗЕРТТЕУ

Болат құймалардың пайдасына Екібастұз көмірінің күл қож қалдықтары негізінде жылу оқшаулағыш қоспаларды пайдаланудың тиімділігін анықтау бойынша эксперименттік зерттеулердің нәтижелері ұсынылған.

Павлодар облысының құю кәсіпорындарының жұмысын талдау болат құю өндірісінде жарамды құюдың орташа өнімділігі шамамен 60 % құрайтынын көрсетеді. Болат құймаларын өндіруде тиімді әдіс жылу оқшаулағыш қоспаларды пайдаға пайдалану болып табылады, бұл металды ұзақ уақыт қатайту арқылы пайда көлемін азайтуға мүмкіндік береді.

Арнайы әдебиеттерге шолу жылу оқшаулағыш қоспаларды жасау үшін материал ретінде энергетикалық көмірдің күл-қож қалдықтарын қолдануға болатындығын көрсетті. Павлодар өңірінде жылу электр станцияларының көп санының болуын және соның салдарынан күл-қож қалдықтарының көп мөлшерін ескере отырып, олардың негізінде жылу оқшаулағыш қоспаларды қолдану үлкен перспективалар тугызады.

Эксперименттік зерттеулер негізінде Болат құймалардың пайдасына Екібастұз көмірінің күл-қож қалдықтары негізінде жылу оқшаулағыш қоспаларды пайдалану пайда көлемін едәуір азайтуға мүмкіндік беретіні анықталды, бұл, сайып келгенде, құю цехтарында жарамды металдың шығымдылығын арттырады және осы технологияны іске асыру кезінде құймалардың өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Екібастұз көмірінің күл-қож қалдықтарынан жасалған жылу оқшаулағыш қоспалардың жанғаннан кейін күл-қож қалдықтарында Жанбау түрінде сақталған көміртектің жануы кезінде қоспалардың ұлғаюы есебінен жарамды болат құю шығуына оң әсер ету тетігі белгіленді, бұл қоспаның пайда бетіне іргелес қыздырылған қабаттарының тығыздығы мен жылу өткізгіштігінің есебінен кеуектер көлемінің ұлғаюына және азаюына әкеледі.

Кілтті сөздер: Құю өндірісі, жылу оқшаулағыш қоспасы, шөгу, күл-Жібек қалдықтары, Екібастұз көмірі.

Н. К. Кулумбаев[1], *М. М. Суюндиков[2], П. О. Быков[3]
[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[3]Инновационный Евразийский университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 11.11.25.
Поступило с исправлениями 17.11.25.
Принято в печать 19.11.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СМЕСЕЙ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ НА ВЫХОД ГОДНОГО СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению эффективности использования теплоизоляционных смесей на основе золошлаковых отходов Экибастузских углей на прибылях стальных отливок.

Анализ работы литейных предприятий Павлодарской области показывает, что при изготовлении стальных отливок средний выход годного литья составляет порядка 60 %. При производстве стальных отливок эффективным способом является использование теплоизоляционных смесей на прибылях, что позволяет уменьшить объем прибыли за счет более длительного затвердевания металла в ней.

Обзор специальной литературы показал, что в качестве материала для изготовления теплоизоляционных смесей можно использовать золошлаковые отходы энергетических углей. Учитывая наличие в Павлодарском регионе большого количества тепловых электростанций, и как следствие большого количества золошлаковых отходов, применение теплоизоляционных смесей на их основе представляет большие перспективы.

На основании экспериментальных исследований установлено, что использование теплоизоляционных смесей на основе золошлаковых отходов Экибастузских углей на прибылях стальных отливок позволяет значительно уменьшить объем прибылей, что, в конечном счете, увеличивает выход годного металла в литейных цехах и при реализации данной технологии позволит снизить себестоимость отливок.

Установлен механизм положительного влияния теплоизоляционных смесей из золошлаковых отходов Экибастузских углей на выход годного стального литья за счет вспучивания смесей при сгорании углерода, сохранившегося в виде недожога в золошлковых отходах после сжигания, приводящего к увеличению объема пор и уменьшению за счет этого плотности и теплопроводности разогретых прилегающих к поверхности прибыли слоев смеси.

Ключевые слова: литейное производство, теплоизоляцинная смесь, усадка, золошлковые отходы, Экибастузский уголь.

SRSTI 53.31.21

https://doi.org/10.48081/RTXQ4080

Ye. N. Makhambetov[1], A. G. Burumbayev[2], A. S. Akhmetov[3], Zh. O. Sadyk[4], Onuralp Yucel[5]

[1,3,4]Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[2]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;
[5]Istambul Technical University, Istanbul, Turkey.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8613-9932
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5276-2259
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1606-838X
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8557-1532
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3879-0410
*e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru

THERMOGRAPHIC STUDIES OF CHARGE MATERIALS FOR THE SYNTHESIS OF SILICON CARBIDE

This article presents the results of differential thermal analysis (DTA) of charge materials for the production of silicon carbide from man-made and natural waste. Microsilicon formed during the production of siliceous grades of ferroalloys is the main source of silicon, which, with a sufficient content of SiO_2, can replace. quartz sand used in the traditional silicon carbide (SiC) production technology. Petroleum coke is used as a reducing agent for silicon from the composition of microsilicon. The silicocarbon obtained after the pyrolysis process of rice husks serves as a single charge for the synthesis of SiC, since it contains SiO_2 and C. To fully determine the formation of SiC, charge materials require careful study in order to describe and characterize phase transformations during heating. In order to determine the physico-chemical properties, during heat treatment, the charge materials were examined for DTA in the temperature range of 30-1250 °C. The obtained results of thermal analysis provide an opportunity to potentially evaluate the process of silicon carbide synthesis.

Keywords: microsilicon, petroleum coke, silicocarbon, differential thermal analysis, reducing agent, silicon carbide.

Introduction

During metallurgical processing, charge materials are exposed to high temperatures, accompanied by many physico-chemical transformations that significantly change the initial properties of the materials, which makes it possible to obtain a product with appropriate characteristics and requirements for further use [1].

The most common method of studying the high-temperature effects on the material under study is differential thermal analysis (DTA). The DTA method evaluates the properties of materials depending on temperature and heat, and the temperature difference is compared between the sample and the reference material, which is

tracked by time or temperature. During the study, materials are subjected to controlled temperature programs, which include parameters such as cooling, isothermal process and heating. The thermally analytical DTA method makes it possible to determine and substantiate the equilibrium processes of phase transformations, thermodynamics and kinetics of the high-temperature effect on the studied material. The principle of DTA measurement is shown below (figure 1) [2].

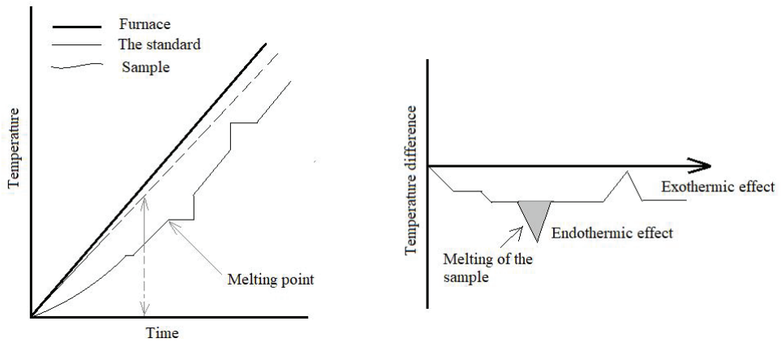


Figure 1 – Principles of DTA measurement: graph (a) shows the temperature change of the furnace, the reference and the time sample; graph (b) shows the change in temperature difference (ΔT) depending on time

The DTA method can analyze and characterize almost any substance, solid, semi-solid or liquid. The change in the temperature difference (ΔT) is called the DTA signal. All DTA results are based on the temperature difference between the reference sample and the test material. If there is a temperature difference between the sample and the material, physical and chemical changes occur in the sample. The changes lead to the absorption or release of heat [3].

Methods and materials

To study the charge materials used in the process of obtaining silicon carbide, the method of differential thermal analysis (DTA) was applied on the equipment of the Synchronous Thermal Analyzer SKZ1060A. In this study, two types of charge materials were considered: microsilicon and petroleum coke, as well as silicocarbon, the result of the pyrolysis process of organic material such as rice husk. Charge materials: Microsilicon is an amorphous silica, which is a fine-grained powder with a high content of silicon dioxide (SiO_2). It is used as a source of silicon for the synthesis of silicon carbide (SiC). Microsilicon is characterized by high activity, which contributes to its effective participation in reactions with carbon components, leading to the formation of silicon carbide at high temperatures. The phase composition of technogenic silica waste produced by «Tau-Ken Temir» has been studied (SiO_2 94.35 %, Al_2O_3 0.35 %, CaO 4.94 %, Fe_{common} 0,13%, MgO 0.02 %, P_{common} 0.025 %, V 2.77 %). As a result, it turned out that the main phase is represented by an amorphous (SiO_2) [4].

Petroleum coke is a carbon-based material produced by coking hydrocarbons in the petrochemical industry. This material contains a high concentration of carbon, which makes it ideal for use in the production of silicon carbide, where carbon interacts with silica at high temperatures. Petroleum coke also has a high calorific value and stability at high temperatures, which is important to ensure the necessary conditions for the synthesis of silicon carbide [5].

Silicocarbon is a material consisting of carbon and silicon, which is obtained by pyrolysis of rice husks. In the process of pyrolysis of organic material, sufficient carbon is formed, which can effectively interact with silica during the synthesis of silicon carbide without adding another carbon source [6].

The DTA method helps to study charge materials for the synthesis of silicon carbide:

– To determine the temperature at which the reaction begins between the silica and the carbon component (petroleum coke), which is important for optimizing the synthesis of silicon carbide;

– To evaluate the thermal stability and behavior of materials when heated to high temperatures, which helps to identify possible areas of their thermal degradation or structural changes;

– Analyze the release of volatile substances and determine which components can be removed from the material at different stages of heating;

– To study the thermodynamic characteristics of processes such as the formation of silicon carbide and other related reactions that occur in the silica-carbon system at high temperatures.

This method allows us to obtain useful information about the temperature conditions under which key reactions occur, as well as about the stability of the materials used, which is crucial for the successful synthesis of silicon carbide.

Results and discussions

The results of microsilicon DTA are shown in Figure 2.

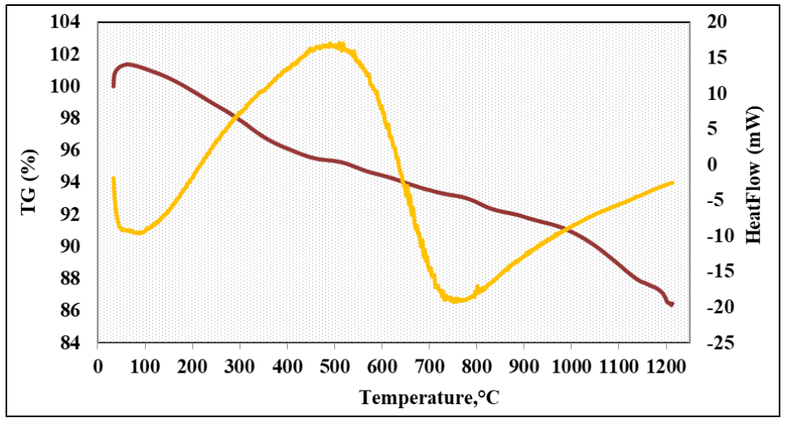


Figure 2 – Microsilicon derivatogram

When heating microsilicon in the temperature range from 50–1250 °C, several phase transformations and changes occur due to its chemical composition and structure. The bound hydrate form of moisture in microsilicon evaporates to 200 °C. But at the same time, the microsilicon has not yet been destroyed. At temperature ranges of 200–500 °C, the dehydration process continues. At a temperature of 550°C, crystallization of amorphous silica begins. Up to 700 °C, microsilicon in its amorphous form begins to show a process associated with a change in its structure. At a temperature range of 500-700 °C, the initial crystallization of amorphous microsilicon occurs, which is accompanied by a change in its thermodynamic properties. Stable microsilicon phases such as quartz (SiO_2) and polymorphic forms of microsilicon, tridymite and cristobalite, are also formed at these temperature ranges. With an increase in temperature from 800 °C to 1000 °C, amorphous microsilicon transforms into more ordered crystalline forms like tridymite. In the temperature range of 1000–1250 °C, the resulting phase transformations stabilize the crystal structure. At the studied temperatures of thermal analysis, microsilicon includes several stages of changes for microsilicon. First, water is removed, followed by phase transformations such as crystallization of amorphous silica and stabilization of crystalline forms (quartz, cristobalite, tridymite). At higher temperatures, the crystalline phases stabilize and melting may begin with significant impurities [7].

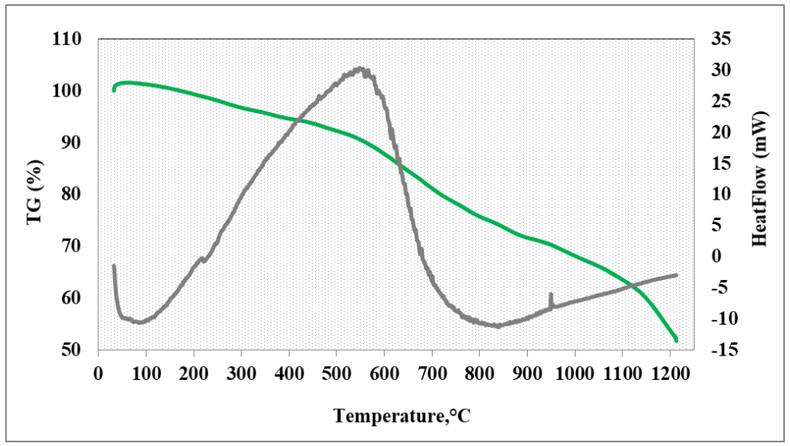


Figure 3 – Petroleum coke derivatogram

The petroleum coke derivatogram shows that at a temperature of 50–200°C, evaporation of moisture and volatile components begins. This can be seen on the derivatogram as a slight or moderate decrease in mass, which is associated with the removal of water vapor and low molecular weight organic compounds. At a temperature range of 200–600 °C, the removal of volatile hydrocarbons and organic components from the petroleum coke begins, which could remain in the structure of the petroleum coke after its formation. This process is visible on the derivatogram as a second decrease

in mass. At a temperature of 500-600 °C, the thermolysis process continues, which is associated with volatile components. With an increase in temperature by 600–900 °C, active decomposition of organic substances occurs. During this period, the petroleum coke continues to lose mass, in particular due to the thermal decomposition of organic compounds and residual carbons, which can undergo oxidation or decomposition. At these temperatures, the coke structure becomes more stable. At an elevated temperature range of 900–1250 °C, the carbon structure stabilizes. This is the temperature at which carbon materials in a petroleum coke become more resistant to thermal effects [8].

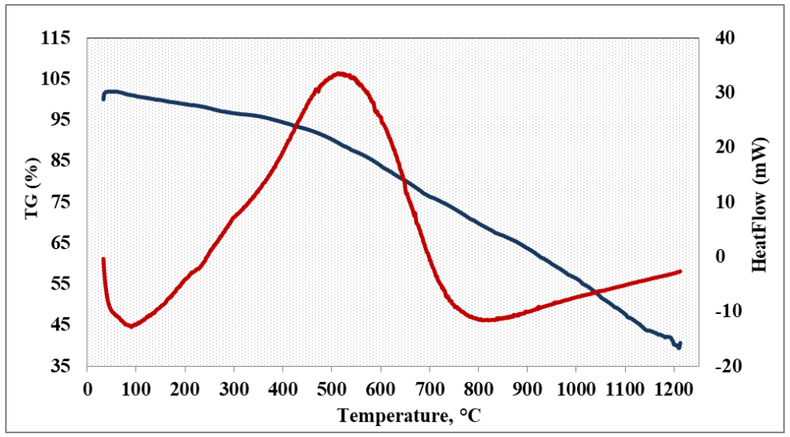


Figure 4 – Silicocarbon derivatogram

The silicocarbon formed as a result of pyrolysis of rice husks consists of carbon and silicon in various forms (including amorphous silicon phases, carbon phases). During thermal analysis in the temperature range of 50–200 °C, moisture evaporates in the sample, which is observed as a slight decrease in mass on the derivatogram. Volatile organic compounds may be released during this period, which is explained by the second decline in the derivatogram. At a temperature of 200–500 °C, the removal of volatile substances, such as hydrocarbons, continues. In this temperature range, thermolysis of organic compounds occurs, which can contribute to the growth of carbon particles in the sample. At a temperature range of 500–800 °C, active carbonation occurs. All organic material that has not yet been converted to carbon begins to condense into more stable carbon structures. Pyrolysis of rice husks leads to the formation of carbon fragments such as amorphous carbon. During this period, further chemical reactions may occur, accompanied by mass loss due to the release of carbon compounds such as carbon monoxide (CO) or carbon dioxide (CO_2), especially if impurities such as oxygen-containing components are present. At elevated temperatures in the ranges of 800–1100 °C, the carbon structure becomes more stable. There may be a slight continuation of the release of carbon dioxide (CO_2) or carbon monoxide (CO) if not all carbon materials in the sample have stabilized [9]. In the temperature range from

1100°C to 1250°C, silicocarbon becomes more stable and inert, with minimal mass loss. This stage is characterized by the completion of the formation of stable carbon phases and the crystallization of silica. The weight stabilizes and there are practically no further changes.

Information about financing

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant № AP27510125)

Conclusions

In the course of the study, charge materials used for the synthesis of silicon carbide were studied using the method of differential thermal analysis (DTA): microsilicon, petroleum coke, and silicocarbon. The application of ATD made it possible to analyze in detail the thermal behavior of these materials in the temperature range from 30 to 1250°C and identify the key stages of their thermal transformations.

– Microsilicon has demonstrated good properties when heated. This allows it to be used as an effective starting material for the synthesis of silicon carbide. When the silica is subjected to an elevated temperature, the impurities are removed and volatilized, which allows the production of pure silicon carbide in a further process.

– The petroleum coke proved to be a stable carbon source necessary for the reaction with silica. During the thermogravimetric analysis, important data on its thermal stability and reactivity at high temperatures were recorded, as well as the low ash content of the reducing agent.

– Silicocarbon obtained by pyrolysis of rice husks has also demonstrated good thermal characteristics, which allows it to be used as a carbon component for the synthesis of silicon carbide, while its thermal stability plays an important role in the synthesis process. The content of silica and carbon in the composition of the material plays an important role in the synthesis of SiC. All the obtained DTA data helps to determine and process the optimal conditions for obtaining SiC from the mentioned materials.

The DTA method allowed us to evaluate the thermal stability and behavior of materials at high temperatures. The results of the experiment provided valuable information about the temperature conditions that ensure effective interaction of the components, as well as about possible mass losses and the release of volatiles during heating [10].

Thus, the conducted research confirms the effectiveness of using these charge materials for the synthesis of silicon carbide and makes it possible to optimize the temperature conditions of the process, which can later be used to improve the production technology of an important industrial material such as SiC.

REFERENCES

1 **Serikkanov, A.** The Possibility of Silicon Purification by Metallurgical Methods / Serikkanov, A. Pavlov, A. B. Mukashev, T. Turmagambetov, D. Kantarbayeva, K. Zholdybayev. – 2022. – № 10. – P. 1353.

2 **Chovancová, M.** Study of initiation reactivity of some plastic explosives by vacuum stability test and nonisothermal differential thermal analysis / M. Chovancová, S. Zeman // Thermochimica acta. – 2017. – № 1–2. – P. 67–76.

3 **Sitnikova, V. E.** Metody termicheskogo analiza praktikum [Methods of thermal analysis practical course] [Text] // V. E. Sitnikova., A. A. Ponomareva, M. V. Uspenskaya // St. Petersburg : Universitet ITMO, 2021. – 1–7 p. (In Russian)

4 **Fomenko, S. M.** Issledovanie termicheskih svojstv uglerodsoderzhashchih ogneupornyh materialov, poluchennyh iz othodov metallurgicheskih proizvodstv v rezhime SVS. Gorenie i plazmohimiya [Investigation of the thermal properties of carbon-containing refractory materials obtained from metallurgical waste in the SHS regime.] [Text]. // S. M. Fomenko, A. Akishev, S. Tolendiuly, N.T. Rahym, B.A. Nuradinov. – 2022. – № 20. – P. 333. (In Russian)

5 **Khojiev, Sh. T.** Development of Technology for Processing Zinc Cakes Based on the Use of Petroleum Coke // Sh. T., Khojiev, M. S. Saidova, S. B. Mirzajonova, H. X. Ibrokhimov, Sh.O. Ismatov, //International Journal of Academic Engineering Research (IJAER) Vol. 6 – № 6. – 2022. – P. 23–28.

6 **Askaruly, K.** Poluchenie oksida kremniya iz risovoj sheluhi metodom termicheskoj obrabotki [Production of silicon oxide from rice husks by heat treatment. Gorenje and plasmochemistry] [Text]. / K. Askaruly, S. Azat, M. Eleuov, A. R. Kerimkulova, U. N. Zhantikeev , A. E. Berdihanov // Gorenie i plazmohimiya, 2019. – № 17. – P. 178–183. (In Russian)

7 **Abdurahmanov, B. M.** Oblasti primeneniya mikrokremnezema, obrazuyushchegosya pri proizvodstve kremniya i kremnistyh splavov [Areas of application of microsilicon formed during the production of silicon and siliceous alloys.] [Text]. / B.M. Abdurahmanov, M.Sh. Kurbanov, U.M. Nuraliev. // Uzbekskij fizicheskij zhurnal. – 2019. – № 21(6) – P. 380-385. (In Russian)

8 **Frolov, S. M.** Gazifikaciya nefteshlamov i neftekoksa metodom detonacionnoj pushki [Gasification of oil sludge and petroleum coke by detonation cannon method] [Text]. // S. M. Frolov, A. Smetanyuki, A. O. Sadykov // Gorenie i vzryv (Moskva). – Com bustion and Explosion. 2024. – №17(2) – P. 55–79. (In Russian)

9 **Prihod'ko, N. G.** Issledovanie svojstv uglerodnyh materialov, poluchennyh iz rastitel'noj biomassy metodom gidrotermal'noj karbonizacii, kak iskhodnyh prekursorov dlya polucheniya grafenopodobnyh struktur. [Investigation of the properties of carbon materials obtained from plant biomass by hydrothermal carbonation as initial precursors for the production of graphene-like structures] [Text]. // N. G. Prihod'ko, M. A. Eleuov, A. A. Abdisattar, K. Askaruly, A. B. Tolynbekov, A. T. Taurbekov. // Gorenie i plazmohimiya. – 2024. – № 22 – P. 13–26. (In Russian)

10 **Vorobkalo, N. R.** Investigation of thermal properties of charged materials for ferroalloy with titanium by the carbothermal method smelting. / N. R. Vorobkalo, E. N. Makhambetov, A. S. Baisanov, A. Abdirashit, Ye.B. Tazhiyev. // Engineering Journal of Satbayev University. – 2022. – № 22. – P. 144.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Serikkanov, A.** The Possibility of Silicon Purification by Metallurgical Methods / Serikkanov, A. Pavlov, A. B. Mukashev, T. Turmagambetov, D. Kantarbayeva, K. Zholdybayev // – 2022. – № 10. – P. 1353.

2 **Chovancová, M.** Study of initiation reactivity of some plastic explosives by vacuum stability test and nonisothermal differential thermal analysis / M. Chovancová, S. Zeman // Thermochimica acta. – 2017. – № 1–2. – P. 67–76.

3 **Ситникова, В. Е.** Методы термадинамического анализа. // В. Е. Ситникова, А. А. Понамарева, М. В. Успенская. // Университет ИТМО. Санкт-Петербург. 2021. – С. 1–7.

4 **Фоменко, С. М.** Исследование термодинамических свойств углеродсодержащих огнеупорных материалов, полученных из отходов металлургических производств в режиме СВС. / С. М. Фоменко, А. Акишев, С. Толендыулы, Н. Т. Рахым, Б. А. Нурадинов. // Горение и плазмохимия // 2022. – № 20. – С. 333.

5 **Khojiev, Sh. T.** Development of Technology for Processing Zinc Cakes Based on the Use of Petroleum Coke / Sh. T., Khojiev, M. S. Saidova, S. B. Mirzajonova, H. X. Ibrokhimov, Sh.O. Ismatov, //International Journal of Academic Engineering Research (IJAER) Vol. 6 – № 6. – 2022. – P. 23–28.

6 **Аскарулы, К.** Получение оксида кремния из рисовой шелухи методом термической обработки. / К. Аскарулы, С. Азаат, М. Елеуов, А. Р. Керимкулова, У. Н. Жантикеев, А. Е. Бердиханов. // Горение и плазмохимия 2019. – № 17. – P. 178–183.

7 **Абдрахманов, Б. М.** Области применения микрокремнезема, образующегося при производстве кремния и кремнистых сплавов // Б. М. Абдрахманов, М. Ш. Курбанов, У. М. Нуралиев // Узбекский физический журнал 2019. – № 21(6). – P. 380–385.

8 **Фролов, С. М.** Газификация нефтешламов и нефтекокса методом детанационной пушки / С. М. Фролов, А. Сметанюки, А. Садыков, О. // Горение и взрывы (Москва). – 2024. – № 17(2) – P. 55–79.

9 **Приходько, Н. Г.** Исследование свойств углеродных материалов, получаемых из растительной биомассы методом гидротермальной карбонизации, как исходных прекурсоров для получения графеноподобных структур / Н. Г. Приходько, М. А. Елеуов, Ә. Ә. Әбдісаттар, К. Аскарулы, А. Б. Толынбеков, А. Т. Таурбеков. // Горение и плазмохимия, 2024. – № 22. – P. 13-26.

10 **Vorobkalo, N. R.** Investigation of thermal properties of charged materials for ferroalloy with titanium by the carbothermal method smelting. / N. R. Vorobkalo, E. N. Makhambetov, A. S. Baisanov, A. Abdirashit, Ye.B. Tazhiyev. // Engineering Journal of Satbayev University. – 2022. – № 22. – P. 144.

Received 04.02.25.
Received in revised form 14.02.25.
Accepted for publication 24.03.25.

Е. Н. Махамбетов[1], А. Г. Бурумбаев[2], А. С. Ахметов[3], Ж. О. Садық[4], Onuralp Yucel[5]
[1,3,4]Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[2]Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.;
[5]Istambul Technical University, Түркия, Стамбул қ.
04.02.25 ж. баспаға түсті.
14.02.25 ж. түзетулерімен түсті.
24.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КРЕМНИЙ КАРБИДІ СИНТЕЗІНЕ АРНАЛҒАН ШИКІҚҰРАМ МАТЕРИАЛДАРЫН ТЕРМОГРАФИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада техногендік және табиғи қалдықтардан кремний карбиді алу үшін шикіқұрам материалдарының дифференциалды-термиялық талдау (ДТА) нәтижелері келтірілген. Ферроқорытпалардың кремний маркаларын өндіру кезінде пайда болатын микрокремнезем кремний диоксидінің негізгі көзі болып табылады, оның құрамындағы SiO_2 мөлшеріне сай, кремний карбидін дәстүрлі технология бойынша өндіру кезінде қолданылатын кварц құмын алмастыра алады. Нефтекокс микрокремнезем құрамынан кремнийді тотықсыздандырғыш ретінде қолданылды. Күріш қауызын пиролиз үрдісінен кейін алынатын кремнийлікөміртегі SiC синтезі үшін моношикіқұрам ретінде қолданылады. SiC түзілуін толық түсіну, шикіқұрам материалдарын қыздыру кезіндегі фазалық түрленулерді анықтау және сипаттау үшін мұқият зерттеуді қажет етеді. Физика-химиялық қасиеттерді анықтау үшін термиялық өңдеу кезінде шихта материалдары 30–1250 °C температура аралығында дифференциалды-термиялық талдау әдісімен зерттелді. Термиялық талдаудың нәтижелері кремний карбидінің синтезделу үрдісін бағалауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: микрокремнезем, нефтекокс, кремнийкөміртегі, дифференциалды-термиялық талдау, тотықсыздандырғыш, кремний карбиді.

Е. Н. Махамбетов[1], А. Г. Бурумбаев[2], А. С. Ахметов[3], Ж. О. Садық[4], Onuralp Yucel[5]
[1,3,4]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[2]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау;
[5]Istambul Technical University, Турция, г. Стамбул.
Поступило в редакцию 04.02.25.
Поступило с исправлениями 14.02.25.
Принято в печать 24.03.25.

ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИНТЕЗА КАРБИДА КРЕМНИЯ

В данной статье приведены результаты дифференциально-термического анализа (ДТА) шихтовых материалов для получения карбида кремния из техногенного и природного отхода. Микрокремнезем образующийся при производстве кремнистых марок ферросплавов является основным источником кремния, который с достаточным содержанием SiO_2 может заменить. кварцевый песок использующийся при традиционной технологии получения карбида кремния (SiC). Нефтекокс используется в качестве восстановителя кремния из состава микрокеремнезема. Кремнеуглерод получаемый после процесса пиролиз рисовой шелухи служит моношихтой для синтеза SiC, так как в составе имеет SiO_2 и С. Для полного определения образования SiC шихтовые материалы требуют тщательного исследования, чтобы описать и охарактеризовать фазовые превращения при нагреве. С целью определения физико-химических свойств, при термической обработке шихтовые материалы исследованы на ДТА в интервале температур 30–1250 °С. Полученные результаты термического анализа дают возможность, потенциально оценить процесс синтезирования карбида кремния.

Ключевые слова: микрокремнезем, нефтекокс, кремнеуглерод, дифференциально-термический анализ, восстановитель, карбид кремния.

FTAMP 52.45.21
https://doi.org/10.48081/GDOV2218

А. А. Мухтар[1], А. С. Макашев[2], *Б. К. Касымова[3], Е. В. Кочегина[4], М. М. Атахан[5]
[1,2,3,5]Ж. Әбишев атындағы Химия-металлургия институты»,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4]Академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9412-3922
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7087-3937
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2549-5268
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7329-4095
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8652-2955
*e-mail: bkosimova@mail.ru

ТЕХНОГЕНДІК МАРГАНЕЦ ҚАЛДЫҚТАРЫН МАГНИТТІК БАЙЫТУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста Жезді байыту фабрикасының техногендік марганец қалдықтарын (Mn – 10,6 %, Fe – 2,7 %, SiO_2 – 59,8 %) құргақ жоғары градиентті магниттік сепарациялау параметрлерін оңтайландыру жолдары зерттелді. Минералогиялық талдаулар барысында марганецтің негізінен әлсіз магнитті оксидтік фазаларда (браунит, псиломелан) шоғырланғаны көрсетілді. Өз барысында бұл қуатты магнит өрістерін қолдану керектігін негіздеді. Зертханалық сынақтар РС-В 12/10-12.018 -2012 ленталы магниттік сепарация қондырғысында 0,5–1,1 Тл индукциялар аралығында үш сатылы схема бойынша жүргізілді. Негізгі сепарация (1,1 Тл) жүргізілді және алынған жартылай өнімді екі рет қайта тазалау (0,7 және 0,5 Тл) нәтижесінде түпкілікті магниттік концентратта марганецтің мөлшері 29,07 %-га жетіп, бастапқы құрамға қарағанда шамамен үш есеге артты; Mn-ті техногендік қалдықтан жалпы бөліп алу 66,82 %-ды құрап, концентрат шығымы 24,34 % болды. Кремний оксидінің үлесі 59,8 %-дан ≈ 33 %-га дейін төмендеп, концентраттың металлургиялық сапасы айтарлықтай жақсарды. Ұсынылған құргақ жоғары қарқынды магниттік сепарация технологиясы техногендік марганец қалдықтарын тиімді қайта ұқсату және металлургиялық өңдеуге жарамды тауарлық концентрат алуға зор мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: марганец, техногендік минералды шикізат, қалдықсақтау, рентгенофазалық талдау, магниттік сепарация, марганец минералдары, кремний оксиді.

Кіріспе

Қазіргі уақытта техногендік минералдық шикізат келешегі зор, бәсекеге қабілетті әрі үнемі жаңарып отыратын ресурс екені жалпыға танылған [1, 3-4-бб.] [2, 16-18 бб.] [3; 4; 5; 6]. Техногендік минералдық түзілімдерге (ТМТ)

деген қызығушылықтың артуы жұмыс істеп тұрған кен орындарының қоры мен кен сапасының біртіндеп нашарлауымен түсіндіріледі, ал ТМТ-да табиғи кен орындарымен салыстыруға болатын көлемде шикізат шоғырланған. Бұған қоса, бұл материалдар алдын-ала өңдіріліп, жер бетінде орналастырылған, ірілендірілген және пайдалы минералдардың бір бөлігі бос тау-кен жыныстарынан ішінара босаған.

Жоғарыда келтірілген уәждер марганец кендерін байыту кезінде түзілетін қалдықтарға да тән. Көп жағдайда байыту үдерісінде марганец толық бөлініп алынбай, оның елеулі бөлігі қалдықтарда жинақталады [7; 8].

Қазақстанда марганецтің ірі техногендік қоры Жезді байыту фабрикасының қалдыққоймасында шоғырланған. Аталған қалдықтың жалпы қоры мынадай: С1 санаты – 1 804,7 мың т, С2 санаты – 512,2 мың т; орташа Mn мөлшері – 9,08 % [9, 76-79 бб.].

Мемлекеттік кадастр деректері бойынша қалдықтардың орташа химиялық құрамы, %: Mn 10,5; Fe 1,98; SiO_2 32,0; Al_2O_3 7,2; CaO 3,1; MgO 1,2; Sr 0,04; Zn 0,02; Rb 0,018; Ag 1,6 г/т; Au 0,1 г/т [10].

Материалдар мен әдістер

Жұмыстың мақсаты – марганец өндірісіндегі техногендік қалдықтарын қайта өңдеу бойынша зерттеулер жүргізу.

Зертханалық байытылу сынақтарын жүргізу үшін жер қойнауын пайдаланушы Жезді қалдық қоймасынан келесі марганец мөлшері бар өкілетті сынамалар ұсынды: № 1 – 9,82%; № 2 – 10,23%; № 3 – 11,60 %.

Аталған сынамаларды біріктіру арқылы алынған технологиялық орташа сынаманың химиялық құрамы, %: Mn – 10,59; Fe – 2,74; SiO_2 – 59,82. Ылғалдылығы – 5,0 %, үйінді салмағы – 1,52 г/см³, зерттеулер үшін салмағы 0,5 кг сынама алынды. Микроскопиялық тұрғыдан материал текстуралық-құрылымдық және литологиялық белгілері бойынша кремний-әктас жыныстарына тән типтік марганецті рудалық материалмен ұсынылған.

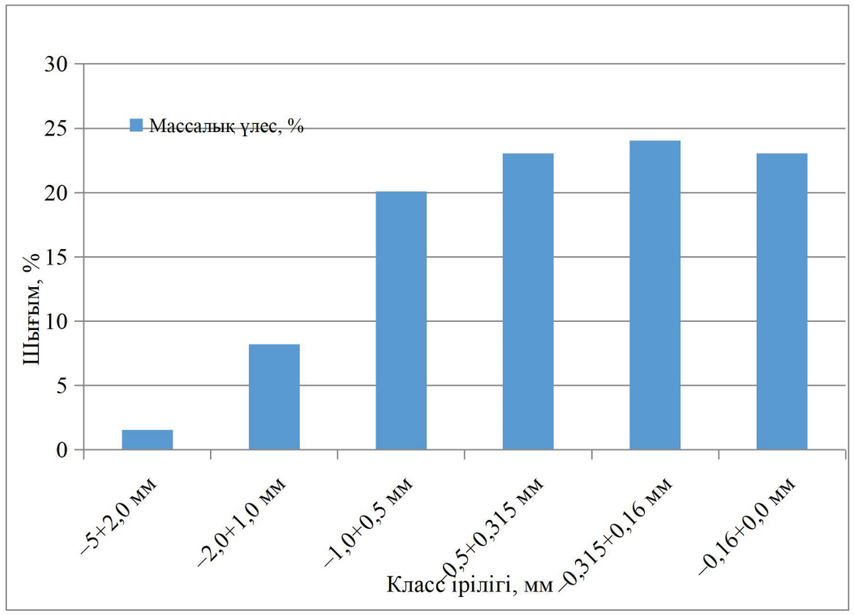
Кен құрамындағы негізгі минералдар – браунит, псиломелан; екінші реттегі минералдар – пиролюзит, родохрозит, манганит, гематит, родонит. Кендік емес компоненттерді негізінен кварц пен силикат-карбонатты балшықты құмтастар құрайды. Темір минералдары магнетит, лимонит және гематит, мартит түрінде кездеседі.

PANalytical маркалы рентгенофазалық талдау қондырғысында өткізілген зерттеу сынамада негізінен браунит ($3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$) пен псиломелан ($MnO \cdot MnO_2 \cdot nH_2O$) түріндегі марганец минералдарының, аз мөлшерде гематит, магнетит және лимониттің бар екенін растады. Кендік емес бөлікке калийлі дала шпаты, кварц, микроклин, серицит, каолинит, кальцит, хлорит және гипс жатады.

Зертханалық сынақтар РС-В 12/10-12.018 -2012 ленталы магниттік сепарация қондырғысында, марганец минералдары әлсіз магнитті материалдар тобына жататын болғандықтан 0,5–1,1 Тл магниттік индукциялар аралығында жүргізілді.

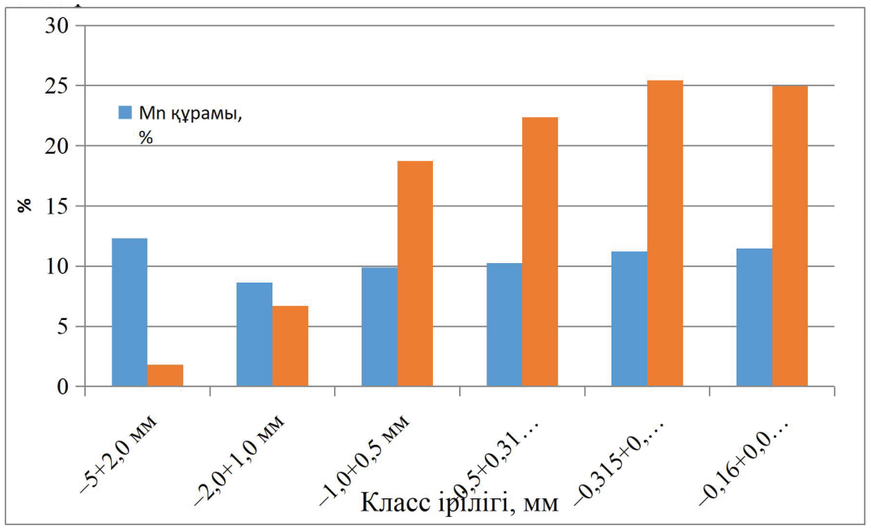
Гранулометриялық талдау Retsch GmbH AS 200 digit cA электромагниттік елеуішінде жүргізілді. Сынама стандартты елек жиынтығы арқылы 15 мин бойы

елеуден өткізіліп, әр фракцияның массалық үлесі аналитикалық таразымен (дәлдігі ±0,01 г) өлшенді. Алынған деректер 1,2-суреттерде график түрінде келтірілді.



1-сурет – Сынаманың ірілік кластарының шығымы бойынша гранулометриялық құрамы

Жоғарыда берілген [Сурет 1] материал шығымының басым бөлігі –0,315+0,16 мм (24,03 %) және –0,16+0,00 мм (23,05 %) фракцияларында екендігін көрсетеді. Оларға –0,5+0,315 мм фракциясын қосқанда, қалдық массасының > 70 %-ы 0,5 мм-ден ұсақ дәндерге тиесілі.



2-сурет – Сынаманың ірілік кластарындағы Mn мөлшері мен таралу көрсеткіші

2-ші суретте марганецтің ең көп үлесі де дәл осы ұсақ фракцияларға шоғырланған: –0,315+0,16 мм (25,44 %) және –0,16+0,00 мм (24,97 %). Фракция –0,5+0,315 мм тағы 22,36 % Mn береді. 1 мм-ден ірі дәндер барлық Mn-ның тек ≈ 8,5 %-ын қамтиды.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Жезді қалдықтарының гранулометриялық құрамында 0,5 мм-ге дейінгі ұсақ фракциялар басым, олардың үлесі жалпы массаның 70 %-дан астамын құрайды. Дәл осы фракциялар марганецтің негізгі қорын қамтиды: Mn-ның жартысынан көбі –0,315+0,16 мм және –0,16+0,00 мм фракцияларында, ал –0,5+0,315 мм фракциясында тағы төрттен бірі жинақталған. Ұсақ дәндердегі Mn мөлшері шамамен 11 % деңгейінде, бұл оларды мақсатты түрде байытуға мүмкіндік береді. 1 мм-ден ірі фракциялар марганецке бай болғанымен, олардың материалдық шығымы аз, сондықтан оларды өңдеу экономикалық тұрғыдан шектеулі болуы мүмкін. Осылайша, технологиялық схемада 0,5 мм-ден ұсақ материалды магниттік әдіспен өңдеуге басымдық беру ұсынылады.

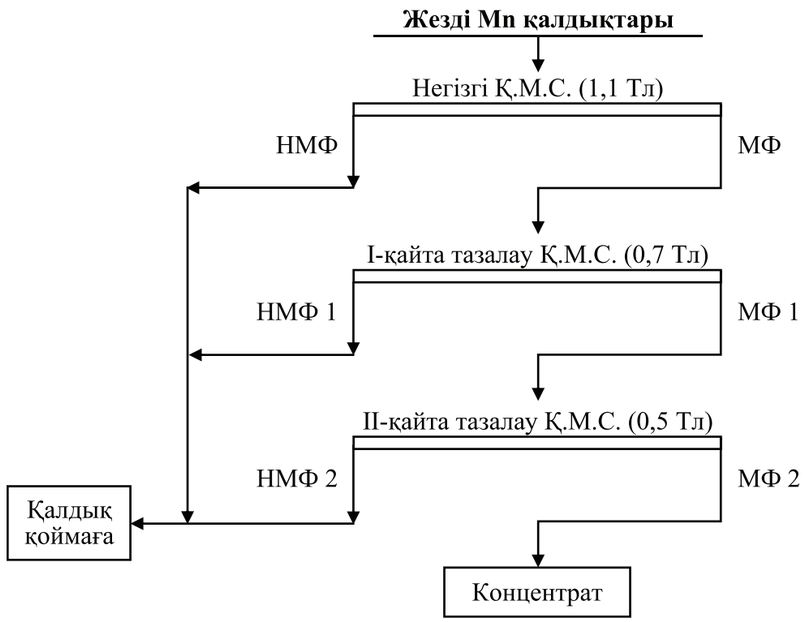
Нәтижелер және талқылау

Заттық құрамы мен магниттік қасиеттеріне қарап, қарастырылып отырған қалдық сынамасы қуатты магнит өрісіндегі құрғақ тәсілмен магниттік бөлуді қолдану мүмкіндігін туындырады, өйткені марганецтің басым бөлігі әлсіз магнитті минералдарда шоғырланған. Гранулометриялық құрамы, %: –5,0 + 2,0 мм – 1,36; –2,0 + 1,0 мм – 8,20; –1,0 + 0,5 мм – 28,06; –0,5 + 0,315 мм – 19,29; – 0,315 + 0,16 мм – 22,00; –0,16 мм және ұсақ – 21,09.

Мұндай жағдайда жоғары қарқынды магнитті сепараторлар браунит, псиломелан және басқа марганец оксидтерінің майда сеппелі түйірлерін тартуға

қабілетті қуатты магниттік градиент түзеді, ал магнитті емес компоненттер (кварц, дала шпаты, балшықты минералдар) қалдыққа өтеді. Құрғақ әдіс су тұтынуды және өнімді кейінгі сусыздандыруды қажет етпейді, бұл жалпы шығындарды азайтып, технологияны оңайландырады.

Сынаманың құрғақ магниттік сепарациясы РС-В 12/10-12.018 – 2012 сепараторында индукциясы 0,5-1,1 Тл магнит өрісінде жүргізілді. қағидалық сұлба 1-суретте, ал нәтижелері 1-кестеде келтірілген.



3-сурет – Жезді қалдықтарын құрғақ магнитті сепарациясының (Қ.М.С.) қағидалық сұлба

(МФ, НМФ – магнитті және магнитті емес фракциялар)

1-кесте – РС-В 12/10-12.018 – 2012 қондырғысында құрғақ магниттік сепарацияның нәтижелері

№	Өнім	Шығым, γ, %	Құрамы, β, %			Бөліп алу көрсеткіші, Е, %		
			Mn	Fe	SiO_2	Mn	Fe	SiO_2
Магнит индукциясы – 1,1 Тл								
1	Бастапқы шикізат	100,00	10,59	2,74	59,82	100,00	100,00	100,00
2	МФ	54,77	16,95	4,30	46,43	87,66	86,00	42,51
3	НМФ	45,23	2,89	0,85	76,04	12,34	14,00	57,49
	Барлығы	100,00	10,59	2,74	59,82	100,00	100,00	100,00
Магнит индукциясы – 0,7 Тл								
1	МФ	100,00	16,95	4,30	46,43	100,00	100,00	100,00
2	МФ 1	62,70	23,04	5,07	37,77	85,20	73,90	51,01
3	НМФ 1	37,30	6,72	3,01	60,98	14,80	26,10	48,99
	Барлығы	100,00	16,95	4,30	46,43	100,00	100,00	100,00
Магнит индукциясы – 0,5 Тл								
1	МФ 1	100,00	23,04	5,07	37,77	100,00	100,00	100,00
2	МФ 2	70,87	29,07	5,23	32,86	89,42	73,11	61,66
3	НМФ 2	29,13	8,37	4,68	49,71	10,58	26,89	38,34
	Барлығы	100,00	23,04	5,07	37,77	100,00	100,00	100,00

Концентраттың жалпы шығымы (γ) 24,34%, Mn жалпы бөліп алу көрсеткіші (ЄMn) 66,82 % құрады.

Әрбір байыту кезеңнің тиімділігі

1. Құрғақ магниттік сепарацияның негізгі сатысында марганецтің басым бөлігі магниттік фракцияға өтеді. Магниттік өнімнің массалық шығымы бастапқы материалдың шамамен 54,77 %-ын құрайды, ал Mn мөлшері ≈ 16,95 %. Бұл бастапқы қалдықтардағы марганец құрамынан (10,59 %) едәуір жоғары; демек, бірінші кезеңде-ақ марганецтің байуы шамамен 1,6 есеге жетеді. Mn-ды магниттік фракцияға бөліп алу көрсеткіші ≈ 87,66 %, яғни марганецтің негізгі бөлігі концентратқа жинақталады. Кремний оксидінің шамамен жарты бөлігі немагниттік фракцияға өтеді, яғни магниттік фракцияда оның мөлшері 59,82 %-тен 46,43 %-ке дейін азаяды. Ал магниттік емес өнім (45,23%) марганец мөлшері өте аз (2,89 %), әрі SiO_2 = 76,04 % силикатты магнитті емес фракцияның бөлінгенін көрсетеді.

Алынған магнитті фракцияны (МФ) 0,7 Тл-да I-қайта тазалау сатысында оның сапасының артқаны байқалды. Магниттік фракциясының (МФ 1) Mn құрамы ≈ 23,04%, ал шығымы – бастапқы концентрат массасының ≈ 62,70 %-ы. Осы сатыда

бөлінген магниттік емес фракцияда (НМФ 1) Mn небәрі ≈ 6,72 % құрайтын, SiO_2-ға бай бос тау жыныстарынан тұрады. Нәтижесінде SiO_2 мөлшері концентратта 46,43%-дан 37,77 %-ға дейін азаяды. Марганецті бөліп алу көрсеткіші ≈ 85,20%.

Магнитті сепарацияның соңғы сатысы (0,5 Тл-да II-қайта тазалау) ең бай концентратты береді. Магниттік фракциясының (МФ 2) Mn құрамы 29,07% және SiO_2 = 32,86 %; яғни кремний оксиднің үлесі бастапқы шикізатқа қарағанда шамамен екі есе төмен. Бұл түпкілікті концентраттың шығымы қайта тазалауға берілген массаның 70,87 %-ын, ал бастапқы шикізаттың шамамен 24,34 %-ын құрайды. Осы сатыдағы магнитті фракцияға Mn-ты бөліп алу көрсеткіші ≈ 89,42 %. НМФ2-де бар-жоғы Mn 8,37 % және SiO_2 49,71 % бар, негізінен бос тау жыныстары жинақталған. Нәтижесінде түпкілікті концентратта бастапқы марганецтің 66,82%-ы шоғырлануы себепті оның сапасы айтарлықтай жоғарылады.

Үш сатылы құрғақ магниттік сепарация Жезді марганец қалдықтарынан марганецті тиімді бөліп, кремний оксиді негізіндегі қоспалардан арылтады. Негізгі магнитті сепарацияда марганецтің 16,95 %-ы алынса, қайта тазалау сатыларынан кейін оның мөлшерін 29,07 %-ға дейін артып, SiO_2 үлесі айтарлықтай азайды. Түпкілікті магниттік концентрат (бастапқы шикізаттың 24,34 %-ы) бастапқы марганецтің 89,42 % бөлігімен бірге жоғары тазалыққа ие. Mn-ті жалпы бөліп алу көрсеткіші 66,82 % деңгейінде алынды. Осылайша, үш сатылы құрғақ магниттік сепарация үрдісі бастапқы қалдыққа қарағанда марганец мөлшерін үш есеге жуық арттырып, металлургиялық өңдеу сапа шартына сай концентрат алынды.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу №BR23991563 ЖРН бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру шеңберінде орындалды.

Исследование выполнено в рамках программно-целевого финансирования ИРН №BR23991563.

The study was carried out under the program-targeted funding of the IRN №BR23991563.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер Жезді байыту фабрикасының марганец қалдықтарын үш сатылы құрғақ жоғары градиентті магниттік сепарация әдісімен өңдеудің орындылығы мен жоғары тиімділігін дәлелдеді. Химиялық-минералогиялық талдау қалдықтардағы марганецтің (10,59%) басым бөлігі әлсіз магнитті оксидтік минералдар (браунит, псиломелан) түрінде екендігін, ал кремнезём мен балшықты компоненттердің магнитті емес фракцияларда шоғырланғанын көрсетті. Бұл 0,5-1,1 Тл индукциялы РС-В 12/10-12.018 – 2012 магнит сепараторын пайдаланып, суды тұтынбайтын құрғақ тәсілді таңдауды негіздеді.

Жезді қалдықтарын құрғақ магнитті сепарациясының қағидалық сұлбасы негізгі сепарацияны (1,1 Тл) және екі қайта тазалау сатысын (0,7 және 0,5 Тл) қамтыды. Бірінші кезеңде магниттік фракциядағы Mn 16,95 %-ға дейін өсті (бөлініп алу 87,7 %). Түпкілікті тазалаудан кейін концентраттағы Mn 29,07 %-ға жетіп, жалпы бөліп алу көрсеткіші 66,82 %, ал концентрат шығымы бастапқы массаға шаққанда 24,34 % болды. SiO_2 үлесі 59,82 %-ден 32,86 %-ға дейін төмендеді, бұл

шикізаттың сандық-сапалық көрсеткіштерінің едәуір жақсарғандығының белгісі. Нәтижесінде марганецтің мөлшері шамамен үш есеге артты, ал алынған өнім металлургия өндірісіне жарамды тауарлық концентрат деңгейіне жетті.

Алынған нәтижелер жартылай өнеркәсіптік сынақтарға өту және тәжірибелік-өндірістік қондырғыны жобалау үшін берік ғылыми-техникалық негіз қалыптастырады. Жалпы, ұсынылған технология Қазақстандағы марганецке бай техногендік минералдық түзілімдерді қайта игерудің мүмкінділігін көрсетіп, басқа өңірлердегі ұқсас нысандар үшін үлгі бола алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Чантурия, В. А., Козлов, А. П.** Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья [Текст] // Мат-лы Междунар. науч. конф. «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья» (Плкасинские чтения-2017). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 3–6.

2 Технологическая оценка минерального сырья. Разработка технологии обогащения руд: Справочник / Под ред. Остапенко, П. Е. – М. : Недра, 1992. – 414 с. ISBN: 5-247-00927-4

3 **Быховский, Л. З., Спорыхина, Л. В.** Техногенные отходы как резерв пополнения минерально-сырьевой базы: состояние и проблемы освоения [Текст] // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2011. – № 4. – С. – 15–20. – [Электронды ресурс]. – https://elibrary.ru/item.asp?id=16716669

4 **Нефедова, И. Н., Лотов, В. А., Крашенинникова, Н. С.** Техногенные отходы как дополнительный источник сырья [Текст] // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 4. – С. 148–149. – [Электронды ресурс]. – https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=12590

5 **Singh, V., Chakraborty, T., & Tripathy, S. K.** A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes. [Text] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2019. – Vol. 41(6). – P. 417–438. – https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1634567

6 **Чантурия, В. А., Шадрунова, И. В., Горлова, О. Е., Орехова, Н. Н.** Формирование ресурсосберегающих технологий переработки вторичного металлсодержащего сырья на основе принципов адаптации [Текст] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 1. – С. 347–360.

7 **Jamieson, H. E., Walker, S. R., Parsons, M. B.** Mineralogical characterization of mine waste [Text] // Applied Geochemistry. – 2015. – Vol. 57. – P. 85–105. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.014

8 **Ужкенов, Б. С., Мазуров, А. К., Селифонов, Е. М. и др.** Состояние сырьевой базы железных, марганцевых и хромитовых руд Казахстана и перспективы развития черной металлургии на период до 2030 года [Текст] // Индустрия Казахстана. – 2003. – № 10(18). – С. 23–24. – [Электронды ресурс]. – https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vhsnxr

9 **Мустахимов, А. Т., Зейнуллин, А. А., Мусин, М. Т.** Исследование вещественного состава и обогатимости марганецсодержащих хвостов Жездинской обогатительной фабрики [Текст] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2020. – № 3. – С. 75–82. – https://doi.org/10.17513/mjpfi.13039

10 Министерство экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 2018. – Информация об организации обращения с отходами в регионах Республики Казахстан Retrieved from. [Электронды ресурс]. – https://ecogosfond.kz/kz-ndiris-zh-ne-t-tynu-aldy-taryny-memlekettik-kadastry-ru-gosudarstvennyj-kadastr-othodov-proizvodstva-i-potreblenija

REFERENCES

1 **Chanturiya, V. A., Kozlov, A. P.** Sovremenny`e problemy` kompleksnoj pererabotki trudnoobogatimy`x rud i texnogennogo sy`r`ya [Modern problems of complex processing of hard-to-process ores and technogenic raw materials] [Text] // Mat-ly` Mezhdunar. nauch. konf. «Sovremenny`e problemy` kompleksnoj pererabotki trudnoobogatimy`x rud i texnogennogo sy`r`ya» (Plkasinskie chteniya-2017). – Krasnoyarsk : Sib. feder. un-t, 2017. – P. 3–6.

2 Texnologicheskaya ocenka mineral`nogo sy`r`ya. Razrabotka texnologii obogashheniya rud: Spravochnik [Technological assessment of mineral raw materials. Development of ore beneficiation technology] [Text] // Pod red. Ostapenko, P. E. – M. : Nedra, 1992. – 414 p. – ISBN:5-247-00927-4.

3 **By`xovskij, L. Z., Spory`xina, L. V.** Texnogenny`e otxody` kak rezerv popolneniya mineral`no-sy`r`evoj bazy`: sostoyanie i problemy` osvoeniya[Technogenic wastes as a reserve for replenishment of mineral resource base: status and problems of development] [Text] // Mineral`ny`e resursy` Rossii. E`konomika i upravlenie. – 2011. – № 4. – P. – 15–20. – [Electronic resource]. – https://elibrary.ru/item.asp?id=16716669

4 **Nefedova, I. N., Lotov, V. A., Krasheninnikova, N. S.** Texnogenny`e otxody` kak dopolnitel`ny`j istochnik sy`r`ya [Technogenic waste as an additional source of raw materials] [Text] // Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. – 2004. – № 4. – P. 148–149. – [Electronic resource]. – https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=12590

5 **Singh, V., Chakraborty, T., & Tripathy, S. K.** A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes. [Text] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2019. – Vol. 41(6). – P. 417–438. – https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1634567

6 **Chanturiya, V. A., Shadrunova, I. V., Gorlova, O. E., Orexova, N. N.** Formirovanie resursosberegayushhix texno logij pererabotki vtorichnogo metallsoderzhashhego sy`r`ya na osnove principov adaptacii [Formation of resource-saving technologies for processing of secondary metal-containing raw materials based on the principles of adaptation] [Text] // Gorny`j informacionno-analiticheskij byulleten`. – 2017. – № 1. – P. 347–360.

7 **Jamieson, H. E., Walker, S. R., Parsons, M. B.** Mineralogical characterization of mine waste [Text] // Applied Geochemistry. – 2015. – Vol. 57. – P. 85–105. – https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.014

8 **Uzhkenov, B. S., Mazurov, A. K., Selifonov, E. M. i dr.** Sostoyanie sy`r`evoj bazy` zhelezny`x, margancevy`x i xromitovy`x rud Kazaxstana i perspektivy` razvitiya chernoj metallurgii na period do 2030 goda [State of raw material base of iron, manganese and chromite ores of Kazakhstan and prospects of development of ferrous metallurgy for the period up to 2030] [Text] // Industriya Kazaxstana. – 2003. – № 10(18). – P. 23–24. – [Electronic resource]. – https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vhsnxr

9 **Mustaximov, A. T., Zejnullin, A. A., Musin, M. T.** Issledovanie veshhestvennogo sostava i obogatimosti marganeczsoderzhashhix xvostov Zhezdinskoj obogatitel`noj fabriki [Study of material composition and enrichability of zhezdy processing plant manganiferous tailings] [Text] // Mezhdunarodny`j zhurnal prikladny`x i fundamental`ny`x issledovanij. – 2020. – № 3. – P. 75–82. – https://doi.org/10.17513/mjpfi.13039

10 Ministerstvo e`kologii, geologii i prirodny`x resursov Respubliki Kazaxstan. 2018. – [E`lektronny`j resurs]. Informaciya ob organizacii obrashheniya s otxodami v regionax Respubliki Kazaxstan Retrieved from. – [Electronic resource]. – https://ecogosfond.kz/kz-ndiris-zh-ne-t-tynu-aldy-taryny-memlekettik-kadastry-ru-gosudarstvennyj-kadastr-othodov-proizvodstva-i-potreblenija

01.07.25 ж. баспаға түсті.
15.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
08.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. А. Мухтар[1], А. С. Макашев[2], *Б. К. Касымова[3],
Е. В. Кочегина[4], М. М. Атахан[5]
[1,2,3,5]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[4]Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетов,
Республика Казахстан г. Караганда.
Поступило в редакцию 01.07.25.
Поступило с исправлениями 15.07.25.
Принято в печать 08.08.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ МАРГАНЦА

В работе исследована оптимизация параметров сухой высокоградиентной магнитной сепарации техногенных марганцевых хвостов Жездинской обогатительной фабрики (Mn – 10,6 %, Fe – 2,7 %, SiO_2 – 59,8 %). Минералогический анализ показал, что марганец сосредоточен главным образом в слабомагнитных оксидных фазах (браунит, псиломелан), что обосновывает применение мощных магнитных полей. Лабораторные испытания проведены на установке РС-В 12/10-12.018 – 2012 при индукциях 0,5–1,1 Тл по трёхстадиной схеме. В результате основной сепарации (1,1 Тл) и двух перечисток (0,7 и 0,5 Тл) содержание марганца в конечном магнитном концентрате достигло 29,07 %, увеличившись примерно втрое по сравнению с исходным; суммарное извлечение Mn составило 66,82 %, выход концентрата — 24,34 %. Доля оксида кремния снизилась с 59,8 % до 33 %, что существенно повысило металлургическое качество концентрата. Предложенная технология сухой высокоинтенсивной магнитной сепарации обеспечивает эффективную переработку техногенных марганцевых отходов и получение товарного концентрата, пригодного для металлургической переработки.

Ключевые слова: марганец, техногенное минеральное сырье, хвостохранилище, рентгенофазовый анализ, магнитная сепарация, минералы марганца, оксид кремния.

A. A. Mukhtar[1], A. S. Makashev[2], *B. K. Kasymova[3],
E. V. Kochegina[4], M. M. Atahan[5]
[1,2,3,5]Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[4]Karaganda University named after Academician E. A. Buketov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
Received 01.07.25.
Received in revised form 15.07.25.
Accepted for publication 08.08.25.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF MAGNETIC ENRICHMENT OF TECHNOGENIC MANGANESE WASTES

Optimization of parameters of dry high-gradient magnetic separation of technogenic manganese tailings of Zhezda concentrating plant (Mn – 10.6 %, Fe – 2.7 %, SiO_2 – 59.8 %) was investigated. Mineralogical analysis showed that manganese is concentrated mainly in weakly magnetic oxide phases (brownite, psilomelane), which justifies the use of powerful magnetic fields. Laboratory tests were carried out on the PC-V 12/10-12.018-2012 unit at inductions of 0.5-1.1 T according to the three-stage scheme. As a result of the main separation (1.1 T) and two purges (0.7 and 0.5 T), the manganese content in the final magnetic concentrate reached 29.07 %, having increased by about three times compared to the initial one; total recovery of Mn was 66.82 % and concentrate yield was 24.34 %. The share of silicon oxide decreased from 59.8 % to 33 %, which significantly increased the metallurgical quality of the concentrate. Proposed technology of dry high-intensity magnetic separation ensures efficient processing of technogenic manganese wastes and production of commercial concentrate suitable for metallurgical processing.

Keywords: manganese, technogenic mineral raw materials, tailings, X-ray phase analysis, magnetic separation, manganese minerals, silicon oxide.

ҒТАМР 53.31.19

https://doi.org/10.48081/NPXB8484

***М. А. Тулепова[1], Св. С. Квон[2], К. Ю. Окишев[3]**

[1,2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;

[3]Ресейдің тұңғыш Президенті Б. Н. Ельцин атындағы Орал федералды университеті, Ресей Федерациясы, Екатеринбург қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1560-0161

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6331-3050

*e-mail: moldir_a_nur@mail.ru

ЖОҒАРЫ ХРОМДЫ ШОЙЫНДАРДА ӘРТҮРЛІ САЛҚЫНДАУ ЖЫЛДАМДЫҚТАРЫНДА КАРБИДТІК ФАЗАНЫҢ ТҮЗІЛУІ

Бұл мақалада жоғары хромды ЧХ16 маркалы шойынның әртүрлі салқындау жылдамдықтары жағдайында кристалдану кезіндегі құрылымдық ерекшеліктері мен пайдалану қасиеттеріне әсері жан-жақты зерттелді. Қорытпа құрамына легірлеуші қоспалар ретінде шамамен 1,5 % масс. ниобий, сондай-ақ ванадий мен титан әрқайсысы 0,7 % масс енгізілді. Металл үш түрлі қалыпқа – металл, қабықша және құм-балшықты қалыптарына құйылды, бұл кристалдану кезінде кезінде әртүрлі салқындау жылдамдықтарын қамтамасыз етті. Микроқұрылымдық талдау нәтижелері салқындау жылдамдығы төмендеген сайын $Me1_{7}C$ типті күрделі карбидтердің айқын таралуымен түзілуі артатынын көрсетті. Құм-балшық қалыптағы үлгіде карбидтік фаза жоғары көлемдік үлеске ие болып, қаттылық пен тозуға төзімділікті едәуір арттырды. Қаттылық тек 17 % артқанымен, тозуға төзімділік 30 %-дан астамға жоғарылады. Мұндай әсер құрылымда салыстырмалы түрде жұмсақ қатты фазалардың біркелкі таралуымен түсіндіріледі. Керісінше, металл қалыпта жылдам салқындау барысында карбидтер түзілуге үлгермей, құрылымда олар шектеулі күйде қалады. Бұл құбылыс қорытпаның механикалық қасиеттеріне теріс әсер етеді. Зерттеу қорытындысы бойынша, карбид элементтердің тиімді әрекет етуі үшін салқындау жылдамдығы тепе-теңдік жағдайына жақын болуы қажет. Мұндай жағдайда күрделі карбидтік фазалар оңай қалыптасып, шойынның жұмысқа төзімділігін арттырады. Бұл нәтижелер өндірістік шойындарды жетілдіруде, құю технологиясын оңтайландыруда және жаңа тозуға төзімді материалдарды жобалауда практикалық маңызы бар.

Кілтті сөздер: жоғары хромды шойын, карбидтік фаза, қорытпа құрылымы, салқындау жылдамдығы, материал қаттылығы, тозуға төзімділік, легірлеуші элементтер, микроқұрылымдық талдау.

Кіріспе

Жоғары хромды ақ шойындар тозуға және агрессивті орталарға төзімділігімен ерекшеленетін материалдар қатарына жатады [1]. Бұл шойын түрі тау-кен және металлургия өнеркәсібінде кеңінен қолданылып, көбіне шламды сорғылардың жұмыс дөңгелектері, ұсату шарлары, конвейер таспаларының жұлдызшалары сынды бөлшектерді жасауға пайдаланылады [2]. Аталған шойындардың микроқұрылымы аустениттік матрицамен, цементитпен, және Me_3C, Me_7C_3 типті және т.б. карбидтермен сипатталады. Карбидтердің құрамы, пішіні, өлшемі және құрылымдағы таралу сипаты шойынның қаттылығы мен тозуға төзімділігіне айтарлықтай әсер етеді [3]. Карбид түзуші элементтердің шойын қасиеттеріне әсерін зерттеуге арналған көптеген ғылыми еңбектер бар. Нақтырақ айтқанда, ниобийдің жоғары хромды шойындардың тозу төзімділігіне әсерін [4-7] еңбектерінде қарастырған. Барлық жұмыстарда ниобийдің шойынның қаттылығын және тозуға қарсы тұру қабілетін жақсартатыны айтылған. Алайда, ниобий мөлшері 3,98 масс.% асқан кезде тозуға төзімділіктің артуы байқалмайды, бұл карбидтердің жарылғыш сипатымен түсіндіріледі [4]. Ванадийдің де шойын құрылымындағы орны маңызды. Зерттеу нәтижелері бойынша [8], матрицада да, карбидтік фазада да болады. Оның мөлшері 4,78 масс.% жеткенде $V_{23}C_6$ типті карбидтердің үлесі айтарлықтай артады және бұл қаттылық пен тозуға төзімділіктің жоғарылауына себеп болады. [9] жұмыста ванадий, ниобий, титанның бірлескен әсері зерттеліп, бұл элементтердің қосылуы шойынның құрылымын айтарлықтай өзгертетіні және қаттылығын арттыратыны анықталған. Атап айтқанда, ванадий эвтектикалық карбидтік фазаға толық өтіп, оның көлемін ұлғайтады, ал ниобий мен титан NbC және TiC типті карбидтерді түзіп, құрылымды майдалandырады және қаттылықты жоғарылатады [10]. Жоғарыда келтірілген әдебиеттік шолу көрсеткендей, карбид түзуші элементтерді қолдану арқылы шойынның тозуға төзімділік сипаттамаларын жақсартуға болады, алайда, карбидтердің түзілу процесінің кристалдану жылдамдығымен байланысы толық зерттелмеген.

Материалдар мен әдістер

Зерттелетін қорытпа УИП-25 типті индукциялық пеште жаңартылған салқындату жүйесінің көмегімен балқытылды. Қосымша көміртектенудің алдын-алу үшін балқыту үрдісі алундты тигельде жүргізілді. Шихта ретінде ЧХ16 маркалы шойын сынықтары алынып, құрамына ферротитан, ферониобий және феррованадий қосылды. Қосылған ферроқорытпалар нәтижесінде соңғы қорытпадағы қоспа элементтердің мөлшері ванадий мен титан – әрқайсысы 0,7 масс. %, ниобий - шамамен 1,5 масс. % болды. Массалық үлесі 90 % кем болмайтын фракциясы ≤ 5 мм ұнтақталған түріндегі ферроқоспалар балқытудың соңғы 20 минутында енгізілді. 1-кестеде қолданылған шихталық материалдарың құрамы келтірілген.

Қорытпа құм-балшық, металл және қабықша қалыптарға құйылды. Қабықша қалыптың қалыптың қалыңдығы 10 мм болып, металл бұршақпен нығайтылды. Барлық үлгілердің өлшемі 60×100 мм цилиндр түрінде болды. Әртүрлі қалыптар қорытпаның әртүрлі салқындау жылдамдықтарын қамтамасыз етті.

Салқындау жылдамдығы құю температурасы 1460 °С және үлгінің салқындаған температурасы 100 °С арасындағы айырмашылық пен кристалдану уақытына негізделіп есептелді. Құю және үлгі температуралары ППР типті термопарамен және Flir E60 жылукамерасымен сәйкесінше өлшенді. Салқындау жылдамдығы құм-балшық қалып үшін шамамен 3,50 °С/мин, қабықша қалып үшін – 5,65 °С/мин, металл қалып үшін – 80 °С/мин шамасында болды.

Салқындағаннан кейін үлгілер стандартты үлгі дайындау кезеңдерінен өтті. Бұл жұмыстар Struers компаниясының жабдықтарымен CitoPress-15 престеу құрылғысы мен LaboPol-5 тегістеу-жылтырату құрылғысы арқылы іске асырылды. Қорытпаның химиялық құрамы PolySpek-F спектрометрімен анықталды. Құрылымды талдау үшін JEOL JSM-IT200 сканерлеуші электронды микроскопы және EDS жүйесі қолданылды. Үлгілердің қаттылығы Wilson VH-1150 (АҚШ) қаттылық өлшегішін пайдалану арқылы бағаланды. Үлгілердің үйкеліске төзімділігі Taber 5135 (АҚШ) айналмалы абразиметрінде H-18 типті абразивті дөңгелектермен және әр дөңгелекке 1000 г жүктемемен 10 000 айналымнан кейін анықталды. Тозуға төзімділік сынақтан кейінгі масса жоғалту арқылы есептелді:

$$l = \frac{m_2}{m_1}$$

Мұндағы, m_1 – үлгінің бастапқы салмағы, г
m_2 – үлгінің соңғы салмағы, г

1-кесте – Шихталық материалдардың құрамы

Элемент, % / Материал	C	Mn	Nb	Cr	Ti	Ta	Si	V	Al	P	S
ЧХ16	2,1	0,7	-	16,9	-	-	1,6	-	-	0,1	0,03
ФНб60	0,1	-	64,1	-	-	0,6	1,2	-	-	0,1	0,03
ФВд50	0,5	4,5	-	-	-	-	1,2	50,6	0,9	0,1	0,1
ФТи70	0,2	0,2	-	-	65-75	-	0,1	0,5	0,5	0,03	0,03

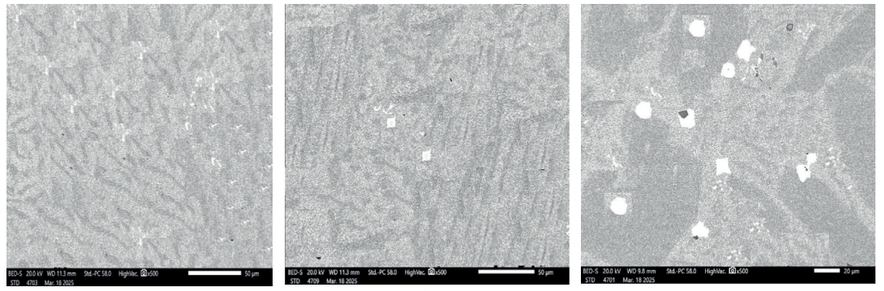
2-кестеде тәжірибелік қорытпаның химиялық құрамы келтірілген. Химиялық талдау кемінде 3 нүктеде жүргізіліп, кестеде орташа мәндер көрсетілген.

2-кесте – ЧХ16 шойыны мен тәжірибелік қорытпаның химиялық құрамы

Атауы	Элементтердің құрамы, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ti	V	Nb	P	S	Fe
ЧХ16 маркалы шойын (ГОСТ 7769-82)	1,6-2,4	1,5-2,2	0,96	13-19	-	-	-	0,1	0,05	қал
Тәжірибелік қорытпа	2,05	1,93	0,62	15,1	0,68	0,65	1,45	0,1	0,05	қал

Нәтижелер мен талқылау

2-кестедегі мәліметтерге сәйкес, тәжірибелік қорытпаның құрамы ЧХ16 шойынына арналған МЕМСТ талаптарына сай келеді, тек қосымша легірлеуші элементтерді қоспағанда, ванадий мен титанның мөлшері 0,7 масс.%, ал ниобий шамамен 1,5 масс.%. 1-суретте әртүрлі үш қалыпқа құйылып, сәйкесінше әртүрлі салқындау жылдамдығында кристалданған тәжірибелік қорытпалар құрамы көрсетілген.



а *б* *в*

1-сурет – тәжірибелік қорытпаның әртүрлі құю қалыптарында алынған:
а – металл қалып; б – қабықша қалып; в – құм-балшық қалып

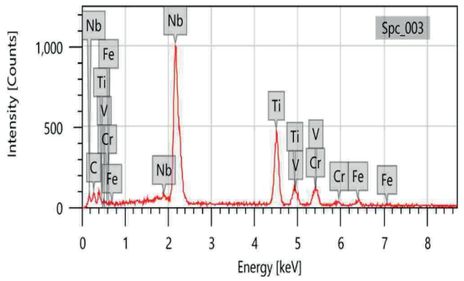
1а - суреттегі 1-үлгіде кристалдану барысында жоғары салқындау жылдамдығы әсерінен жоғары хромды шойындарға тән дисперсті құрылым қалыптасқаны байқалады: легірленген аустенит және цементит типті карбидтер (Me_3C), мұнда Me ретінде Fe, Cr, Mn элементтері болуы мүмкін. Бұл құрылымда NbC, TiC, VC типті карбидтер визуалды түрде анықталмады. Құрылымда жылу шығуының басым бағытына сәйкес айқын бағытталғандық байқалады.

1б – суретте қабықша қалыпқа құйылған 2-үлгінің құрылымы көрсетілген. Бұл жағдайда салқындау жылдамдығы 1-үлгімен (1а-сурет) салыстырғанда төмен болады. Соның нәтижесінде құрылымның дисперстілігі төмендеді және карбидтік фаза тек ішінара қалыптасты. Бұл фазалар құрылымда ұсақ кірінді пішінді ретінде көрсетілген.

Құм-балшық қалыпқа құйылған 3-үлгідегі (1в – сурет) құрылым сипаты айтарлықтай өзгереді. Мұндай қалыпта салқындау жылдамдығы тепе-теңдік

күйіне жақын құрылым түзілуіне елеулі әсер етеді. Үлгіде ірі, салыстырмалы түрде изометриялық түйіршіктері бар аустенитті-карбидті құрылым және айқын карбидтік фаза байқалады.

2-суретте цементиттік емес карбид фазасы ретінде анықталған аймақтарда жүргізілген ЭДС талдау нәтижелері келтірілген. Алынған деректерге сәйкес бұл фаза C, Cr, Ti, Nb, V және Fe элементтерінен тұрады, оның ішінде Ti мен Nb мөлшері басым. Мұндай элементтік құрам күрделі карбидтердің түзілуін көрсетеді және оларды Me1-xC формуласы бойынша сипаттауға болады.



Display name	Standard data	Quantification method	Result Type
Spc_003	Standardless	ZAF	Metal

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	11.58±0.33	42.95±1.24
Ti	K	22.51±0.41	20.93±0.38
V	K	2.56±0.18	2.24±0.16
Cr	K	7.13±0.27	6.11±0.23
Fe	K	2.64±0.18	2.10±0.14
Nb	L	53.58±0.69	25.68±0.33
Total		100.00	100.00
Spc_003			Fitting ratio 0.0767

2-сурет – 3-үлгіге жүргізілген ЭДС талдауының нәтижесі

Бірдей химиялық құрамға ие қорытпаның құрылымындағы айырмашылықтар оның қаттылығы мен тозуға төзімділігі қасиеттеріне елеулі әсер етуі мүмкін. 3- кестеде сынақ нәтижелері көрсетілген.

3-кесте – Қаттылық пен тозуға төзімділік бойынша сынақ нәтижелері

Үлгі	Қаттылық, HV	Салыстырмалы тозуға төзімділік
0 (ЧХ 16)	438	0,66
1	493	0,78
2	512	0,81
3	527	0,92

3-кестеде келтірілген мәліметтерге сәйкес, құм-балшық қалыпқа құйылған үлгі ең жоғарғы қаттылық пен тозуға төзімділікке ие. Бұл жағдай 3-үлгінің құрылымында айқын көрінетін карбидтік фазаның болуымен байланысты, ал мұндай фаза 1-үлгіде мүлдем жоқ және 2-үлгіде тек аз мөлшерде кездеседі. Егер қаттылық аздап артса, шамамен 17 %, онда тозуға төзімділік көрсеткіші де шамамен 30 % жоғарылайды. Осындай айқындық 3-үлгінің құрылымындағы жұмсақ матрицада біркелкі таралған қатты қосындылары бар Шарпи принципіне сәйкес келетінімен түсіндіріледі.

Қорытынды

Алынған нәтижелерге сүйене отырып, металл қалыпқа құю кезінде байқалатын жоғары салқындау жылдамдығы Nb, Ti және V сияқты карбид түзуші элементтер енгізілген жағдайда карбид фазасының түзілуіне мүмкіндік бермейтіні анықталды.

Бұл, өз кезегінде, қорытпаның қаттылығы мен тозуға төзімділігінің төмен болуына әсер етеді. Карбид түзуші элементтердің қаттылық пен тозуға төзімділікке тиімді әсер етуі үшін салқындау жылдамдығы тепе-теңдікке жақын болуы қажет, ал бұл құм-саз қалыпқа құю арқылы жүзеге асады.

Жүргізілген зерттеу нәтижелері салқындау жылдамдығының карбидтердің түзілу процесіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Химиялық құрамы бірдей болғанымен, әр түрлі салқындау жылдамдығында алынған үлгілердің құрылымы да әр түрлі болады-бұл тек дисперстік дәреже ғана емес, құрылымдық фазалардың сапалық құрамына да қатысты.

Жоғары салқындау жылдамдығында MeC типті карбид фазаларының түзілуі үшін уақыт жетіспейді, бұл қорытпаның механикалық қасиеттеріне теріс әсер етеді. Карбид түзушілердің тиімді әрекет етуі үшін салқындау жылдамдығы тепе-теңдік жағдайына жақын болуы қажет. Мұндай жағдайда ірі түйіршікті құрылым түзілуіне қарамастан $Me_{1-x}C$ типті карбидтер қалыптасады, бұл тұтас алғанда, қорытпаның қаттылығы мен тозуға төзімділігін арттырады.

REFERENCES

1 **Kvon, S. S.** Using high-chromium iron as material for production of the equipping components of mine shafts // Metallurgy (Croatia). – 2016. – Vol. 55. – № 2. – P. 206–208.

2 **Petrochenko, E. V., Molochkova, O. S., Trofimova, E. A.** Ways to increase the special properties of complex-alloyed white cast iron // The theory and process engineering of metallurgical production. – 2023. – Vol. 44. – № 1. – P. 24–29.

3 **Dogan, O. N., Hawk, J. A.** Effect of carbide orientation on abrasion of high Cr white cast iron // Wear. – 1995. – Vol. 189. – P. 136–142.

4 **Lv, Y., Sun, Y., Zhao, J., Yu, G., Shen, J., Hu, S.** Effect of tungsten on microstructure and properties of high chromium cast iron // Materials & Design. – 2012. – Vol. 39. – P. 303–308.

5 **Bedolla-Jacuinde A., Guerra F., Mejia I., Vera U.** Niobium additions to a 15 % Cr–3 % C white iron and its effects on the microstructure and on abrasive wear behavior // Metals. – 2019. – Vol. 9. – Article 1321. – https://doi.org/10.3390/met9121321.

6 **Zhi, X., Xing, J., Fu, H., Xiao, B.** Effect of niobium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron // Materials Letters. – 2008. – Vol. 62. – P. 857–860.

7 **Fiset, M., Peev, K., Radulovic, M.** The influence of niobium on fracture toughness and abrasion resistance in high chromium white cast irons // Journal of Materials Science Letters. – 1993. – Vol. 12. – P. 615–617.

8 **Filipovic M., Romhanji E., Kamberovic Z., Korac M.** Matrix microstructure and its micro-analysis of constituent phases in as-cast Fe–Cr–C–V alloys // Materials Transactions. – 2009. – Vol. 50. – P. 2488–2492.

9 **Bedolla-Jacuinde A.** Microstructure of vanadium-, niobium- and titanium-alloyed high-chromium white cast iron // International Journal of Cast Metals Research. – 2001. – Vol. 13. – P. 343–361.

10 **Liu Y., Wang X., Sun Y.** Research on a new detection method of slab surface crack in mould during continuous casting // Metallurgical Research & Technology. – 2018. – Vol. 1. – Article 108.

07.07.25 ж. баспаға түсті.
04.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
06.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

М. А. Тулепова[1], Св. С. Квон[2], К. Ю. Окишев[3]
[1,2]Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[3]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Российская Федерация, г. Екатеринбург.
Поступило в редакцию 07.07.25.
Поступило с исправлениями 04.08.25.
Принято в печать 06.09.25.

ФОРМИРОВАНИЕ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ В ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ

В представленной работе подробно рассмотрено влияние скорости охлаждения на особенности формирования структуры и эксплуатационные свойства высокохромистого чугуна марки ЧХ16, дополнительно легированного карбидообразующими элементами. В состав сплава вводились ниобий в количестве 1,5 % по массе, а также ванадий и титан по 0,7 % каждый. Отливка проводилась в три типа форм: металлическую, оболочковую и песчано-глинистую. Это обеспечивало различные условия кристаллизации и, соответственно, отличающиеся скорости охлаждения. Проведённый анализ микроструктуры показал, что при низкой скорости охлаждения формируются сложные карбидные фазы типа $Me_{1-x}C$, обладающие высокой объемной долей и равномерным распределением в структуре. Особенно выражено карбидообразование в образцах, полученных в песчано-глинистых формах. В таких условиях отмечается увеличение твердости на 17 % и рост износостойкости почти на 30 %, что объясняется наличием мягкой аустенитной матрицы с равномерно распределёнными карбидными включениями. В образцах, отлитых в металлические формы, из-за высокой скорости охлаждения карбидная фаза не успевает сформироваться в полной мере, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик. Полученные результаты позволили установить, что для эффективного действия карбидообразующих элементов необходимо обеспечивать охлаждение, близкое к равновесному режиму. Это создаёт условия для стабильного формирования карбидных фаз, повышающих рабочие свойства чугуна. Представленные выводы могут быть полезны при разработке новых износостойких чугунов, выборе литейных режимов и корректировке легирующих добавок в промышленных условиях.

Ключевые слова: высокохромистый чугун, карбидная фаза, структура сплава, скорость охлаждения, твердость материала, износостойкость, легирующие элементы, микроструктурный анализ.

M. A. Tulepova[1], Sv. S. Kvon[2], K. Yu. Okishev[3]
[1,2]Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3]Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Russian Federation, Yekaterinburg.
Received 07.07.25.
Received in revised form 04.08.25.
Accepted for publication 06.09.25.

FORMATION OF THE CARBIDE PHASE IN HIGH-CHROMIUM CAST IRONS AT DIFFERENT COOLING RATES

This paper presents a study of how the cooling rate affects the microstructure and performance of high-chromium cast iron of grade ChKh16, alloyed with carbide-forming elements. The experimental alloy was modified with 1.5 wt.% of niobium and 0.7 wt.% of vanadium and titanium each. The melt was cast into three types of molds: metal, shell, and sand-clay, which provided different cooling rates during solidification. Microstructural analysis showed that a lower cooling rate leads to the formation of complex $Me_{1-x}C$-type carbides with a higher volume fraction and more uniform distribution. Samples cast into sand-clay molds showed the most developed carbide phase, resulting in better mechanical properties. In particular, hardness increased by 17 %, and wear resistance improved by almost 30 %. This effect is associated with the presence of a relatively soft austenitic matrix and evenly distributed hard carbide inclusions. In contrast, rapid cooling in metal molds limited carbide formation, which reduced hardness and wear resistance. The study shows that for carbide-forming elements to work effectively, a cooling rate close to equilibrium is required. This ensures the stable formation of carbide phases and improves the durability of the alloy. These results are useful for the development of wear-resistant cast irons and for improving industrial casting technologies.

Keywords: high-chromium cast iron, carbide phase, alloy structure, cooling rate, material hardness, wear resistance6 alloying elements, microstructural analysis.

КӨЛІК

МРНТИ 73.31.81

https://doi.org/10.48081/DGVE7126

***Е. З. Амангалиев[1], Ю. И. Шадхин[2]**
[1]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Ж. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2842-2702
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2743-9092
*e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

В данной статье представлена структурная схема замкнутой системы «преобразователь частоты – вентильный двигатель» электропривода электромобиля. Представлено математическое описание динамики замкнутой системы «ПЧ-ВД». Сложность расчета такой нелинейной модели требует использования численных методов и имитационного моделирования в специализированных программных средах, таких как MATLAB/Simulink, для получения динамических и статических характеристик. Поэтому приводится специальная программа для расчета синтеза параметров нелинейного корректирующего устройства системы.

Целью данной статьи является синтез параметров электропривода электромобиля. В статье рассматривается расчет определения оптимальных параметров для вентильного двигателя и преобразователя частоты, как основы для энергосберегающего электропривода электромобиля.

Решение задач связанных с определением параметров замкнутой нелинейной системы электропривода «ПЧ-ВД» требует применения различных математических методов. В программе синтеза параметров, нелинейного корректирующего устройства применяется без градиентный метод сканирования, численный метод Рунге – Кутта для решения дифференциальных уравнений динамики замкнутой системы «ПЧ–ВД» и алгоритм расчета частных производных функции Р. Беллмана. Приводится график переходных процессов скорости и момента вентильного двигателя.

Написана специальная функциональная программа для расчета дифференциальных уравнений. Подробно рассмотрен алгоритм оценки параметров модели, которая описывает процесс изменения скорости и момента в измерениях. Показано, как зная логику построения алгоритма (адаптивный алгоритм) его можно модифицировать под изменившиеся условия и получить необходимый результат (оценку параметров модели).Синтез параметров системы заданной структуры и синтез корректирующих устройств системы

по заданным показателям качества рассматривают как инженерную задачу, сводящуюся к такому построению систем автоматического управления, при котором обеспечивается выполнение технических требований, а также при инженерном синтезе систем автоматического управления обеспечиваются: необходимая точность и положительный характер переходных процессов, в котором окончательно выбирается лучшее из многих возможных вариантов решений с точки зрения существующих конкретных условий.

Ключевые слова: преобразователь частоты, вентильный двигатель, электропривод, электромобиль, дифференциальные уравнения.

Введение

Синтез параметров электропривода – это процесс определения оптимальных числовых значений параметров системы электропривода (скорость, момент, коэффициенты регуляторов) при заданной (заранее известной) структуре для достижения заданных характеристик движения и управления. Это отличает синтез параметров от структурного синтеза, где требуется найти как структуру, так и параметры. Структурный синтез электропривода электромобиля включает в себя такие основные компоненты, как источник энергии (аккумулятор), преобразователь энергии (инвертор), электродвигатель (электромеханический преобразователь) и систему управления. Управление осуществляется с помощью электронных систем, а в зависимости от модели могут использоваться один или несколько двигателей для привода передней, задней или всех колес.

При структурном синтезе требуется определить следующие задачи:

Выбор исходных данных. Необходимые характеристики электромобиля (масса, аэродинамика), требования к производительности (максимальная скорость, разгон), параметры аккумуляторной батареи, тип электродвигателя и другие.

Определение требований к электроприводу.

– Модель и тип электродвигателя, редуктора, системы управления, а также настройку параметров этих компонентов для обеспечения требуемых динамических и статических характеристик. Также для электродвигателя определяются все электрические и механические характеристики, КПД, крутящий момент, скорость вращения.

– Модель аккумуляторной батареи: учёт её ёмкости, напряжения, внутреннего сопротивления и другие характеристики.

– Модель силовой электроники: учёт эффективности инвертора и контроллера, которые управляют электродвигателем.

Синтез параметров является ключевым этапом проектирования в инженерии и научных исследованиях и обычно следует за структурным синтезом (где определяется общая структурная схема или структура объекта).

В задачи параметрического синтеза входят такие задачи как подбор необходимых параметров, при которых нелинейная замкнутая «ПЧ-ВД» будет работать максимально эффективно. Таким образом, благодаря подбору таких параметров, которые нужны проводится оптимизация параметров для достижения

наилучших характеристик, например, минимизация времени переходного процесса, обеспечение устойчивости, минимизация перерегулирования.

Одной из основных задач проектирования замкнутой нелинейной системы электропривода электромобиля является задача синтеза параметров системы управления. Синтез параметров электромобиля также включает в себя определение ключевых характеристик, таких как емкость аккумулятора, запас хода, мощность электродвигателя и расход энергии. Эти параметры взаимосвязаны и зависят от целей проектирования.

Ведь увеличение запаса хода электромобиля возможно в следующих случаях:

– при увеличении емкости аккумулятора;

– использование вместе с аккумулятором суперконденсатора (ионистора);

– использование вместе с аккумулятором маховичного накопителя;

– при создании энергосберегающего электропривода (при использовании вентильного двигателя вместе с преобразователем частоты).

Преобразователь частоты – электронное устройство для изменения частоты электрического тока (напряжения). Преобразователь частоты преобразует переменный ток в постоянный, а затем снова в переменный, но с новой частотой. Принцип работы преобразователя частоты основан на широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Его основная задача – плавно регулировать скорость вращения электродвигателя, что позволяет оптимизировать его работу и уменьшить потребление электроэнергии на 10-15% и снизить износ электродвигателя. Снижение износа электродвигателя достигается за-счет плавного пуска при применении преобразователя частоты. Так как при прямом пуске электродвигателя возникают большие пусковые токи. Что приводить к снижению срока службы электродвигателя до 25%.

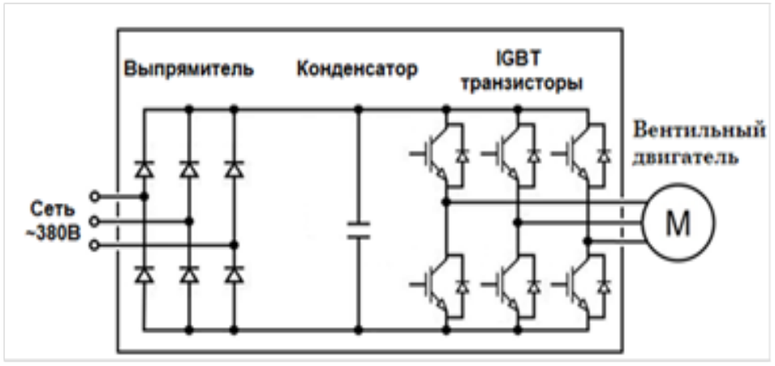


Рисунок 1 – Принципиальная схема преобразователя частоты и вентильного двигателя

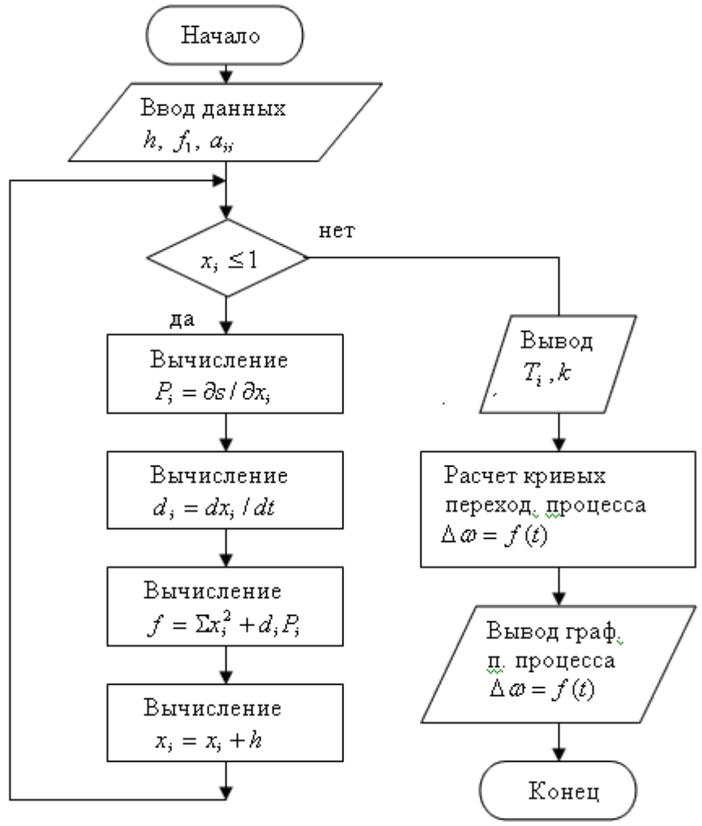


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма синтеза параметров двухдвигательного электропривода электромобиля

Современные вентильные электродвигатели работают эффективнее в широком диапазоне оборотов и часто не требуют коробки передач, что упрощает конструкцию и снижают также вес электромобиля.

Основные этапы решения задач синтеза параметров:

Постановка задачи. Определение целей синтеза (например, оптимизация запаса хода, динамики разгона, эффективности). На этом этапе определяются цели управления, ограничения, требования к переходным процессам (например, допустимые перерегулирование и время регулирования) и статические характеристики.

Выбор структуры системы управления. Определяется тип системы: одноконтурная или многоконтурная, с обратной связью по скорости, току,

положению и т.д. Выбираются типы регуляторов (например, ПИ- или ПИД-регуляторы).

Построение математической модели. Создается математическая модель электропривода и его нагрузки.

Расчет параметров регуляторов. Используя различные методы прикладной математики, такие как метод сканирования, метод Рунге-Кутты, частотные методы или методы на основе модального управления, вычисляются коэффициенты усиления и другие параметры регуляторов.

Моделирование и анализ. Проводятся симуляции для оценки работы синтезированной системы. Анализируется, насколько полученные характеристики соответствуют требованиям, и при необходимости производится корректировка параметров.

Процесс синтеза параметров – это комплексная задача, где инженеры должны сбалансировать следующие моменты:

Оптимизация переходных процессов. Минимизация времени регулирования, устранение перерегулирования и автоколебаний, обеспечение быстродействия и плавности работы.

Обеспечение устойчивости. Настройка регуляторов для сохранения стабильности (устойчивости) системы при изменении нагрузки, питающего напряжения или параметров электродвигателя.

Компенсация возмущений. Подавление влияния внешних факторов, таких как изменение момента нагрузки, чтобы поддерживать заданную скорость или положение.

Повышение энергоэффективности и энергосбережение. Выбор оптимальных параметров для снижения потерь электрической энергии в электродвигателе и преобразователе частоты.

Учёт технологических требований. Обеспечение соответствия характеристик привода требованиям конкретного технологического процесса, например, при позиционировании, поддержании натяжения или управлении движением.

Компромисс между характеристиками. Увеличение запаса хода (большая емкость аккумулятора) приводит к увеличению веса и стоимости. Снижение расхода энергии (экономичная езда) уменьшает эффективность использования аккумулятора.

Учет эксплуатационных факторов. Влияние температуры на работу аккумулятора, потребление энергии в городском цикле или на трассе.

Экологические и экономические аспекты. Стоимость производства аккумулятора и ее утилизации, а также влияние на окружающую среду в течение всего жизненного цикла.

Материалы и методы

Характер возможных движений в нелинейной системе разнообразнее, чем в линейной. Поэтому нелинейные регуляторы более эффективны для управления (регуляторы с переменной структурой). В регуляторах с переменной структурой

закон регулирования изменяется в зависимости от величины отклонения регулируемой координаты и ее производных.

Не менее важной задачей синтеза является задача расчета передаточного коэффициента преобразователя частоты KPR (ПЧ), оказывающий существенное влияние на устойчивость движения и расход электроэнергии электропривода электромобиля.

Структурная схема замкнутой системы электропривода «преобразователь частоты – вентильный двигатель» показана на рисунке 2 в пакете программы Matlab/Simulink [1;2].

Структурная схема замкнутой системы электропривода «преобразователь частоты – вентильный двигатель» на рисунке 3 состоит из: структурной схемы вентильного двигателя [3], динамического звена преобразователя частоты K_q [4] и нелинейного корректирующего устройства (НКУ) с нелинейными звеньями $y = \sin(x)$ и $y = abs(x)$. НКУ введено для улучшения качества переходных процессов скорости и момента ВД.

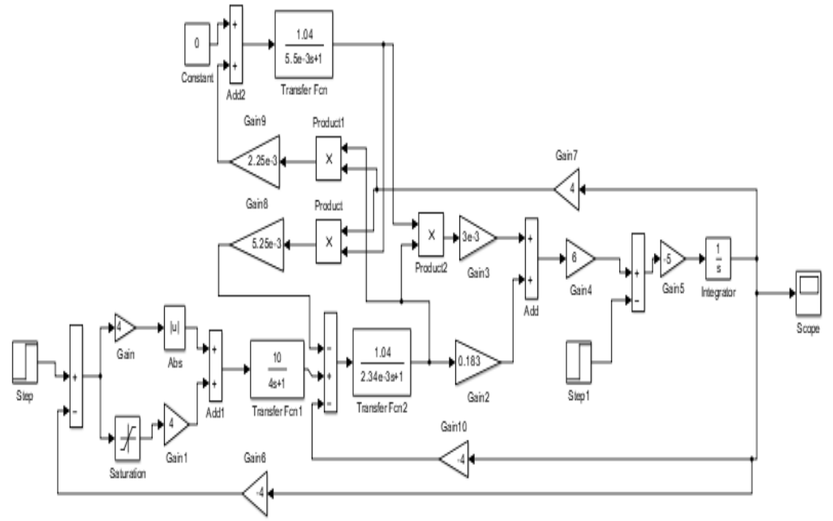


Рисунок 2 – Структурная схема замкнутой нелинейной системы электропривода «ПЧ – ВД»

Структурная схема рисунка 2 состоит из: структурной схемы ВД [3], динамического звена преобразователя частоты K_q [4] и нелинейного корректирующего устройства (НКУ) с нелинейными звеньями $y = \sin(x)$ и $y = abs(x)$. НКУ введено для улучшения качества переходных процессов скорости и момента ВД.

Для того чтобы рассчитать параметры K_{pr}, K_q, K_a, K_s нужно преобразовать нелинейное корректирующее устройство в следующий вид:

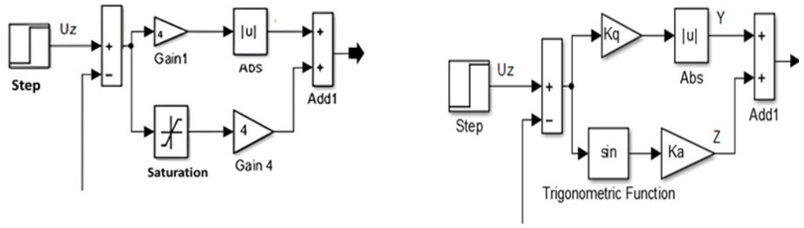


Рисунок 3 – Структурная схема необходимого
для преобразования нелинейного корректирующего устройства

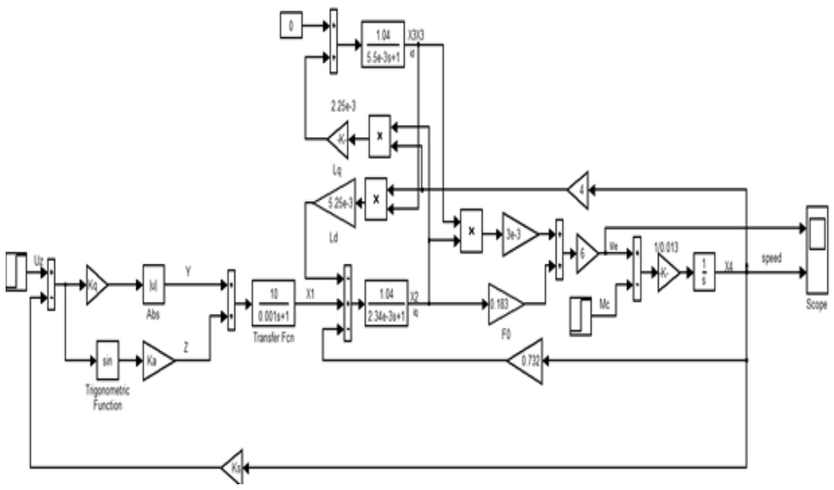


Рисунок 4 – Структурная схема замкнутой нелинейной
системы электропривода «ПЧ-ВД»

Рассмотрим задачу синтеза замкнутой системы «ПЧ-ВД» при заданных числовых значениях параметров вентильного двигателя, числовом значении постоянной времени преобразователя частоты, а также при числовом значении внешнего воздействия на входе замкнутой системы. Числовые значения параметров замкнутой системы «ПЧ-ВД» приведены на структурной схеме рисунке 4.

Численные значения параметров замкнутой системы ПЧ – ВД приведены на структурной схеме рисунка 4. Для поставленной задачи синтеза параметров k_{pr}, k_q, k_a u k_s составим расчетные уравнения динамики системы на основе передаточных функций замкнутой системы «ПЧ – ВД».

Передаточная функция преобразователя частоты:

$$W_1(s) = \frac{x_1}{(y+z)} = \frac{Kpr}{Tpr\cdot\cdot s+1}, \quad (1)$$

Уравнение динамики преобразователя частоты:

$$\frac{dx_1}{dt} = (Kpr/Tpr)\cdot(y+z) - (1/Tpr)\cdot x_1 \quad (2)$$

где $x_1 = U_{PR}$ напряжение на выходе ПЧ, Kpr коэффициент передачи ПЧ, Kpr постоянная времени ПЧ, T_{pr}) $y = abs(k_q\cdot(u - k_{s\cdot}\cdot x_4))$ (k_q - коэффициент ошибки системы, u – задающее воздействие, k_s коэффициент датчика скорости,

x_4 частота вращения вала вентильного двигателя), $z = k_a\cdot\sin(u - k_{s\cdot}\cdot x_4)$;

Передаточная функция тока i_q

$$W_2(s) = \frac{x_2}{x_1 - 0{,}021\cdot x_3 x_4 - 0{,}732\cdot x_4} = \frac{1{,}04}{0{,}00234\cdot s+1} \quad (3)$$

где $x_2 = i_q$, $x_3 = i_d$, x_4 скорость двигателя ($x_4 = \omega$).

$$W_2(s) = 1{,}04\cdot(x_1 - 0{,}021\cdot x_3\cdot x_4 - 0{,}732\cdot x_4) - x_2\cdot(0{,}00234\cdot s+1) \quad (4)$$

$$W_2(s) = 1{,}04\cdot x_1 - 0{,}0218\cdot x_3\cdot x_4 - 0{,}761\cdot x_4 - x_2/0{,}00234 \quad (5)$$

Уравнение динамики тока i_q

$$\frac{dx_2}{dt} = 444{,}44\cdot x_1 - 9{,}33\cdot x_3 x_4 - 312{,}8\cdot x_4 - 427{,}35\cdot x_2, \quad (6)$$

Передаточная функция тока i_d

$$W_3(s) = \frac{x_3}{0{,}009\cdot x_2 x_4} = \frac{1{,}04}{0{,}0055\cdot s+1}, \quad (7)$$

$$W_3(s) = 1{,}04\cdot(0{,}009\cdot x_2\cdot x_4) - x_3\cdot(0{,}0055\cdot s+1) \quad (8)$$

$$W_3(s) = 0{,}00936\cdot x_2\cdot x_4 - x_3/0{,}0055 \quad (9)$$

Уравнение динамики тока i_d

$$\frac{dx_3}{dt} = 1{,}7\cdot x_2 x_4 - 181{,}8\cdot x_3 \quad (10)$$

Уравнение скорости двигателя

$$\frac{dx_4}{dt} = 76{,}92\cdot(0{,}018\cdot x_2 x_3 + 1{,}098\cdot x_2), \quad (11)$$

Уравнение электромагнитного момента и производной момента вентильного двигателя имеют вид:

$$M_Э = x_5 = 0{,}018 \cdot x_2 x_3 + 1{,}098 \cdot x_2 \tag{12}$$

$$\frac{dx_5}{dt} = 0{,}018 x_3 \frac{dx_2}{dt} + 0{,}018 x_2 \frac{dx_3}{dt} + 1{,}098 \frac{dx_2}{dt} \tag{13}$$

или заменяя производные переменных (13) на правые части уравнений (6) и (10), можем получить, после небольших преобразований, производную электромагнитного момента ВД в следующем виде:

$$\frac{dx_5}{dt} = 0{,}018 x_3 (1{,}7 \cdot x_2 x_4 - 181{,}8 \cdot x_3) + (1{,}098 + 0{,}018 x_3) \cdot (444{,}44 \cdot x_1 - 9{,}33 \cdot x_3 x_4 - 312{,}8 \cdot x_4 - 427{,}35 \cdot x_2). \tag{14}$$

Результаты и обсуждение

Программа синтеза параметров, k_{pr}, k_q, k_a и k_s составленная в среде Matlab с учетом выше указанных уравнений, кроме (12) и (13), представлена на рисунке 5. В программе используются метод сканирования [9], для минимизации функции Беллмана [10], и метод Рунге – Кутта [11] для расчета переходных процессов скорости и момента вентильного двигателя. Здесь отметим, что указанные параметры k_{pr}, k_q, k_a и k_s определяются с помощью программы синтеза параметров, которая приведена ниже.

```
function SINTES2
global u
 n=4; r=0; s1=0; s3=0; s5=0; s7=0; m=500;
for i=1:m
  h=0.5; q1=1e6; a1=5; b1=20; a2=0.5; b2=4;
  a3=0.05; b3=0.3; a4=0.05; b4=0.5;
  kpr=a1+(b1-a1)*rand^2; kq=a2+(b2-a2)*rand^2;
  ka=a3+(b3-a3)*rand^2; ks=a4+(b4-a4)*rand^2;
  x(4)=0;  while x(4)<=1
  x(3)=0;  while x(3)<=1
  x(2)=0;  while x(2)<=1
  x(1)=0;  while x(1)<=1
    h1=0.01; i=1;
while i<=n u(i)=x(i)+h1; v(i)=x(i)-h1;
```



```
    j=1;
  while j<=n if j~=i u(j)=x(j);v(j)=x(j);end;
    j=j+1;
  end
    k=1; p1=0; p2=0;
  while k<=n l=k; while l<=n a(k,l)=rand*10;
    p1=p1+a(k,l)*u(k)*u(l); p2=p2+a(k,l)*v(k)*v(l);
    l=l+1;end; k=k+1;end; a(i)=((p1-p2)/2)/h1;i=i+1;
 end
  for j=1:n s=s+x(j)^2; end;
  Tpr=0.001; c=1/Tpr; u=5;
 f=s+...
 a(1)*((c*kpr)*...
 (abs(kq*(u-ks*x(4)))+ka*sin(u-ks*x(4)))-...
 c*x(1))+...
 a(2)*(444.44*x(1)-9.33*x(3)*x(4)-312.8*x(4)-...
 427.35*x(2))+...
 a(3)*(1.7*x(2)*x(4)-181.8*x(3))+...
 a(4)*(1.38*x(2)*x(3)+84.46*x(2));
    if f<=q1 q1=f;end
  x(1)=x(1)+h; end; x(2)=x(2)+h;  end;
  x(3)=x(3)+h; end; x(4)=x(4)+h;  end;
  r=r+1;
 s1=s1+kpr; s2=sqrt((s1/m)^2);
 s3=s3+kq;  s4=sqrt((s3/m)^2);
 s5=s5+ka;   s6=sqrt((s5/m)^2);
 s7=s7+ks;   s8=sqrt((s7/m)^2);
 if r>=m break;end
   end
 kpr=s2; kq=s4; ka=s6; ks=s8;
 disp('kpr=');disp(kpr);
 disp('kq=');disp(kq);
 disp('ka=');disp(ka);
 disp('ks=');disp(ks);
  x0 = [0;0;0;0;0];
```

```
51        [T, X]=ode45(@systm,[0 0.2],x0);
52        plot(T,X(:,4),'k--',T,X(:,5),'k-')
53        grid on
54        title('Speed,  Moment');
55        legend('Speed', 'Moment');
56      function dx = systm(t,x)
57       dx=zeros(5,1); Tpr=0.001; c=1/Tpr;
58       dx(1)=(c*s2)*(abs(s4*(u-s8*x(4)))+...
59           s6*sin(u-s8*x(4)))-c*x(1);
60       dx(2)=444.44*x(1)-9.33*x(3)*x(4)-...
61            312.8*x(4)-427.35*x(2);
62       dx(3)=1.7*x(2)*x(4)-181.8*x(3);
63       dx(4)=1.38*x(2)*x(3)+84.46*x(2);
64       dx(5)=0.018*x(2)*(1.7*x(2)*x(4)-181.8*x(3))+...
65            (1.098+0.018*x(3))*...
66            (444.44*x(1)-9.33*x(3)*x(4)-312.8*x(4)-...
67            427.35*x(2));
68        end
69       end
```

Рисунок 5 – Программа синтеза параметров k_{pr}, k_q, k_a и k_s

Программа вычислений параметров k_{pr}, k_q, k_a и k_s заключается в следующем:

Вводятся (строка 3) исходные данные,

В 5-ой и 6-ой строках программы введены ограничения a_i, b_i для параметров k_{pr}, k_q, k_a и k_s

В 7-ой и 8-ой строках параметрам k_{pr}, k_q, k_a и k_s присваиваются случайные числа (начальное приближение),

С 9-ой по 37 –ую строки методом сканирования осуществляется минимизация функции Беллмана с параметрами k_{pr}, k_q, k_a и k_s

С 13-ой по 22-ую строки рассчитываются частные производные по каждой переменной функции Беллмана – f (строка 27 по 34 строку включительно).

С 39 строки по 42 строку рассчитываются среднеквадратичные значения k_{pr}, k_q, k_a и k_s

С 50-ой по 67-ую строки программы осуществляется расчет переходных процессов скорости и момента ВД численным методом Рунге – Кутта.

Следует отметить, что вывод результатов расчета программы на экран дисплея, вывод численных значений k_{pr}, k_q, k_a и k и вывод графиков переходных процессов скорости и момента ВД, осуществляется одновременно. Численные значения

k_{pr}, k_q, k_a и k_s и графики переходных процессов ВД после расчета программы имеют следующий вид (рисунок 6);

```
kpr=
   10.1343

kq=
    1.6668

ka=
    0.1279

ks=
    0.1976

>>
```

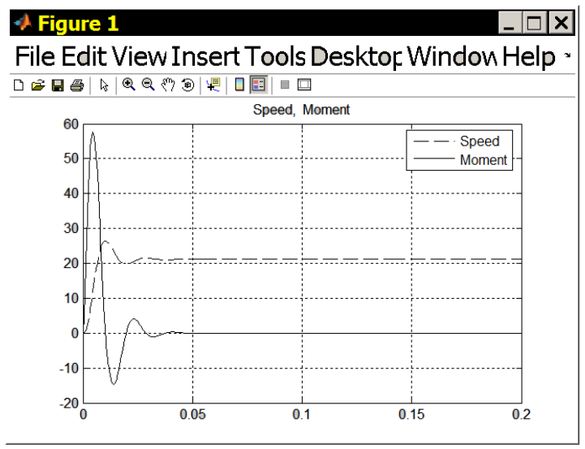


Рисунок 6 – Переходные процессы скорости и электромагнитного момента вентильного двигателя

По графикам переходных процессов скорости и электромагнитного момента ВД можно предположить вывод, что замкнутая система «ПЧ – ВД», при полученных численных значениях k_{pr}, k_q, k_a и k_s устойчива [12;13].

Выводы

В данной статье рассматриваются решения задач только двух этапов синтеза параметров. Первый этап – построение математической модели и программного обеспечения для моделирования, а второй этап – расчет параметров регуляторов. С помощью математической модели и программного обеспечения для моделирования, проводится расчет параметров электропривода, таких как момент инерции, коэффициенты трения, параметры регулятора.

Использование нелинейного корректирующего устройства для ослабления влияния возмущающих воздействий на систему управления дает положительный результат при моделировании в пакете программы MATLAB/Simulink и повышает качество переходных процессов до 25–30 % по скорости и моменту вентильного двигателя. Метод численного сканирования, использующий случайные числа для задания параметров синтеза системы, упрощает решение дифференциальных уравнений со многими переменными и позволяет быстро отображать графики переходного процесса по скорости и моменту вентильного двигателя. Синтез параметров электропривода является сложной задачей, требующей знаний в области электротехники, механики, теории управления и математического моделирования. Использование современных программных средств для

моделирования и оптимизации позволяет значительно упростить и ускорить процесс расчета синтеза параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Аманбек, Д., Тергемес, Қ., Мұсахан, Д., Амиркулов, Б.** Синтез параметров замкнутой системы ПЧ-АД с помощью метода наименьших квадратов в среде Matlab. Вестник КазАТК, 132(3), 2024. – С. 506–515. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-132-3-506-515

2 **Герман–Галкин, С. Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

3 **Терехов В. М., Осипов О. И.** Системы управления электроприводов. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 304 с.

4 **Турчак, Л. И., Плотников, П. В.** Основы численных методов. – М. : Издательство «Физматлит», 2003. – 304 с.

5 **Ротач, В. Я.** Теория автоматического управления: Учебник для вузов – М. : Издательство «МЭИ», 2008. – С. 345–350.

6 **Алексеев, Е. Р., Чеснокова, О. В.** MATLAB 7. – М. : НТ Пресс,2006. – 464 с.

7 **Гольдштейн, А. Л.** Оптимизация в среде MATLAB. Учебник для вузов. – Пермь. : Издательство «Пермьского национального политехнического университета», 2015. – 164 с.

8 **Дьяконов, В. П.** VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование – М. : СОЛОН-Пресс, 2008.

9 **Амангалиев, Е. З., Сарваров, А. С., Косматов, В. И., Петушков, М. Ю., Омельченко, Е. Я.** Электромобильный и гибридный транспорт: силовые схемы, оборудование, проблемы и перспективы развития // Научный журнал «Электротехнические системы и комплексы», № 1(54), Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова. – С. 19–28.

10 **Тергемес, К. Т., Амангалиев, Е. З., Карасаева, А. Р.** Перспективные направления развития хода электропривода электрического транспорта. // Международная конференция по промышленной инженерии и современным технологиям (FarEastCon). – 2019. – P. 1–5. – https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934792.10.1016/j.egyr.2021.02.015.

11 **Валентайн, Д. Т., Хан, Б. Д.** Основы MATLAB // Учебник MATLAB для инженеров и ученых. – Эльзевир, 2023. – С. 29–77. – https://doi.org/10.1016/B978-0-32-399548-1.00008-4.

12 **Певзнер, Л. Д.** Теория систем управления. Учебник для вузов. – СПб. : Лань, 2022. – 256 с.

13 **Liu, G., Zhang, C.** Sliding mode control of reaction flywheel-based brushless DC motor with buck converter // Chinese Journal of Aeronautics. – 2013. – Vol. 26. – № 4. – P. 967–975.

REFERENCES

1 **Amanbek, D., Tergemes, K., Musahan, D., Amirkulov, B.** Sintez parametrov zamknutoi sistemi PCH-AD s pomoschyu metoda naimenshih kvadratov v srede Matlab [Synthesis of parameters of closed-loop FC-AD system using the least squares method in the Matlab environment] [Text] // Vestnik KazATK, 132(3), 2024. – P. 506–515.

2 **German-Galkin, S. G.** Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnih sistem na PK [Design of mechatronic systems on PC] [Text] // St. Petersburg. : KORONA, 2008. – 368 p.

3 **Terekhov, V. M., Osipov, O. I.** Sistemi upravleniya elektroprivodov [Electric drive control systems] [Text] // Publishing Center «Academy», 2008. – 304 p.

4 **Turchak, L. I., Plotnikov, P. V.** Osnovi chislennih metodov [Fundamentals of numerical methods] [Text] – M. : Publishing house «Physics&Maths liter», 2003. – 304 p.

5 **Rotach, V. Ya.** Teoriya avtomaticheskogo upravleniya:Uchebnik dlya vuzov [Theory of automatic control: Textbook for universities] [Text] // M. : Publishing house «MPEI», 2008. – P. 345–350.

6 **Alekseyev, Y.P., Chesnokova, O.V.** MATLAB 7 [MATLAB 7] [Text] // M. : NT Press, 2006. – 464 p.

7 **Goldstein, A. L.** Optimizaciya v srede MATLAB. Uchebnik dlya vuzov [Optimization in the MATLAB environment. Textbook for universities] [Text] // Perm : Publishing house of the Perm National Polytechnic University, 2015. – 164 p.

8 **Dyakonov, V. P.** VisSim+Mathcad+MATLAB. Vizualnoe matematicheskoe modelirovanie [VisSim+Mathcad+MATLAB Visual Mathematical Modeling] [Text] // M. : SOLON-Press, 2008.

9 **Amangaliev Y. Z., Sarvarov A. S., Kosmatov V. I., Petushkov M. Yu., Omelchenko E. Ya.** Elektromobilnii i gibridnii transport: silovie shemi, oborudovanie, problemi i perspektivi razvitiya. [Electric and hybrid transport: power circuits, equipment, problems and development prospects] [Text]. Scientific journal «Electrotechnical systems and complexes», № 1(54), Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, P. 19–28.

10 **Tergemes, K. T., Amangaliyev, Y. Z., Karassayeva, A. R.** Perspektivnie napravleniya razvitiya hoda elektroprivoda elektricheskogo transporta. [Perspective directions of the development of electric transports' electric drive] [Text] // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – P. 1–5.

11 **Valentine, D. T., Hahn B. D.** Osnovi MATLAB // Uchebnik MATLAB dlya injenerov i uchenih [MATLAB® fundamentals // Essential MATLAB for Engineers and Scientists] [Text] // Elsevier, 2023. – P. 29–77.

12 **Pevzner, L. D.** Teoriya sistem upravleniya. Uchebnik dlya vuzov [Theory of control systems. Textbook for high schools] [Text] // St. Petersburg : Publishing house «Lan», 2022. – 256 p.

13 **Liu, G., Zhang, C.** Sliding mode control of reaction flywheel-based brushless DC motor with buck converter // Chinese Journal of Aeronautics. – 2013. – Vol. 26. – № 4. – P. 967–975.

Поступило в редакцию 05.08.25.
Поступило с исправлениями 16.10.25.
Принято в печать 19.11.25.

Е. З. Амангалиев[1], Ю. И. Шадхин[2]
[1]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]Ғ. Ж. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
05.08.25 ж. баспаға түсті.
16.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

«ЖИІЛІКТІ ТҮРЛЕНДІРГІШ – ВЕНТИЛЬДІ ҚОЗҒАЛТҚЫШ» ТҰЙЫҚ БЕЙСЫЗЫҚТЫ ЭЛЕКТР ЖЕТЕК ЖҮЙЕСІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ СИНТЕЗІ

Мақалада «жиілік түрлендіргіш–вентильді қозғалтқыш» тұйық бейсызықты электр жетек жүйесінің құрылымдық сұлбасы көрсетілген. Мақалада тұйық бейсызықты жүйенің сызықты емес түзету құрылғысының параметрлерін синтездеуге арналған бағдарлама ұсынылған. Мұндай сызықты емес модельді есептеудің күрделілігі динамикалық және статикалық сипаттамаларды алу үшін MATLAB/Simulink сияқты арнайы бағдарламаларды пайдалану арқылы сандық әдістерді және модельдеуді қолдануды талап етеді. Сондықтан жүйенің сызықты емес түзеткіш құрылғысының параметрлерін есептеу және синтездеу үшін арнайы бағдарлама қарастырылған.

Бейсызықты түзету құрылғысының параметрлерін синтездеу бағдарламасында градиентті емес сканерлеу әдісі, «жиілік түрлендіргіш–вентильді қозғалтқыш» тұйық жүйесінің динамикасын сипаттайтын дифференциалдық теңдеулер жүйесінің сандық шешімі көрсетілді.Мақалада Рунге-Кутта әдісін пайдалану арқылы өтпелі процесті есептеу алгоритмі көрсетілген. Сонымен қатар Р. Беллман функциясын минимизациялау үшін сканерлеу әдісі қолданылды.

Вентильді қозғалтқыштың роторының айналу жиілігі мен айналу моментінің өтпелі процестерінің графигі келтірілген. Дифференциалдық теңдеулерді есептеуге арналған арнайы функционалды бағдарлама жазылған. Мақалада вентильді қозғалтқыштың роторының айналу жылдамдығы мен моментінің өзгеру процесін сипаттайтын математикалық модельдің параметрлерін бағалау алгоритмі егжей-тегжейлі қарастырылды. Алгоритмді құру логикасын біле отырып, оны өзгертетін шарттарға сәйкес өзгертуге және қажетті нәтижені қалай алуға болатыны (математикалық модель параметрлерін бағалау арқылы) көрсетілген.

Берілген құрылымды тұйық жүйенің параметрлерін синтездеу және берілген сапа көрсеткіштері бойынша жүйенің түзету құрылғыларын синтездеу техникалық талаптардың орындалуын қамтамасыз ететін автоматты басқару жүйелерінің инженерлік синтезінде мынадай талаптар қамтамасыз етіледі: өтпелі процестердің қажетті дәлдігі мен оң сипаты, онда көптеген мүмкін шешімдердің ең жақсысы нақты шарттар тұрғысынан түпкілікті таңдалады.

Кілтті сөздер: Жиілікті түрлендіргіш, вентильді қозғалтқыш, электр жетегі, электр көлігі, дифференциалдық теңдеулер.

Y. Amangaliyev[1], Yu. Shadkhin[2]
[1]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. D. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 05.08.25.
Received in revised form 16.10.25.
Accepted for publication 19.11.25.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF CLOSED NONLINEAR ELECTRIC DRIVE SYSTEM «FREQUENCY CONVERTER – BRUSHLESS MOTOR»

This article presented a structural diagram of a closed-loop electric drive system frequency converter-brushless motor of an electric vehicle. A mathematical description of the dynamics of the closed–loop system «FC-BLDC» is presented. The complexity of calculating such a nonlinear model requires the use of numerical methods and simulation specialized software environments, such as MATLAB/Simulink to obtain dynamic and static characteristics. Therefore, a specialized program for calculating and synthesizing the parameters of the system`s nonlinear corrective device is provided.

A program for synthesizing the parameters of a nonlinear correcting device of the closed nonlinear system is given. Solving problems related to determining the parameters of a closed nonlinear system of the electric drive «FC-BLDC» requires the use of various mathematical methods. In the program of parameters synthesis, nonlinear correcting device the gradient-free scanning method, numerical Runge-Kutta method for solving differential equations of dynamics of closed system «FC-BLDC» and algorithm of calculation of partial derivatives of function R. Bellman are applied.

The graph of transient processes of speed and torque of brushless motor is given. A special functional program for calculating differential equations is written. The algorithm for estimating the parameters of the mathematical model, which describes the process of changing the speed and torque in measurements, is considered in detail. It is shown how, knowing the logic of constructing an algorithm, it can be modified to suit changing conditions and obtain the required result (an estimate of the model parameters).

The synthesis of parameters of a system of a given structure and the synthesis of corrective devices of the system according to given quality indicators are considered

as an engineering task, which is reduced to such a construction of automatic control systems, which ensures the full-fillment of technical requirements, and also in the engineering synthesis of automatic control systems the following are ensured: the necessary precision and positive nature of the transition processes, in which the best of many possible solutions is finally selected from the point of view of existing specific conditions.

Keywords: Frequency converter, brushless motor, electric drive, electric vehicle, differential equations.

МРНТИ 73.31.09

https://doi.org/10.48081/PUZF2504

***К. Г. Балабекова[1], Р. Б. Корабай[2], А. Б. Болатова[3], Г. К. Саменов[4]**

[1,2,3,4]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8242-6675
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8488-8155
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0509-5864
*e-mail: 06_03_92@mail.ru

ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРДЫҢ ЦИЛИНДР ПОРШЕНДІ ТОПТАРЫНЫҢ ФУНКЦИОНАЛДЫ БАПТАУЫН ЗЕРТТЕУ

Қозғалтқыш – автомобильдің ең маңызды әрі күрделі бөліктерінің бірі. Автокөліктердегі бұзылыстардың басым бөлігі іштен жану қозғалтқышының поршеньдік тобында, әсіресе қысу сақиналарында кездеседі. Осы мақалада көлік құралдарының агрегаттарына арналған инновациялық жөндеу жинағының жаңа конструкциясы ұсынылады. Автокөліктің бұзылулардың басым бөлігі іштен жану қозғалтқышының поршеньдік тобында, әсіресе қысу сақиналарында кездеседі. Бұл мақалада көлік құралдарының агрегаттарына арналған инновациялық жөндеу жинағының жаңа конструкциясы ұсынылады. Жұмыста үйкелісті азайтуға арналған жаңа принциптер мен әсерлер қарастырылады. Ұсынылған шешімнің басты айырмашылығы – компрессиялық поршень сақиналарын қарапайым орнатудың орнына серіппелі сақиналарды қолдану. Функционалды жетілдірудің негізгі мақсаты – поршень сақиналары мен цилиндр гильзасы арасындағы үйкелістің беріктігін және техникалық көрсеткіштерін арттыру. Жаңа технология поршень сақиналарының табиғи тозуын, сондай-ақ сақиналар орнатылған ойықтардың тұтастығын төмендетеді. Сонымен қатар, жаңа жинақ тығыздауды жақсартып, жанғыш қоспа тұтанған кезде соққыны сіңіру қабілетін арттырады. Ұсынылған серіппелі жинақ виртуалды ортада, оның жұмысына әсер етуі мүмкін барлық сыртқы факторлар мен процестер ескеріле отырып сыналды. Эксперименттер мен математикалық есептеулер нәтижелері бойынша бұл жинақ нақты жұмыс жағдайында деформациясыз және функцияларын жоғалтпай жұмыс істей алады.

Кілтті сөздер: инновациялық жөндеу жинағы, серіппелі элементтер, көлік, трибожұп технологиясы, жаңа принциптер мен әсерлер, үйкелісті азайту, сенімділік.

Кіріспе

Қозғалтқыш – автомобильдің ең маңызды әрі күрделі бөлігі, ол көліктің тиімділігіне, сенімділігіне және экологиялық қауіпсіздігіне жауап береді. Автокөліктегі барлық ақаулардың едәуір бөлігі қозғалтқышпен байланысты.

Жоғары температуралық жұмыс ортасы немесе бұралу тербелістерінің артуы бұзылулардың негізгі себептері болып табылады.

Белгілі болғандай, автомобиль қозғалтқышының пайдалы әсер коэффициенті төмен, ал шығындардың басым бөлігі поршень мен цилиндрдің түйісуінен туындайды, бұл шамамен 40–50 %-ға дейін жетеді. Мұндай нәтижелер үйкеліс шығындары мен қозғалтқыш майының артық жұмсалуымен түсіндіріледі [1; 2]. Зерттеулерге сәйкес, жанармайдың шамамен 15 %-ы поршеньдік сақиналар мен цилиндр гильзасы арасындағы үйкелісті жеңуге жұмсалады [3; 4].

Қозғалтқыш түйіндерінің табиғи тозуы мен негізгі жүйелердің реттеулерінің бұзылуы нәтижесінде цилиндрлер жұмысының біркелкілігі 25–30 %-ға төмендейді, ал энергия тиімділігі 35 %-ға дейін азаяды. Сонымен қатар, жанармай шығыны артады және ол 25 %-ға дейін жетуі мүмкін, басқа көрсеткіштердің нашарлауын қоспағанда [4, 62-б].

Поршень сақиналары поршень мен цилиндр түйісуінің жұмысында шешуші рөл атқарады [5, 13–16-бб.]. Сақиналардың цилиндрмен тұрақты байланысын қамтамасыз ету үшін олардың поршеньдегі ойықтарында еркін қозғала алуы маңызды [5]. Сақиналардың тұрып қалуы әдетте жану өнімдері мен майдың жиналуынан болады, бұл қозғалтқыштың істен шығуына және үйкеліс шығындарының артуына әкелуі мүмкін [6].

Сақиналардың радиалды қозғалысы сақинаның және оның ойығының төменгі бетінің тозуына алып келеді. Бұл газдардың өтуіне және қозғалтқыш майының кокталуына себеп болуы мүмкін. Нәтижесінде поршень сақиналары толықтай тығыздау қабілетін жоғалтады [7].

Зерттеулерге сәйкес, Қазақстанда пайдаланылып жүрген автокөліктердің орташа жасы 22 жылды құрайды. Бұл дегеніміз – олардың көп бөлігінің бөлшектері, әсіресе поршеньдік топ элементтері, айтарлықтай тозған [8].

Осы жағдай поршеньдік топты жөндеудің және оның қызмет ету мерзімін ұзартудың шешімін табуды талап етеді. Қозғалтқыш бөлшектерінің жұмыс мерзімін арттыру – ұйымдардың басты мақсаттарының бірі [9; 10].

Ұсынылып отырған шешім – серіппелі лайнерлерді қолдану, олар поршень сақиналарын поршень шеттеріне қысып тұрады. Бұл сақиналардың қызмет мерзімін арттыруға және олардың орнатылған төменгі жиектерінің бұзылуын болдырмауға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда «трещотка әсері» байқалады – серіппенің орам бағытына қарай тек бір бағытта мәжбүрлі айналу жүзеге асады [11; 12]. Бұдан бөлек, жұмыс барысында жанасу сызығы үнемі өзгеріп отырады, бұл бөлшектердің тозуын азайтады (1-сурет).

1-сурет – Іштен жану қозғалтқышының құрылымы

Материалдар мен әдістері

Сым диаметрі мен орам саны ең төзімді серіппе конструкциясын анықтау үшін тәжірибелік жолмен таңдалды. Көп орам болған жағдайда серіппе сақиналар арасындағы саңылауға сыймайды, сондай-ақ сымның қалыңдығы да шектеулі. Орамдар бір-біріне жанасқандағы серіппенің ең төменгі биіктігі 3,5 мм, бұл поршень сақиналарының ойықтарының арасындағы қашықтықтан аз. Бұл маңызды, себебі қызған кезде серіппе көлемін ұлғайтады және оған кеңістік қажет. Серіппенің диаметрі поршень диаметрінен аспайды, сондықтан цилиндр қабырғасымен жанаспайды.

Экспериментте серіппеге әсер ететін негізгі сыртқы факторлар – жанармай жану кезіндегі температура және газдардың қысу күші болды. Тәжірибе барысында серіппеге 10.5 Н қысу күші берілді. Бұл қысым Hyundai Accent G4FG-5 1.6 литр қозғалтқышының поршеньдік тобының жұмыс қысымына сәйкес келеді. Қысым күші өзгермей қалды (10.5 Н), ал температура 0-ден 350°С-қа дейін өзгертілді, бұл іштен жану қозғалтқышының нақты жұмыс ортасын модельдеуге мүмкіндік берді [10; 12]. Осылайша әртүрлі температура жағдайында тұрақты қысым кезінде серіппенің кернеуі мен орын ауыстыруы анықталды.

Үлгі жасалғаннан кейін серіппеге полигонды тор (mesh) құрылды. 1-кестеде тор құруға арналған негізгі параметрлер көрсетілген [8;9].

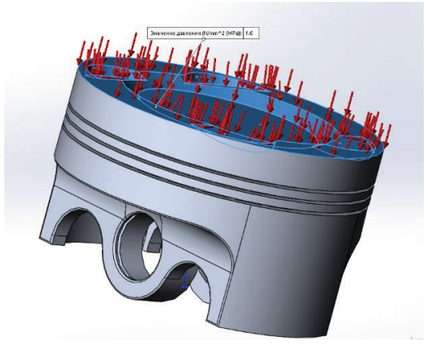
1-кесте

Саны	Өлшемі	Өлшем бірлігі
Термиялық кеңею	10 - 10	e^{-6}/K
Жылу өткізгіштік	25 - 25	W/м·K
Меншікті жылу	460 - 460	Дж/кг·K
Балқу температурасы	1450 - 1510	°C
Тығыздығы	7850	кг/м^2
Қарсылық	0.55 - 0.55	Ом · мм^2/м
Пуассон Қатынасы	0.27-0.30	(Болат үшін)
Серпімді Модуль	190-210	(ГПа)
Созылу беріктігі	1158	(МПа)
Өнімділік Күші	1034	(МПа)
Серпімді Модуль	190-210	(Па)

Негізгі факторлар:
– температура, °C;
– жылу өткізгіштік коэффициенті, м · °C;
– ерекше жылу сыйымдылығы, Дж/кг · °C;
– кернеу (Y).

Эксперимент барысында серіппе қозғалтқыш цилиндріндегі қысуды модельдеу үшін 10.5 Н күшпен сығылды. Содан кейін температура 0-ден 300 °C-қа дейін өзгертілді, ал сәйкесінше жылу өткізгіштік коэффициенті мен ерекше жылу сыйымдылығы кестелік деректерден алынды [9; 11].

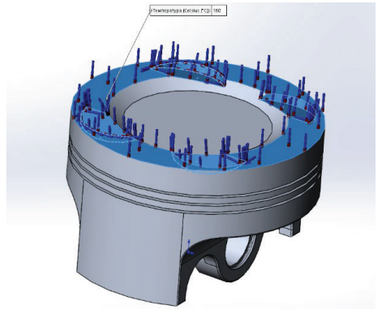
Поршень түбіне әсер ететін қысымды нұсқа юойынша МПа тең деп қолданамыз. Осыдан кейін шекаралық шарттарды тағайындаймыз 2-сурет.



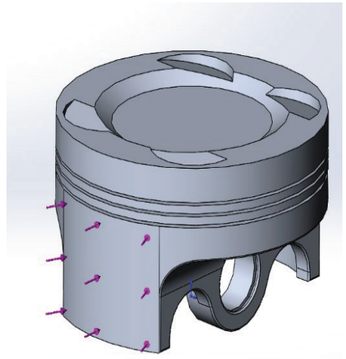
2-сурет – Қысымның шекаралық шарттары

Поршень жұмыс барысында, жыл өткізгіштік, жылу сақтағыш қасиеттерін тексеру үшін поршеньнің қырына әсер ететін температураны таңдаймыз. Берілген температуны 180 °C етіп қабылдаймыз. Цилиндр жағынан әрекет ететін күшті көрсетеміз (3-сурет) [11; 12].

Иннерциялық жүктемені 8000м/сек^2 таңдап, поршеньнің бекіту орнын таңдаймыз (4-сурет).

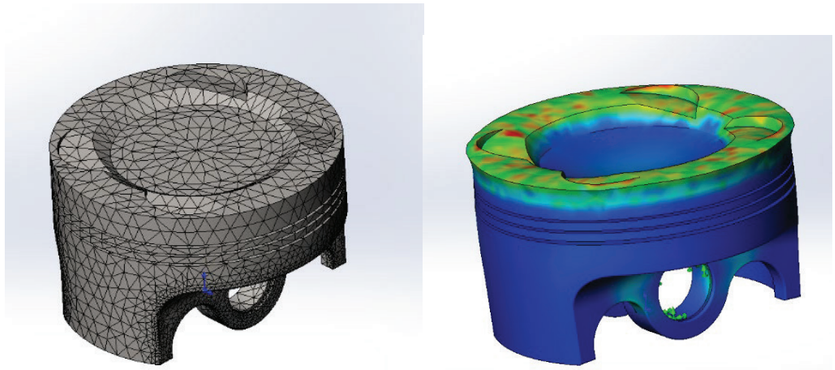


3-сурет – Қырларға әсер ететін орны



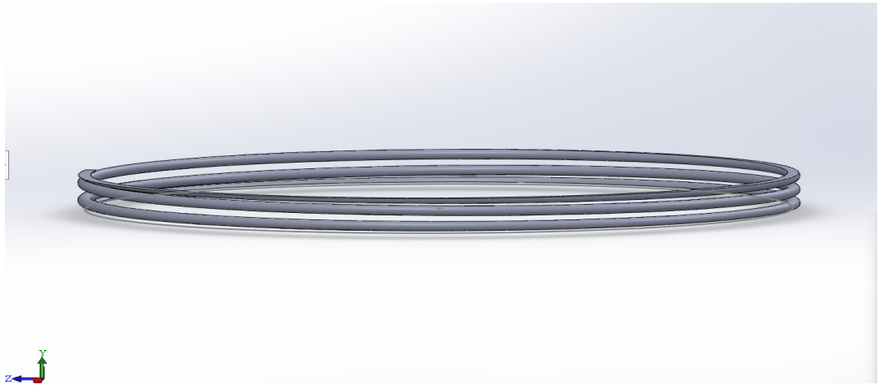
4-сурет – Күштік әрекет температура

Жүктеме жасау үшін SolidWorks FlowSimulation орындалған есеп нәтижелерін көрсетеді. Содан кейін параболикалық соңғы элементтері бар тор жасалды. Нәтижелер 5-суретте көрсетілген.



5-сурет – SolidWorks Simulation бағдарламасында поршеньді талдау

Ең берік серіппелі конструкцияны анықтау үшін сымның диаметрі мен бұрылыстар саны эксперименталды түрде таңдалды. Көптеген бұрылыстар кезінде серіппе сымның қалыңдығына ұқсас сақиналар арасындағы саңылауға сәйкес келмейді. Бұрылыстар бір-біріне тиген кезде серіппенің минималды биіктігі 3,5 мм құрайды, бұл поршеньдік сақиналардың ойықтары арасындағы қашықтықтан аз. Бұл өте маңызды, себебі қыздыру кезінде серіппе көлемі ұлғаяды және кеңейту үшін орын қажет. Серіппенің диаметрі де серіппенің цилиндр айнасымен жанасуын болдырмау үшін поршеньдің диаметрінен аспайды (6 сурет).

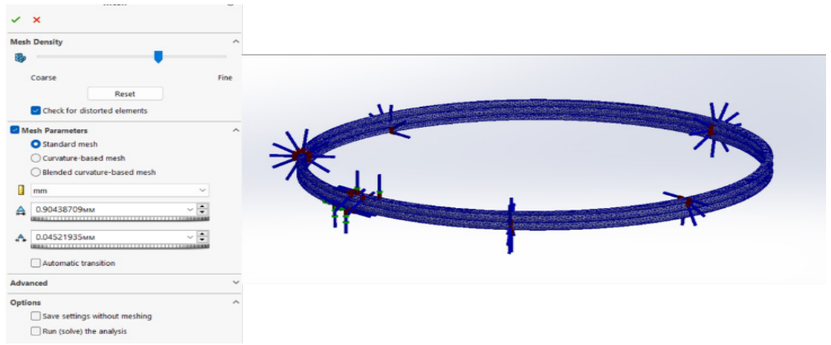


6-сурет – Үлгі

Тәжірибеде қарастырылған серіппеге әсер ететін негізгі сыртқы факторлар отынның жануы кезіндегі температура және бу газдарының сығылу күші болады. Тәжірибе кезінде серіппеге 10,5 Н қысу күші қолданылды. Бұл қысу G4fg-5 1,6 литрлік Hyundai Accent автокөлігінің поршеньдік тобы үшін жұмыс қысымы болып табылады. Сығымдау күшін 10,5 Н өзгертпестен, ішкі жану қозғалтқышының ішіндегі поршень мен серіппенің нақты жұмыс ортасын модельдеу үшін серіппенің

температурасы Цельсий бойынша 0-ден 350 градусқа дейін өзгертілді [12, 6б.]. Осылайша, тұрақты қысу қысымымен әртүрлі температуралық жағдайларда шығыс кернеуі мен серіппелі қозғалыстарды анықтау мүмкін болды.

Модель жасалғаннан кейін серіппенің көпбұрышты торы деректерді өңдеу әдісі арқылы жасалды (сурет 7). Келесі суретте торды құрудың негізгі параметрлері көрсетілген [12, 14 б.].



7-сурет – Тор параметрлері бар серіппелі көрініс

Нәтижелер және талқылау

Бұл бөлімде SolidWorks-те жүргізілген эксперимент нәтижелері келтірілген.

Төмендегі 2 кестеде зерттеу нәтижелеріне әсер ететін факторлардың (температура, жылу өткізгіштік коэффициенті, меншікті жылу сыйымдылығы, Дж/кг · °C) әсерінен серіппенің тік ось бойымен кернеуі мен ығысуының нәтижелері көрсетілген.

Эксперимент нәтижелері

2-кесте

№	Температура (°C)	Кернеу (МПа)	Вертикаль ось бойынша орын ауыстыру (мм)
1	24	1.079	0
2	100	2.246	-0.013 – 0.027
3	150	4.064	-0.014 – 0.046
4	200	5.883	-0.015 – 0.064
5	250	7.701	-0.016 – 0.078
6	300	9.520	-0.018 – 0.086

Стресс пен орын ауыстыру температураның жоғарылауына пропорционалды түрде өсетінін көруге болады. Сондай-ақ, температураның әсерінен металдың кеңеюін көруге болады. Төменде бірнеше нәтижелер графикалық түрде берілген (8 сурет).

Қорытынды

Бұл зерттеуде қозғалтқыштардың цилиндр-поршеньді топтарының (ЦПТ) функционалды баптау ерекшеліктері жан-жақты талданды. ЦПТ элементтерінің

геометриялық параметрлерін оңтайландыру, материалдық беріктігін арттыру және үйкеліс пен жылулық жүктемелерді азайту қозғалтқыштың жалпы тиімділігіне тікелей әсер ететіні анықталды. Әсіресе поршень, сақина және цилиндр қабырғасы арасындағы өзара әрекеттесу қозғалтқыштың ресурсында, қуатында және отын үнемділігінде шешуші рөл атқаратыны дәлелденді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, функционалды баптау барысында дәлдікпен орындалған өңдеу технологиялары, заманауи жабын түрлері, смазка қасиеттерін жетілдіру және материалдардың термиялық тұрақтылығын арттыру ЦПТ жұмысының сенімділігін едәуір жоғарылатады. Сонымен бірге математикалық модельдеу мен диагностика әдістерінің қолданылуы поршень тобының жұмыс режимдерін нақты бағалауға және оңтайлы параметрлерді таңдауға мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, қозғалтқыштардың цилиндр-поршеньді топтарын функционалды баптау – техникалық тиімділікті арттырудың, жанармай үнемділігін жақсартудың және экологиялық көрсеткіштерді оңтайландырудың маңызды бағыты болып табылады. Алынған нәтижелер көлік және машина жасау салаларында жоғары өнімді, ұзақ мерзімді және сенімді іштен жанатын қозғалтқыштарды жобалау мен жетілдіруге ғылыми-тәжірибелік негіз бола алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Каукаров, А. К., Некрасов, В. Г., Мурзагалиев, А. Ж., Куанышев, М. К., Мухтаров, А. Т.** Поршень двигателя внутреннего сгорания: инновационный патент РК № 23549 / РГКП «Актюбинский государственный университет имени К. Жубанова» МОН РК. – Астана, 2010. – 6 с.

2 **Рождественский, Ю. В., Маслов, А. П., Плешаков, Г. И., Гусаев, А. И.** Трибосопряжение поршень–цилиндр двигателя внутреннего сгорания : патент РФ // Южно-Уральский государственный университет. – 2005. – № 2. – 257–484 с.

3 **Аванесов, В. С., Глебов, В. В., Кузин, В. В. и др.** Рабочий цилиндр двигателя внутреннего сгорания: патент РФ // ООО «ПАОЛ». – 2007. – № 2. – 422–659 с.

4 **Передерий, В. Г., Передерий, М. В., Кравченко, В. И., Зулувов, Р. Х.** Кольцевое уплотнение цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания : патент РФ // Передерий В. Г., Передерий М. В., Кравченко В. И., Зулувов Р. Х. – 2003. – № 2. – 239–717 с.

5 **Кантюков, Р. Р., Тахавиев, М. С., Капарулин, А. В. и др.** Уплотнение пары цилиндр–поршень компрессора : патент РФ // ООО «Газпром трансгаз Казань». – 2015. – № 162–384 с.

6 **Боровский, В. М., Матвеев, Ю. И., Боровский, М. Ю.** Уплотнение цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания: патент РФ // Боровский В. М., Матвеев Ю. И., Боровский М. Ю. – 2013. – № 147–160 с.

7 **Низовцев, В. Е., Климов, Д. А., Корнилов, А. А.** Цилиндропоршневая группа двигателя внутреннего сгорания: патент РФ // ФГУП

«Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова». – 2016. – № 2 637–794 с.

8 **Choi, J., Lee, S., Park, S.** Friction losses modeling of piston rings for various combustion pressures in diesel engine // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – Vol. 30. – № 8. – P. 3655–3664. – https://doi.org/10.1007/s12206-016-1144-z.

9 **Lee, S., Kim, Y., Park, D.** Combined experimental and simulative approach for friction loss optimization of DLC coated piston rings // Automotive and Engine Technology. – 2022. – Vol. 7. – № 2. – P. 89–103. – https://doi.org/10.1007/s41104-022-00115-7.

10 **Morris, N., Mohammadpour, M., Rahmani, R., Rahnejat, H.** Optimisation of the piston compression ring for improved energy efficiency of high-performance race engines // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2017. – Vol. 231. – № 6. – P. 776–790. – https://doi.org/10.1177/0954407016686249.

11 **Pachaiyappan, I., Thamildorai, N., Mani, K.** Effect of piston ring geometries on lubrication and friction in diesel engine // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1240. – № 1. – P. 012003. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012003.

12 **Zhang, L., Zhang, C., Ball, A.** An improved lubrication model between piston rings and cylinder liners with consideration of liner dynamic deformations // Energies. – 2017. – Vol. 10. – № 12. – P. 2122. – https://doi.org/10.3390/en10122122.

REFERENCES

1 **Kaukarov, A. K., Nekrasov, V. G., Murzagaliev, A. Zh., Kuanyshev, M. K., Mukhtarov, A. T.** Porshen’ dvigatelya vnutrennego sgoraniya: innovatsionnyi patent RK № 23549 [Piston of the internal combustion engine : innovative patent of the Republic of Kazakhstan № 23549]. RGKP «Aktyubinskii gosudarstvennyi universitet im. K. Zhubanova» MON RK, Astana, 2010. – 6 p.

2 **Rozhdestvenskii, Yu. V., Maslov, A. P., Pleshakov, G. I., Gusaev, A. I.** Tribosopryazhenie porshen’-tsilindr dvigatelya vnutrennego sgoraniya: patent RF № 2 257 484 S1. [Tribological pair piston–cylinder of an internal combustion engine: patent of the Russian Federation]. Yuzhno-Uralskii gosudarstvennyi universitet, 2005. – № 2. – P. 257–484.

3 **Avanesov, V.S., Glebov, V.V., Kuzin, V.V. et al.** Rabochii tsilindr dvigatelya vnutrennego sgoraniya: patent RF № 2 422 659 S2 [Working cylinder of an internal combustion engine: patent of the Russian Federation]. OOO «PAOL», 2007. – № 2. – P. 422–659.

4 **Perederii, V. G., Perederii, M. V., Kravchenko, V. I., Zuluvov, R. Kh.** Kol’tsevoe uplotnenie tsilindroporshnevoi gruppy dvigatelei vnutrennego sgoraniya: patent RF [Ring seal of the cylinder–piston group of internal combustion engines: patent of the Russian Federation], 2003. – № 2. – P. 239–717.

5 **Kantyukov, R. R., Takhaviev, M. S., Kaparulin, A. V. et al.** Uplotnenie pary tsilindr–porshen’ kompressora : patent RF № 162 384 U1 [Seal of the cylinder–piston

pair of a compressor: patent of the Russian Federation]. OOO «Gazprom Transgaz Kazan», 2015. – 162–384 p.

6 **Borovskii, V. M., Matveev, Yu. I., Borovskii, M. Yu.** Uplotnenie tsilindroporshnevoi gruppy dvigatelya vnutrennego sgoraniya : patent RF [Seal of the cylinder–piston group of an internal combustion engine : patent of the Russian Federation], 2013. – 147–160 p.

7 **Nizovtsev, V.E., Klimov, D. A., Kornilov, A. A.** Tsilindroporshnevaya gruppa dvigatelya vnutrennego sgoraniya: patent RF [Cylinder–piston group of the internal combustion engine : patent of the Russian Federation]. FGUP «Tsentral'nyi institut aviatsionnogo motorostroeniya imeni P. I. Baranova», 2016. – № 2. – 637–794 p.

8 **Choi, J., Lee, S., Park, S.** Friction losses modeling of piston rings for various combustion pressures in diesel engine // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – Vol. 30. – № 8. – P. 3655–3664. – https://doi.org/10.1007/s12206-016-1144-z.

9 **Lee, S., Kim, Y., Park, D.** Combined experimental and simulative approach for friction loss optimization of DLC coated piston rings // Automotive and Engine Technology. – 2022. – Vol. 7. – № 2. – P. 89–103. – https://doi.org/10.1007/s41104-022-00115-7.

10 **Morris, N., Mohammadpour, M., Rahmani, R., Rahnejat, H.** Optimisation of the piston compression ring for improved energy efficiency of high-performance race engines // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2017. – Vol. 231. – № 6. – P. 776–790. – https://doi.org/10.1177/0954407016686249.

11 **Pachaiyappan, I., Thamildorai, N., Mani, K.** Effect of piston ring geometries on lubrication and friction in diesel engine // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1240. – № 1. – P. 012003. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012003.

12 **Zhang, L., Zhang, C., Ball, A.** An improved lubrication model between piston rings and cylinder liners with consideration of liner dynamic deformations // Energies. – 2017. – Vol. 10. – № 12. – P. 2122. – https://doi.org/10.3390/en10122122.

01.10.25 ж. баспаға түсті.
17.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. Г. Балабекова[1], Р. Б. Корабай[2], А. Б. Болатова[3], Г. К. Саменов[4]
[1,2,3,4]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 01.10.25.
Поступило с исправлениями 17.11.25.
Принято в печать 19.11.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВЫХ ГРУПП ДВИГАТЕЛЕЙ

Двигатель – одна из самых важных и сложных частей автомобиля. Большинство поломок в автомобилях происходит в поршневой группе двигателя внутреннего сгорания, особенно в компрессионных кольцах. В данной статье предлагается новая конструкция инновационного ремонтного комплекта для агрегатов транспортных средств. Большинство поломок автомобиля происходит в поршневой группе двигателя внутреннего сгорания, особенно в компрессионных кольцах. В этой статье предлагается новая конструкция инновационного ремонтного комплекта для агрегатов транспортных средств. В работе рассматриваются новые принципы и эффекты снижения трения. Основное отличие предлагаемого решения заключается в использовании пружинных колец вместо простой установки компрессионных поршневых колец. Основной целью функционального совершенствования является повышение прочности и технических показателей трения между поршневыми кольцами и гильзой цилиндра. Новая технология снижает естественный износ поршневых колец, а также целостность пазов, в которых установлены кольца. Кроме того, новый комплект улучшает уплотнение и увеличивает ударопрочность при воспламенении легковоспламеняющейся смеси. Предлагаемый пружинный комплект был протестирован в виртуальной среде с учетом всех внешних факторов и процессов, которые могут повлиять на его работу. По результатам экспериментов и математических расчетов данный комплект может работать в реальных условиях эксплуатации без деформации и потери функций.

Ключевые слова: инновационный ремонтный комплект, пружинные элементы, автомобиль, технология трибожупа, новые принципы и эффекты, снижение трения, надежность.

K. G. Balabekova[1], R. B. Korabay[2], A. B. Bolatova[3], G. K. Samenov[4]
[1,2,3,4]Eurasian National University named after L. N. Gumilyov,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 01.10.25.
Received in revised form 17.11.25.
Accepted for publication 19.11.25.

STUDY OF FUNCTIONAL TUNING OF CYLINDER PISTON GROUPS OF ENGINES

The engine is one of the most important and complex parts of a car. Most of the breakdowns in cars occur in the piston group of the internal combustion engine, especially in the compression rings. In this article, a new design of an innovative repair kit for vehicle units will be presented. Most of the breakdowns of the car occur in the piston group of the internal combustion engine, especially in the compression rings. This article will present a new design of an innovative repair kit for vehicle units. The paper examines new principles and effects for reducing friction. The main difference between the proposed solution is the use of spring rings instead of a simple installation of compression piston rings. The main goal of functional improvement is to increase the strength and technical indicators of friction between the piston

rings and the cylinder sleeve. The new technology reduces the natural wear of the piston rings, as well as the integrity of the grooves in which the rings are installed. In addition, the new kit improves sealing and increases the shock absorption capacity when the combustible mixture is ignited. The presented spring assembly was tested in a virtual environment, taking into account all external factors and processes that can affect its operation. According to the results of experiments and mathematical calculations, this kit can work in real working conditions without deformation and loss of functions.

Keywords: innovative repair kit, spring elements, transport, tribojup technology, new principles and effects, friction reduction, reliability.

ГТАМР 73.31.09

https://doi.org/10.48081/HCYW5972

Т. К. Балгабеков[1], Б. Т. Оразалиев[2], Н. К. Карбаев[3], Х. Х. Махкамов[4], С. Т. Аймагамбетов[5]

[4]Нортумбрия университеті, Ұлыбритания, Ньюкасл қ.;

[1,2,3,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6468-0944

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8525-236X

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7111-5719

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4028-7654

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6011-5932

ЭТАНОЛ-БЕНЗИН ОТЫН ҚОСПАЛАРЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, БЕНЗИН ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНУ СИПАТТАМАЛАРЫН ЖАҚСАРТУ

Бұл мақалада бензин мен этанолдың отын қоспаларын пайдаланудың бензин қозғалтқышының пайдалану көрсеткіштеріне және зиянды заттардың шығарылу деңгейіне әсері қарастырылады. Зерттеу дәстүрлі бензинмен (АИ-92 және АИ-95) салыстырғанда этанолдың әртүрлі концентрацияларының (Е10,Е20,Е30) тиімділігін бағалауға бағытталған. Эксперименттік деректер қозғалтқыштың үш жұмыс режимінде алынады: бос жүріс, орташа және жоғары айналым. Пайдаланылған газдардың құрамын талдау үшін газ таолдауыш құрылғысы қолданылды, бұл CO, CO_2, NOx және CH концентрацияларын анықтауға мүмкіндік береді. Нәтижелерге сүйенсек, этанолды бензинге араластыру отынның толық жануына, көміртегі тотығы мен көмірсутек шығарындыларының төмендеуіне ықпал ететіні анықталды. Этанолдың калориялық құндылығы төмен болғандықтан отынның меншікті шығынының біршама артуы байқалады. Сонымен қатар этанолдың жоғары октан саны детонацияға тұрақтылығы арттырып, қозғалтқыштың тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз етеді. Жалпы алғанда, бензин мен этанол қоспаларын қолдану энергия тиімділігін арттырумен қатар экологиялық қауіпсіздікті жақсарту және іштен жану қозғалтқышының жұмысын оңтайландыру үшін перспективалы бағыт болып табылады. Сынақтар бензин-этанол қоспаларында қысқа уақыт аралығында жүргізіліп, бастапқы нәтижелер алынды, алайда толық әрі дәл қорытынды жасау үшін қозғалтқыштың барлық сыртқы жүктемелермен (соның ішінде тежеу) ұзақ мерзімді сынақтарын өткізу қажет.

Кілтті сөздер: биоэтанол, бензин қозғалтқышы, шығарындылар, отын қоспалары, экология.

Кіріспе

Энергияны тұтынудың жаһандық өсуі және қазба отын қорларының шектеулі болуы жағдайында тасымалдау үшін баламалы энергия көздерін іздеу міндеті өзекті бола түсуде. Энергетикалық дағдарыс-бұл әлемде, әсіресе дамыған елдерде басым болатын негізгі проблемалардың бірі. Халықтың өсуі, индустрияландыру, көліктің жақсаруы, әр түрлі секторларда қазба отындарын үнемі пайдалану энергия тапшылығының негізгі себептері болып табылады. Бұл адамзат үшін оларды жеңу үшін үлкен қиындықты білдіреді [1]. Қажеттіліктердің, жанармай бағасының күрт өсуі, мұнай-химия ресурстарының сарқылуы және зиянды шығарындылар әсері дәстүрлі түрде қолданылатын қазба отынына балама қажеттігін тудырды [2; 3]. Перспективалы бағыттардың бірі – биоэтанолды іштен жанатын қозғалтқыштарға (іштен жану қозғалтқыштарына) арналған дәстүрлі отынға қосымша ретінде пайдалану.

Биоэтанол – өсімдік шикізатынан алынатын жаңартылатын отын және ол бірқатар артықшылықтарға ие: жоғары октан саны, молекулада оттегінің болуы, бұл отын қоспасының толық жануына ықпал етеді, сонымен қатар пайдаланылған газдардың улы компоненттерінің шығарындыларын азайту мүмкіндігі. Сонымен қатар, этанолдың бензинмен салыстырғанда аз калориялық құндылығына, гигроскопиялылықтың жоғарылауына және қозғалтқыштың жеке түйіндерінің беріктігіне әсер етуіне байланысты белгілі бір шектеулер бар.

Әлемдік тәжірибеде этанол отын қоспаларының құрамдас бөлігі ретінде кеңінен қолданылады. Ең көп тарағандары – Е5-Е30 формулалары, мұнда көрсетілген сандар бензиндегі этанолдың пайыздық мөлшерін білдіреді. Бірқатар зерттеулер көрсеткендей, мұндай қоспаларды қолдану көміртегі оксиді (CO) мен көмірсутектер (CH) шығарындыларын төмендетуі мүмкін, және де көміркышқыл газының (CO_2) концентрациясын отынның толық жануының индикаторы ретінде арттырады. Сонымен қатар, этанолдың қозғалтқыштың жұмысына әсері (қуат, айналу моменті, пайдаланылған газдың температурасы) пайыздық мөлшерге және жұмыс режиміне байланысты [4].

Қазақстан Республикасында экологиялық таза отын түрлеріне көшу мәселелері қоршаған ортаға техногендік жүктемені азайту қажеттілігіне байланысты ерекше маңызға ие болады. Осыған байланысты Автомобиль қозғалтқыштары үшін бензин-этанол қоспаларының құрамында биоэтанолды қолдану мүмкіндіктерін зерттеу өзекті болып көрінеді.

Бұл жұмыстың мақсаты АИ-92 және АИ-95 маркалы бензинге этанолды (Е10, Е20 және Е30 концентрацияларында) қосудың ішкі жану бензин қозғалтқышының пайдалану және экологиялық көрсеткіштеріне әсерін зерттеу болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Тәжірибелер стационарлық сынақ стендіне орнатылған сегіз цилиндрі бар 1,8 л ішкі жану бензин қозғалтқышында жүргізілді. Стендтің дизайны қозғалтқыштың әртүрлі жұмыс режимдерінде өлшеулер жүргізуге мүмкіндік берді (бос жүріс, орташа және жоғары айналым), бірақ сыртқы жүктеме жасау

мүмкіндігі болмады, сондықтан сынақтар динамометриясыз жүргізілді. Дәл және қайталанатын нәтижелерге қол жеткізу үшін әрбір сынақ әрбір отын қоспасы үшін үш рет қайталанды, содан кейін параметрлердің орташа мәндері есептелді.

Базалық отын ретінде АИ-92 және АИ-95 маркалы бензиндер пайдаланылды. Қоспаларды дайындау үшін 96 % концентрациясы бар этанол қолданылды. Келесі отын құрамдары дайындалды:

Е0 – таза бензин (АИ-92 немесе АИ-95);

Е10-10 % этанолы бар бензин;

Е20–20 % этанолы бар бензин;

Е30–30 % этанолы бар бензин.

Қоспаларды дайындау үшін этанолдың үлесі көлем бойынша есептеледі:

$$E_x = \frac{V_э}{V_э + V_б} * 100\% \quad (1)$$

Мұндағы $V_э$ – этанол көлемі, $V_б$ – бензин көлемі, осылайша қажетті Е10, Е20 және Е30 қоспаларын аламыз.

$$E_{10} = \frac{200мл}{200мл + 1800мл} * 100\% = 10\%;$$

Сәйкесінше,

$$E_{20} = \frac{400мл}{400мл + 1600мл} * 100\% = 20\%;$$

$$E_{30} = \frac{600мл}{600мл + 1400мл} * 100\% = 30\%.$$

Отындарды араластыру зертханалық жағдайда компоненттерді дәл мөлшерлеу арқылы жүзеге асырылды, бұл қоспаның құрамының тұрақтылығын қамтамасыз етті. Бұл ретте ГОСТ 32513-2013 «Моторлы отындар. Этилсіз бензин. Техникалық шарттар» талаптарына сәйкес жүргізілді. Соның ішінде «автомобиль бензиндеріндегі оксигенаттардың (оның ішінде этанолдың) рұқсат етілген құрамы» бөлімі сақталды.

Сынақтар қозғалтқыштың үш жұмыс режимінде жүргізілді:

Бос жүріс (800–900 айн/мин);

Орташа айналымдар(2000–3000 айн/мин);

Жоғары айналымдар (4000–5000 айн/мин).

Әр режимде қозғалтқыш 5–7 минут бойы тұрақты күйде жұмыс істеді, содан кейін параметрлерді өлшеу жүргізілді. Режимдерді таңдау ГОСТ ISO 8178-11-2015 «Поршенді іштен жану қозғалтқыштары. Жану өнімдерінің шығарылуын өлшеу. 11 бөлім. Өтпелі режимдерде жол талғамайтын көлік құралдарының қозғалтқыштарынан газдар мен бөлшектер шығарындыларын стендтік өлшеу» талаптарына сәйкес келеді, мұнда ІЖҚ шығарындыларын бағалау үшін сынақ циклдары реттеледі.

Параметрлерді тіркеу үшін келесі жабдық қолданылды:

Пайдаланылған газдардағы CO, CO_2, O_2 және CH концентрациясын анықтауға арналған газ анализаторы;

Иінді біліктің айналу жиілігін өлшеуге арналған тахометр;

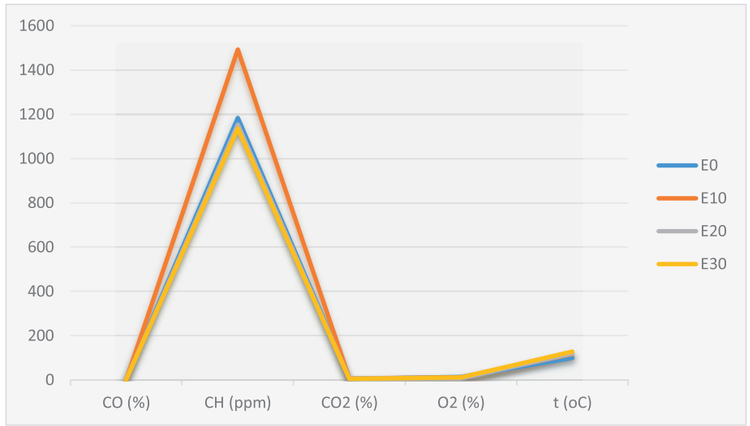
Пайдаланылған газдардың температурасын бекітуге арналған термопара.

Шығарындыларды анықтау әдістері жабдықтар мен өлшеу процедураларына қойылатын талаптарды реттейтін ГОСТ ISO 8178-1-2013. «Мемлекетаралық стандарт. Поршенді ішten жану қозғалтқыштары. Жану өнімдерінің шығарылуын өлшеу. 1 бөлім. Сынақ стендтеріндегі газдар мен бөлшектер шығарындыларын өлшеу» ережелеріне сәйкес келеді.

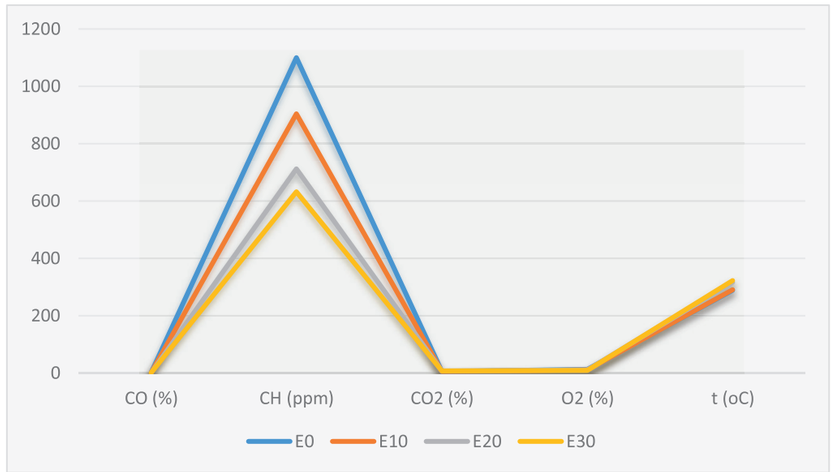
Әр режим үшін CO, CO_2, O_2, CH концентрацияларының және пайдаланылған газдардың температурасының орташа мәндері есептелді. Деректер параметрлердің отын түріне тәуелділігін талдау үшін кестелер мен графиктер түрінде ұсынылды. Жанармай әсерінің статистикалық маңыздылығын бағалау үшін дисперсиялық талдау (ANOVA) қолданылды. Шығарындылар мен температура арасындағы байланысты анықтау үшін корреляциялық талдау жүргізілді.

Нәтижелер және талқылау

Бос жүріс режимінде (800–900 айн/мин) E0 бензинімен салыстырғанда E10 қоспасын пайдаланған кезде көміртегі оксиді (CO) концентрациясының төмендеуі байқалды. Алайда, этанолдың үлесі одан әрі 20%-ға дейін артқан кезде, CO құрамы қайтадан өсті, бұл қоспаның сарқылуына байланысты толық емес жанумен байланысты. Көмірсутектердің концентрациясы (CH) E0-ден E20 және E30-ға ауысқанда төмендеді, бұл отынның толық жануын көрсетеді. Бұл жағдайда CO_2 концентрациясының (6,3% дейін) және пайдаланылған газдардың температурасының жоғарылауы (АИ-95 негізіндегі отын үшін 322 °C дейін) тіркелді.



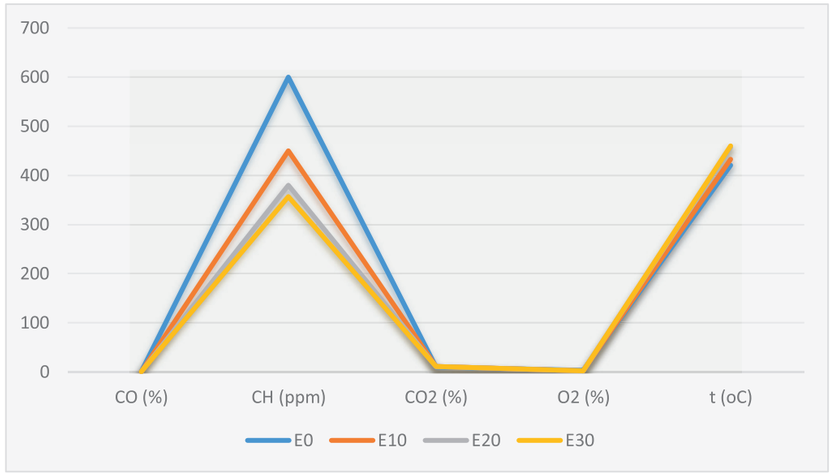
1-сурет – Бос жүріс режимінде АИ 92 маркалы бензин және бензин-этанол қоспаларының CO, CO_2, CH, O_2, t көрсеткіштеріне әсері



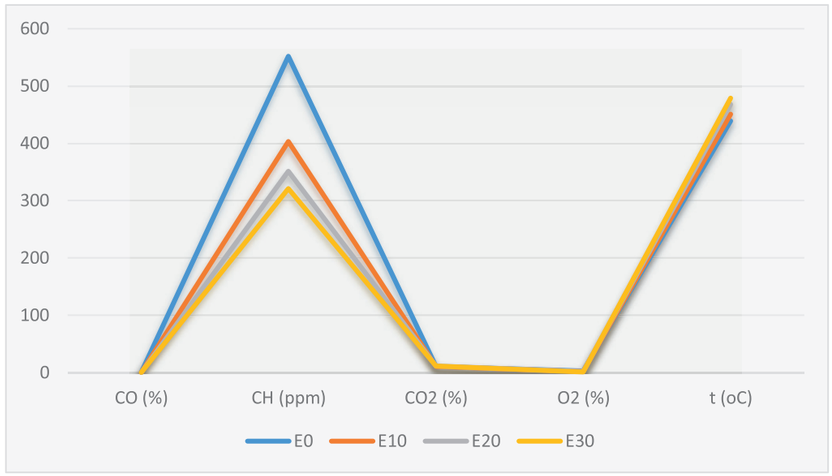
2-сурет – Бос жүріс режимінде АИ 95 маркалы бензин және бензин-этанол қоспаларының CO, CO_2, CH, O_2, t көрсеткіштеріне әсері

Осылайша, бос жүріс режимінде этанолды концентрацияда қолдану 10% - ға дейін CO шығарындыларын азайтады, ал 20–30 %-да CH азаюына және CO_2 өсуіне қол жеткізіледі, бұл жану толықтығының жоғарылауын көрсетеді.

Орташа айналымдағы экологиялық көрсеткіштер. 2000–3000 айн/мин айналу жиілігінде барлық этанол бар қоспалар таза бензинмен салыстырғанда CO және CH айтарлықтай төмендегенін көрсетті. CO-ның минималды мәндері (шамамен 0,5 %) E30 қоспасы үшін бекітілген, бұл E0-мен салыстырғанда 35–40 % төмен. E20 және E30 қоспаларын қолданған кезде CH концентрациясы 40 %-дан астам төмендеді. Бұл ретте CO_2 11,9 %-ға дейін өсуі байқалды, бұл отынның жану толықтығының жақсарғанын растайды. Пайдаланылған газдардың температурасы 479 °C-қа дейін көтерілді, бұл қоспалар жанған кезде жылу шығарудың жоғарылауымен байланысты.



3-сурет – Ортаңғы айналым режимінде АИ 92 маркалы бензин және бензин-этанол қоспаларының CO, CO_2, CH, O_2, t көрсеткіштеріне әсері

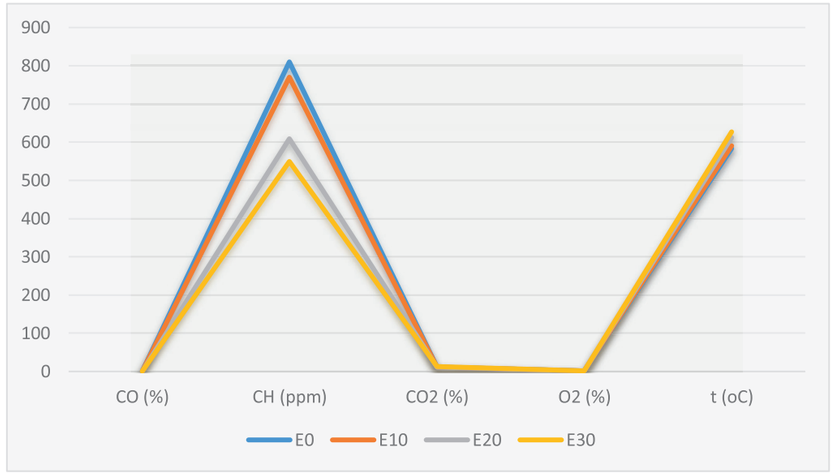


4-сурет – Ортаңғы айналым режимінде АИ 95 маркалы бензин және бензин-этанол қоспаларының CO, CO_2, CH, O_2, t көрсеткіштеріне әсері

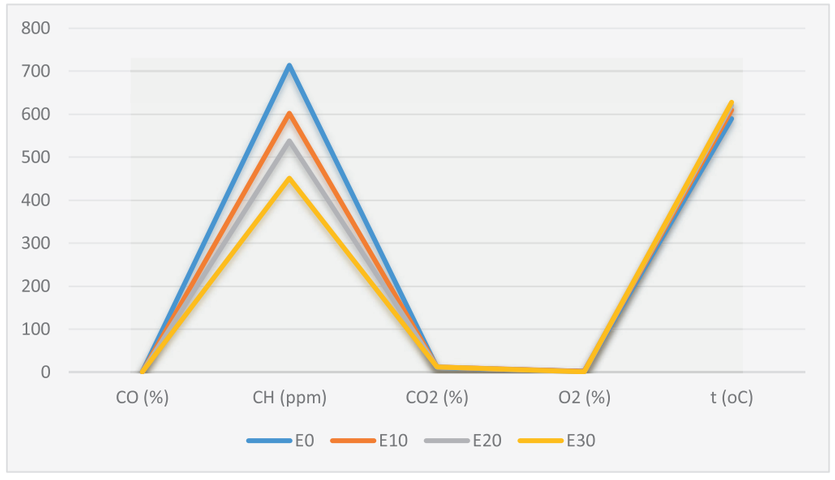
Осылайша, орташа режимдерде қозғалтқыш Е20–Е30 қоспаларын қолданған кезде тиімді жұмыс істейді, бұл экологиялық өнімділіктің жақсаруымен бірге жүреді.

Қозғалтқыштың жоғары жылдамдықтағы жұмысы. Иінді біліктің айналу жиілігі 4000–5000 айн/мин дейін ұлғайған кезде CO концентрациясының одан әрі төмендеуі тіркелді (Е30 және АИ-95 бензині кезінде 0,65 % дейін). CH концентрациясы Е0-ге қатысты шамамен 1,5 есе төмендеді. Бұл жағдайда CO_2

деңгейі 12,5 %-ға жетті, ал пайдаланылған газдардың температурасы 628 °С-қа дейін көтерілді.



5-сурет – Жоғары айналым режимінде АИ 92 маркалы бензин және бензин-этанол қоспаларының CO, CO_2, CH, O_2, t көрсеткіштеріне әсері



6-сурет – Жоғары айналым режимінде АИ 95 маркалы бензин және бензин-этанол қоспаларының CO, CO_2, CH, O_2, t көрсеткіштеріне әсері

Бұл нәтижелер жоғары айналымдарда этанолдың көбеюі отынның толық жануына және пайдаланылған газдың экологиялық тазалығын жақсартуға ықпал ететінін көрсетеді.

Этанол молекуласында оттегі бар болғандықтан жану процесі бензинге қарағанда толық жүреді. Бұл келесі реакциялардан көрінеді:

Этанолдың жануы:

$$C_2H_5OH + 3O_2 = 2CO_2 + 3H_2O \quad (2)$$

Изооктанның (бензин) жануы:

$$C_8H_{18} + 12{,}5O_2 = 8CO_2 + 9H_2O \quad (3)$$

Осы теңдеуден көретініміз, этанол қоспасы жану процесінде бензин отынының жануына қарағанда сыртқы оттегі азырақ әрекеттеседі және бұл отынның толық тотығу ықтималдығын арттырады, сондықтан, CO және CH аз болса, CO_2 көбірек болады.

Зерттеушілердің мәлімдеуінше биоэтанолдың 10–15 % қосылуы цилиндрдегі қысымның циклдік ауытқуын төмендетеді және CO және CH шығарындыларын азайтады [5, 7–8-бб.]. Біздің зерттеуіміз орташа айналымда E20-E30 қоспалары E0 бензинімен салыстырғанда CO концентрациясының 0, 5%-ға және CH 40 % – дан астам төмендеуін қамтамасыз ететінін көрсетеді. Осыдан этанолдың үлесін 20–30 %-ға дейін арттыру, жұмыста көрсетілген әсерді жанармайдың толық жануы арқылы одан әрі күшейтеді деген қорытынды жасауға болады [5].

Бензин қозғалтқышындағы қысу коэффициентінің жоғарылауы пайдалы жылу коэффициентінің өсуіне ықпал етеді. Сонымен қатар, бұл беттің жану камерасының көлеміне қатынасының артуына байланысты көмірсутектердің (CH) түзілуін күшейтеді. Сонымен қатар, қысу коэффициентінің жоғарылауына байланысты жоғары температура азот оксидтерінің (NOx) шығарындыларының жоғарылауына әкеледі [6].

Баруа және басқалардың шолуына сәйкес, бензинге этанол қосу этанолдың жоғары концентрациясында CO шығарындыларын ~17 %-ға және CN ~ 43%-ға төмендетеді, сонымен қатар салқындату әсері арқылы NOx шығарындыларын азайтады [7, 10–12-бб.].

Этанолды араластырып, сығу дәрежесін арттырған жағдайда қозғалтқыштың айналу моменті мен қуаты орташа деңгейде сақталып, отын шығынында оңтайлы жақсарту байқалды. Құрамында 20 % этанол бар отын қоспасы қозғалтқыштың тиімділігі мен пайдаланылған газдар шығарындыларын азайту бойынша жақсы нәтиже көрсетті [8].

Статистикалық деректерді өңдеу. Дисперсиялық талдау (ANOVA) отын құрамының Co концентрациясына, CH, CO_2 және пайдаланылған газ температурасына ($p < 0,05$) статистикалық маңызды әсерін көрсетті. Корреляциялық талдау со құрамы мен пайдаланылған газдардың температурасы ($r \approx -0,82$), сондай-ақ CH мен температура ($r \approx -0,77$) арасындағы күшті теріс байланысты анықтады. Бұл жоғары температура жанармай қоспасының толық жануын және улы шығарындылардың азаюын қамтамасыз ететінін растайды.

Барлық үлгі бойынша статистикалық көрсеткіштер 1-кестеде келтірілген.

1-кесте – Статистикалық көрсеткіштер

Параметр	Орташа мәні	Ауытқу	Мин–Макс
CO (%)	0.59	0.11	0.47–0.80
CH (ppm)	426.75	100.56	321–600
CO_2 (%)	11.05	0.61	10.0–11.9
CO_2 (испр.)	2.36	0.70	1.60–3.50
Температура °C	451.00	19.12	421–479

Қорытынды

Жүргізілген эксперименттердің нәтижелері бойынша келесі қорытындылар жасауға болады:

Бензин-этанол қоспаларында (E10–E30) этанолды қосу қозғалтқыштың экологиялық жұмысына айтарлықтай әсер етеді. Этанол мөлшерінің жоғарылауымен со және CH концентрацияларының төмендеуі байқалады, сонымен бірге CO_2 жоғарылайды, бұл отынның толық жануын көрсетеді.

Бос жүріс кезінде ең үлкен әсерге таза бензинмен салыстырғанда көмірсутектер шығарындыларының төмендеуін және CO_2 өсуін қамтамасыз ететін E20 және E30 қоспаларын пайдалану арқылы қол жеткізіледі.

Орташа режимдерде (2000–3000 айн/мин) E20 және E30 қоспалары ең жақсы нәтиже көрсетті: CO минималды мәндері (0,5% дейін) және CH айтарлықтай төмендеуі (40 %-дан жоғары).

Жоғары айналымдарда (4000–5000 айн / мин) E30 қоспасын қолдану (әсіресе АИ-95 бензинінде) CO-ның 0,65 %-ға дейін және CH-нің 1,5 есе дерлік төмендеуін қамтамасыз етті, сонымен бірге CO_2 12,5 %-ға дейін және пайдаланылған газдардың температурасы 628 °C-қа дейін өсті.

Этанол-бензин қоспаларының әртүрлі құрамдары қолданылып, олардың қозғалтқыштың шығару қуатына ықпалы төмен және жоғары концентрацияларда, сондай-ақ әртүрлі шикізат негізінде жан-жақты талданды. Зерттеу барысында жылу-техникалық сипаттамалардың, тежеу кезіндегі меншікті отын шығынының және дамитын айналу моментінің этанолдың үлесіне әрі қозғалтқыштың жұмыс режимдеріне байланысты өзгеретіні анықталды. Көлемдік тиімділіктің артуы мен этанолдың жоғары үлесі нәтижесінде көміртек тотығы (CO) мен қатты көмірсутекті бөлшектердің шығарындысы айтарлықтай азайды. Ал көмірқышқыл газының (CO_2) мөлшері жоғарылағанымен, азот тотығының (NOx) шығарындылары қозғалтқыштың жұмыс жағдайларына қарай өзгеріп отырды [9].

Статистикалық талдау (ANOVA) жанармай құрамының барлық зерттелетін параметрлерге әсерінің маңыздылығын растады ($p < 0,05$). Корреляциялық талдау CO, CH мөлшері және пайдаланылған газдардың температурасы арасындағы күшті теріс байланысты көрсетті, бұл температураның жоғарылауымен жану толықтығының жақсарғанын растайды.

Жанармай қоспаларында этанолды қолдану қозғалтқыштың жылу өнімділігін толық жану және улы шығарындыларды азайту арқылы жақсартуға мүмкіндік береді [10]. Қозғалтқыштардың тиімділігін арттырудың ұқсас тәсілдері, бірақ дизельдік қондырғылардың мысалында отандық авторлардың зерттеулерінде де қарастырылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Balat, M., Balat, H.** Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel // Applied energy. – 2009. – Vol. 86. – № 11. – P. 2273–2282.

2 **Shafiee, S., Topal E.** When will fossil fuel reserves be diminished? // Energy policy. – 2009. – Vol. 37. – № 1. – P. 181–189.

3 **Manieniyan V., Thambidurai, M., Selvakumar, R.** Study on energy crisis and the future of fossil fuels //Proceedings of SHEE. – 2009. – Vol. 10. – P. 2234–3689.

4 **Dhande, D. Y., Sinaga, N., Dahe, K. B.** Study on combustion, performance and exhaust emissions of bioethanol-gasoline blended spark ignition engine //Heliyon. – 2021. – Vol. 7. – № 3.

5 **Abikusna, S., Sugiarto, B.** Study on the utilization of low-grade bioethanol on SI gasoline engine as a mixture of pure gasoline fuel or with the addition of oxygenated additives to improve performance and reduce emissions // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 753. – № 1. – C. 012004.

6 **Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., Kodanli, E.** The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis // Applied Thermal Engineering. – 2017. – 120. – P. 433–443.

7 **Barua, S., Sahu, D., Sultana, F., Baruah, S., Mahapatra, S.** Bioethanol, internal combustion engines and the development of zero-waste biorefineries: an approach towards sustainable motor spirit // RSC Sustainability. – 2023. – Vol. 1. – № 5. – P. 1065–1084.

8 **Al-Hasan, M.** Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. // Energy conversion and management. – 2003. – Vol. 44. – № 9. – P. 1547–1561.

9 **Sarkar, A., Chowdhuri, A. K., Bhowal, A. J., Mandal, B. K.** The performance and emission characteristics of SI engine running on different ethanol-gasoline blends // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2012. – Vol. 3. – № 6. – P. 2229–5518.

10 **Балгабеков, Т. К., Байгужина, Г. Н., Ибраева, Ж. Т.** Создание дизельных двигателей с уменьшенными тепловыми затратами // Вестник Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева. – 2022. – № 2 (54). – P. 119–127.

REFERENCES

1 **Balat, M., Balat, H.** Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel // Applied energy. – 2009. – Vol. 86. – № 11. – P. 2273–2282.

2 **Shafiee, S., Topal E.** When will fossil fuel reserves be diminished? // Energy policy. – 2009. – Vol. 37. – № 1. – P. 181–189.

3 **Manieniyan V., Thambidurai, M., Selvakumar, R.** Study on energy crisis and the future of fossil fuels //Proceedings of SHEE. – 2009. – Vol. 10. – P. 2234–3689.

4 **Dhande, D. Y., Sinaga, N., Dahe, K. B.** Study on combustion, performance and exhaust emissions of bioethanol-gasoline blended spark ignition engine //Heliyon. – 2021. – Vol. 7. – № 3.

5 **Abikusna, S., Sugiarto, B.** Study on the utilization of low-grade bioethanol on SI gasoline engine as a mixture of pure gasoline fuel or with the addition of oxygenated additives to improve performance and reduce emissions // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 753. – № 1. – C. 012004.

6 **Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., Kodanli, E.** The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis // Applied Thermal Engineering. – 2017. – 120. – P. 433–443.

7 **Barua, S., Sahu, D., Sultana, F., Baruah, S., Mahapatra, S.** Bioethanol, internal combustion engines and the development of zero-waste biorefineries: an approach towards sustainable motor spirit // RSC Sustainability. – 2023. – Vol. 1. – № 5. – P. 1065–1084.

8 **Al-Hasan, M.** Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. // Energy conversion and management. – 2003. – Vol. 44. – № 9. – P. 1547–1561.

9 **Sarkar, A., Chowdhuri, A. K., Bhowal, A. J., Mandal, B. K.** The performance and emission characteristics of SI engine running on different ethanol-gasoline blends // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2012. – Vol. 3. – № 6. – P. 2229–5518.

10 **Balgabekov, T. K., Bajguzhina, G. N., Ibraeva, Zh. T.** Sozdanie dizel'nykh dvigateley s umenshennymi teplovymi zatratami [Development of Diesel Engines with Reduced Heat Losses] // Vestnik Severo-Kazakhstanskogo Universiteta imeni M. Kozybaeva. – 2022. – № 2 (54). – P. 119–127.

05.10.25 ж. баспаға түсті.
18.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
31.10.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Т. К. Балгабеков[1], Б. Т. Оразалиев[2], Н. К. Карбаев[3], Х. Х. Махкамов[4], С. Т. Аймагамбетов[5]
[1,2,3,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[4]Университет Нортумбрии, Великобритания, г. Ньюкасл.
Поступило в редакцию 05.10.25.
Поступило с исправлениями 18.11.25.
Принято в печать 31.10.25.

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭТАНОЛ-БЕНЗИНОВЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

В данной статье рассматривается влияние использования топливных смесей бензина и этанола на эксплуатационные показатели бензинового двигателя и уровень выбросов вредных веществ. Исследование направлено на оценку эффективности различных концентраций этанола (Е10,Е20,Е30) по сравнению с традиционным бензином марок АИ-92 и АИ-95. Экспериментальные данные получены в трех режимах работы двигателя: холостой ход, средние и высокие обороты. Для анализа состава выхлопных газов применялся газоанализатор, позволивший определить концентрации CO, CO_2, NOx и CH. Результаты показали, что добавление этанола способствует более полному сгоранию топлива и снижению выбросов окиси углерода и углеводородов. Из-за меньшей теплотворной способности этанола наблюдается небольшое увеличение удельного расхода топлива. Кроме того, более высокий октановый номер этанола повышает устойчивость к детонации и улучшает работу двигателя. В целом использование бензино-этанольных смесей является перспективным направлением для повышения энергоэффективности и экологической безопасности двигателей внутреннего сгорания. Испытания на смесях бензин-этанол проводились в короткий промежуток времени и позволили получить предварительные результаты. Однако для формирования полной картины и получения более точных данных в дальнейшем необходимо провести длительные испытания двигателя с учетом всех внешних нагрузок, включая тормозные режимы.

Ключевые слова: биоэтанол, бензиновый двигатель, выбросы, топливные смеси, экология.

T. K. Balgabekov[1], B. T. Orazaliev[2], N. K. Karbaev[3], Kh. Kh. Mahkamov[4], S. T. Aimagambetov[5]
[1,2,3,5]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana;
[4]Northumbria University, Great Britain, Newcastle.
Received 05.10.25.
Received in revised form 18.10.25.
Accepted for publication 31.11.25.

IMPROVING THE OPERATIONAL PARAMETERS OF GASOLINE ENGINES THROUGH THE USE OF ETHANOL-GASOLINE FUEL MIXTURES

This article examines the influence of using gasoline-ethanol fuel blends on the perfomance characteristics of a spark ignition engine and the emission levels of harmful exhaust components. The study aims to evaluate the efficiency of different ethanol concentrations (E10, E20, E30) compared to conventional gasoline grades Ai-92 and Ai-95. Experimental data were obtained under three engine operating modes: idle, medium, and high speed. A gas analyzer was used to determine the concentrations of CO, CO_2, NOx, and CH in the exhaust gases. The results showed that blending ethanol with gasoline enhances fuel combustion completeness and reduces the emissions of carbon monoxide and hydrocarbons. Due to the lower calorific value of ethanol, a slight increase in specific fuel consumption was observed. Furthermore, the higher octane rating of ethanol improves resistance to detonation and enhances overall engine performance. Overall, the use of gasoline–ethanol blends is a promising approach to improving both the energy efficiency and environmental safety of internal combustion engines. The tests on gasoline–ethanol blends were conducted over a short period of time and provided preliminary results. However, to obtain a complete picture and more accurate data, further long-term engine tests should be carried out under full external loads, including braking conditions.

Keywords: bioethanol, gasoline engine, emissions, fuel mixtures, ecology.

ҒТАМР 73.31.17

https://doi.org/10.48081/YTVU9270

Т. С. Бекетов[1], В. Ф. Лукиных[2], С. Болатқызы[3], Р. Х. Искаков[4]

[1,3]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

[2]Мемлекеттік аграрлық университеті, Ресей Федерациясы, Красноярск қ.;

[4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5084-6966

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2000-9278

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3725-6627

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0095-1275

*e-mail: t.beketov1985@gmail.com

АВТОКӨЛІКПЕН ЖОЛАУШЫЛАР ТАСЫМАЛДАУДЫҢ БЕЛСЕНДІ ҚАУІПСІЗДІГІ

Бұл мақалада біздің еліміздегі жолаушылар тасымалы жүйесіндегі қолайсыз жағдайды талдап және жол қозғалысы қауіпсіздігін арттыру бойынша ғылыми-практикалық ұсынымдар әзірледік. Өйткені жол-көлік апаттылығының жоғары проблемасы елдегі халықты автомобильдендірудің жоғары қарқынына байланысты ең өзекті мәселелердің қатарына қойылды. Сондықтан ЖКО санын азайту қазіргі қоғам алдына қойылған ең басым міндеттердің бірі болып табылады. Премьер-Министр Олжас Бектеновтың төрағалығымен 15 қыркүйек 2025 жылғы өткен министрлер кабинетінің отырысында Мемлекет басшысының тапсырмаларын іске асыру шеңберінде жол қозғалысы мен жаяу жүргіншілердің қауіпсіздігін қамтамасыз ету мәселелері қаралды. Зерттеу жүргізу үшін мемлекеттік басылымдар жолаушылар тасымалы саласындағы нақты статистикалық деректерді, жетекші ғалымдардың ғылыми-теориялық ұсынымдарын, сондай-ақ ішкі жолаушылар тасымалы қауіпсіздігін қамтамасыз ету міндетін іске асыру кезінде зиянды факторларды анықтау әдістерін пайдаланадық. Ғылыми ұсыныс тарапынан: Жүргізушінің жұмысын жеңілдетуі мүмкін, осылайша көлік құралын басқару жүйесіне жүргізуші рөлін атқаратын және қауіп туралы ескертетін арнайы құрылғыларды қосу арқылы жүргізу қауіпсіздігін арттырады. Практикалық маңыздылығы: Мәселенің одан әрі белсенді қауіпсіздік параметрлерін реттеу принциптерін жүйелік тәсіл негізінде жасауға болатындығын көрсетеді. Нәтижелер. Адамдардың қаза болуының негізгі себептері: жол инфрақұрылымының заман талаптарына сәйкес келмеуі; жүргізушілердің даярлығы мен тәртібінің төмендігі; байланыс құралдары мен жедел жәрдем машиналарының жетіспеушілігі; халықпен мақсатты ағартушылық жұмыстың болмауы болып табылады.

Кілтті сөздер: жолаушы, көлік, автомобиль, жол қауіпсіздігі, фактор, жүргізушілер.

Кіріспе

Қазіргі заманғы жолаушылар тасымалы саласы назар аударуды және инновациялық шешімдерді қажет ететін күрделі және көп қырлы міндеттерге тап болды. Бұл мәселелерді шешу көлік саласын терең түсінуді және үнемі технологиялық дамуды қажет етеді [1].

Әлеуметтік маңызды қоғамдық қызметтің ең көп таралған түрі болып табылатын автобус көлігі ерекше назар аударуды қажет етеді. Сондықтан бұл мәселені ҚР Президенті Қ. Қ. Тоқаевтың қатысуымен 2020 жылғы 24 қаңтарда өткен ҚР Үкіметінің кеңейтілген отырысында қаралғаны кездейсоқ емес.

2024 жылы Қазақстанда 31249 апат болды, оның 1938-і өліммен аяқталды. Оның ішінде 27330 жүргізуші кінәсінен болды. Апаттардың ең көп саны Алматыда болды. Өткен жылы 6718 ЖКО орын алды. Екінші орында Алматы облысы: 2024 жылы бұл өңірде 3086 көлік тіркелген. Бірінші үштікке Жамбыл облысы кірді, онда 1912 жылы жазатайым оқиға болды. 2025 жылдың екі айында Қазақстанда 4147 жазатайым оқиға орын алып, 6027 адам жарақат алды [2].

Материалдар мен әдістері

Жолаушылар тасымалы саласындағы жетекші ғалымдардың сенімді статистикасын, ғылыми және теориялық ұсыныстарын қамтитын үкіметтік БАҚ негізінде зиянды факторларды анықтау әдісі елімізде жолаушылар тасымалы қауіпсіздігіне байланысты міндеттерді іске асыру үшін пайдаланылады.

Жолаушылар қауіпсіздігі мәселесін шешу технологияларды жетілдіруді, инфрақұрылымды дамытуды, персоналды оқытуды және нормативтік-құқықтық базаны үнемі жаңартуды қамтитын кешенді тәсілді талап етеді. Бұл жолаушылардың қауіпсіздігін қамтамасыз етіп қана қоймай, көлік қызметтеріне деген сенім мен адалдықты нығайтуға мүмкіндік береді. Бұл жыл сайын елдегі жолаушылар ағынының артуына байланысты.

1-кесте – Қазақстанда автобустармен тасымалданған жолаушылар саны млн. адамды құрайды

Жылдар	2022	2023	2024
автобустар	1324,5	1441,9	1584,6
Такси	49,5	47,5	73,3

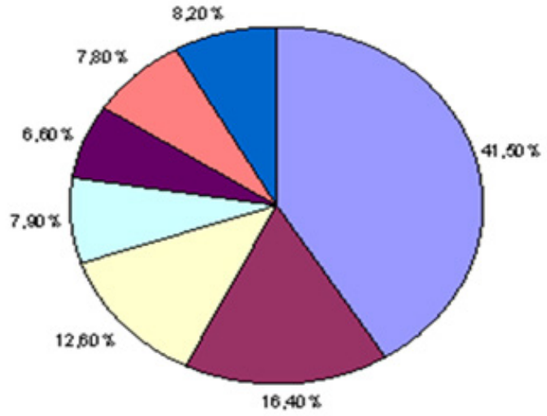
2-кесте – Жолаушылар айналымы, млн. адам

Жылдар	2022	2023	2024
Автобус	23 478,5	26 855,0	34 591,1
Такси	2 585,2	1 445,5	2 035,9

Мұндай апаттардың себебі - жүргізушінің нашар тәртібі және профилактикалық қызметтің болмауы. Жолаушылар тасымалына жауапты лауазымды тұлғаларға бақылауды күшейту қажет. Мәселен, 2025 жылғы 25 тамыз күні автобус Астана тас жолынан шықты: 14 адам ауруханаға жатқызылды. Астанада 2 маусымда жолаушылары бар автобус ақпараттық табло бағанына соғылды. Апаттан зардап шеккен 15 адам қалалық ауруханаға жеткізілді. 2017 жылы туған қыз үш ер

адаммен ауруханаға жатқызылды, олар оның аяғын кесіп тастады. Жолдағы әрбір үшінші өлім жылдамдықтың жоғарылауымен байланысты

Қазақстанда жол көлік оқиғалар (ЖКО) саны өсуде. Апаттардың негізгі себептері жылдамдықтың артуы, көлікпен соқтығысу, бағдаршамдардың бітелуі, жаяу жүргіншілердің қозғалысын тоқтату болып табылады. Әрбір үшіншісі жылдамдықтан асып өледі. Инспектордың айтуынша, ұялы телефондарға кедергі келтіретін жүргізушілер қауіпсіздікке қосымша қауіп төндіреді. Бұған дейін хабарланғандай, 2025 жылдың бірінші жарты жылдығында Қазақстанда 15698 көлік апаты тіркелген. Бұл көрсеткіш өткен жылдың сәйкес кезеңімен салыстырғанда 54 %-ға жоғары. Соның ішінде автомобильдер апаттарының шамамен 10% техникалық тұрғыдан апаттың себебі болып табылады (сурет 1).



41,50 % – тежегіш жүйесі; 16,40 % – рулдік басқару;
12,60 % – дөңгелек резиналары; 7,90 % – жарықтандыру приборлары;
6,60 % – жүріс бөліктері; 7,80 % – айнамен тазалағыштар; 8,20 % – басқалары.
1-сурет – Ақаулардың түрлерінің үлестері

Қазақстан автомобиль жолдарының сапасы рейтингінде 141 елдің ішінде 93-ші орында. Өткен жылы 500 000 км жолға шамамен 25 000 зерттеу жүргізілді. Жүргізілген талдау қала маңындағы жолдарда қосымша 23 мыңнан астам жол белгілерін орнату қажет екенін көрсетеді. Тағы 57500 км жетілмеген жол инфрақұрылымы жол қауіпсіздігіне теріс әсер етеді [3].

Нәтижелер және талқылау

Елдегі апаттардың басты себептерінің бірі-бүкіл жол қозғалысының нашар ұйымдастырылуы, екіншісі-жол кептелісі, бірақ апаттардың көпшілігі автомобильдердің техникалық жағдайынан емес, жүргізушілердің, жол қозғалысына қатысушылардың кінәсінен болады.

Қазақстанда оқу орындарына қойылатын талаптарды қатаңдату, емтихан тапсыру және жүргізуші куәлігін алу қағидаларын қатаңдату, сондай-ақ жүргізушілерді даярлауға қойылатын талаптар туралы ұсыныстар бірнеше рет келіп түсті.

Сонымен қатар, зерттеулер көрсеткендей, жазатайым оқиғалар жаяу жүргіншілердің өздерінде жиі кездеседі. Талдау көрсеткендей елдегі үш көліктің ЖКО және адамдардың төртіншісі қайтыс болды немесе жарақат алды. 2020 жылы жаяу жүргіншілердің 200 000 жол қозғалысы ережелерін бұзуы тіркелді. ІІМ-нің пікірінше, тиісті қауіпсіздік жаяу жүргіншілер инфрақұрылымы халықаралық тәжірибе негізінде жақсы дамыған жағдайда ғана қамтамасыз етілуі мүмкін. Жалпы автокөлікте жолаушылар тасымалы кезінде жолаушылардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету бірқатар критерийлер мен қауіпсіздік шараларын қамтиды.

3-кесте – Қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізгі критерийлері

Көлік құралдарының техникалық жағдайы	Жүргізушілерді оқыту және біліктілігі
– Автобустардың, автомобильдердің және басқа да көлік құралдарының жарамдылығын қамтамасыз ету үшін оларды үнемі техникалық тексеру және күтіп ұстау. – Қауіпсіздік стандарттары мен техникалық қызмет көрсету стандарттарын сақтау.	– Қауіпсіз жүргізу және жолаушыларға қызмет көрсету ережелері саласында жүргізушілерді оқытуды жүргізу. – Жүргізушілердің жұмыс уақыты мен демалысына қатысты заңдарда белгіленген нормаларды сақтау.
Инфрақұрылым және жол қауіпсіздігі	Төтенше жағдайлар және эвакуация
– Жол инфрақұрылымының жай-күйі және қауіпсіздігін қамтамасыз ету. – Жолдарда айқын және көрінетін жол белгілерінің, бағдаршамдардың және басқа да қауіпсіздікті қамтамасыз ету құралдарының болуы.	– Апат болған жағдайда шұғыл шығу және эвакуациялау құралдарының болуы. – Төтенше жағдайлар кезіндегі іс-қимылдар бойынша жүргізушілер мен персоналдың тұрақты жаттығуларын өткізу.
Көліктегі қауіпсіздік жүйелері	Жолаушылардың ағынын бақылау
– Қауіпсіздік белдіктері мен жастық жүйелері сияқты қауіпсіздік жүйелерінің болуы. – Көлік құралында қауіпсіздік құралдарына тиісті қызмет көрсетуді және тексеруді қамтамасыз ету.	– Тәртіпсіздіктердің алдын алу үшін жолаушыларды отырғызу және түсіру процесін ұйымдастыру. – Багажды және жүктерді бақылау шаралары.
Жол қозғалысы ережелерін сақтау	Жолаушыларға жайлылықты және қауіпсіздігін қамтамасыз ету
– Жол қозғалысы заңдары мен ережелерін сақтау. – Жылдамдықты арттыру және алкогольдік немесе есірткілік мас күйінде басқару сияқты бұзушылықтардың алдын алу	– Көлік салонында тазалық пен тәртіпті сақтау. – Көлік құралдарында жолаушылар үшін қолайлы жағдайларды қамтамасыз ету.

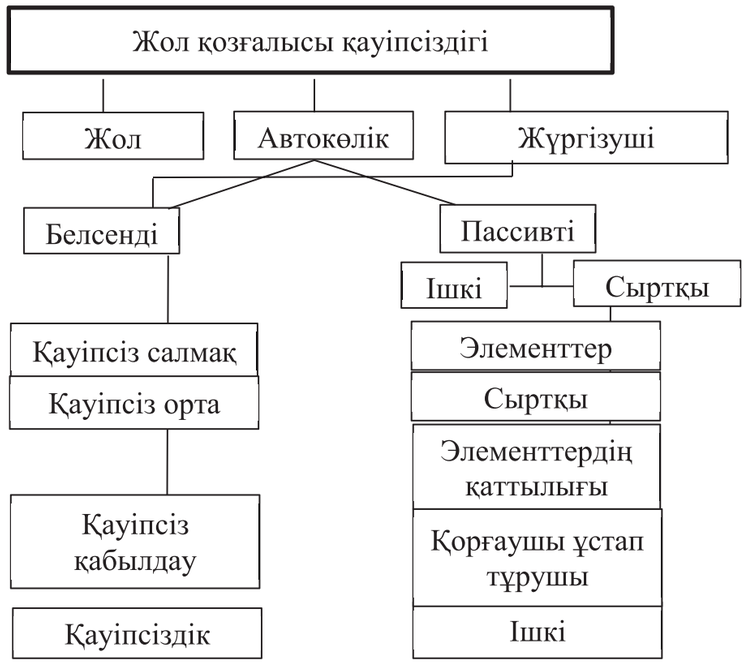
Осы критерийлерді есепке алу автокөліктегі жолаушылардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуге және ықтимал апаттар мен төтенше жағдайлардың алдын алуға көмектеседі.

Қазіргі уақытта көлік құралын белсенді қорғау тек шектеуші фактор болып табылады, бірақ жеке қорғаныс құралдарымен қамтамасыз етудің негізгі факторы емес. Бұл артықшылық жүргізушінің көлік жүргізу процесінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету жауапкершілігінің нәтижесі болып табылады. Сондықтан ғалымдар мен автомобиль инженерлері ұзақ уақыт бойы тек бір конфигурацияны

қолдана алады: жүргізушіге мүмкіндігінше көп көлік жүргізуге мүмкіндік беру үшін күш салу.

Қазіргі уақытта автомобильдің белсенді қауіпсіздігі тек шектеуші фактор болады, бірақ ЖҚҚ қамтамасыз етудегі басты фактор емес. Мұндай басымдық жүргізушінің көлік жүргізу процесінің қауіпсіздігі үшін алғашқы және ерекше жауапкершілігінің салдары болады. Осылайша, ғалымдар мен автокөлік инженерлері үшін ұзақ уақыт бойы бір ғана қондырғы болады: жүргізушіге қауіпсіз жүргізу мәселесінде максималды мүмкіндіктерді қамтамасыз ету үшін қолдан келгеннің бәрін жасау.

Адам қозғалысын басқару функцияларын орындай алатын ақпараттық және компьютерлік технологиялардың жоғары деңгейіне қарамастан, қазіргі қоғамда мұндай мүмкіндік жоқ. Бұл, ең алдымен, өз өмірі мен басқа адамдардың өмірі үшін жауапкершілікті жасанды интеллектке беру мүмкіндігіне моральдық қарсылықпен байланысты. Жол қозғалысы туралы айтатын болсақ, бұл процеске барлығы дерлік қатысатынын есте ұстаған жөн. Сондықтан жүргізуші-автомобиль ішкі жүйесіндегі өзара әрекеттесу сипаты және олардың себеп-салдарлық байланыстары туралы жақсы түсінік алу үшін алдымен көлік құралын басқару кезінде адамның мінез-құлық жүйесінің үш деңгейлі құрылымына жүгінген дұрыс (сурет 2) [3; 4].



2-сурет – Жол қозғалысы қауіпсіздігі классификациясы

Бақылау адам басқаратын сенсомоторлы мінез-құлықты білдіретіндіктен, «Расмуссен» оны үш санатқа бөледі:

– когнитивті мінез-құлық;

– белгілі бір ережелерге негізделген мінез-құлық;

– оқу тәртібі.

Осы тәсілдің терминологиясындағы жол қозғалысы қауіпсіздігін арттыру жөніндегі жұмыстың негізгі бағыттары бірінші деңгейді құру үшін жағдайларды азайту, жүргізу проблемаларын шешу үшін екінші деңгейді оңтайландыру және тұрақтылықтың үшінші деңгейінің барынша тиімділігі мен сенімділігін қамтамасыз ету болып табылады. Осы міндеттердің біріншісінің шешімі жүргізушілердің біліктілігі мен шеберлігін арттыру, сондай-ақ қозғалыстың оңтайлы бағытын таңдауға мүмкіндік беретін әртүрлі навигациялық жүйелерді әзірлеу болып табылады.

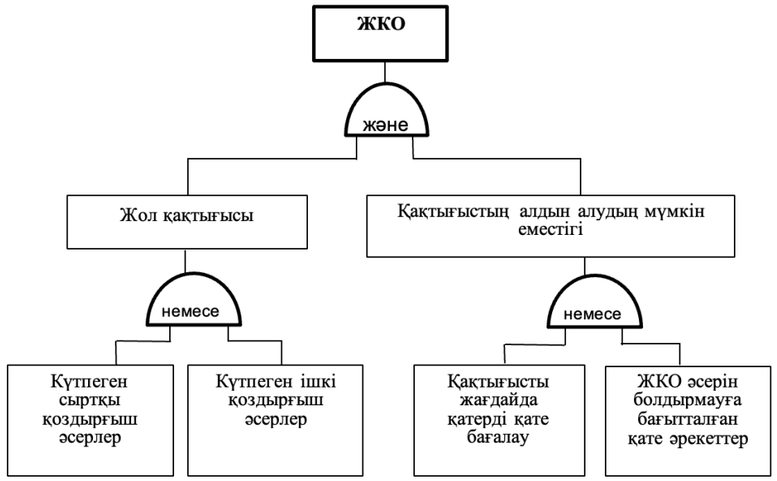
Жоғарыда аталған жүйеге тереңірек үңілмес бұрын, мәселені зерттеудің басқа әдісін қарастырайық. Егер біз апаттардың себептерін талдауға макроскопиялық тәсілді қолданатын болсақ, онда ол жол желісінің маңызды нүктелеріне негізделген, онда «апаттар» немесе жазатайым оқиғалар саны статистикалық тұрғыдан жоғары және олардың санын азайту мәселесі оңтайлы аумақта жол қозғалысын басқару [5].

Микроскөлікпиялық әдістеме тұрғысынан қарапайым жол қозғалысында көптеген жанжалды жағдайлар туындайды. Бұл әдіс «жүргізуші-көлік құралы-жол ортасы» жүйесінде болып жатқан процестерді талдауға негізделген және жеке блок «апаттардың себептері ағашы» деп аталады (сурет 3) [6].

Апат жағдайлары мен оқиғаның арасындағы айырмашылықты жазатайым оқиғаны сөзбе-сөз атамай-ақ анықтауға болады, бірақ оның пайда болуына себеп болған алғашқы екі блокты ажыратады, бұл апаттың бір шарты ғана. Апаттың екінші шарты – жүргізушінің жанжал жағдайындағы орынсыз әрекеті. Бұл екі блок логикалық операциямен байланысты, яғни машинаны құру үшін бір уақытта екі шартты орындау қажет [7].

Жанжалды жағдайлар көлік құралының ішіндегі кедергілерге (мысалы, қауіпті жүргізудің жағымсыз әсерлері, жүргізушінің қажетсіз әрекеттері, кейбір көлік жүйелеріндегі құқық бұзушылықтар) және көлік құралынан тыс (жол сипаттамаларының кенеттен өзгеруі немесе жол қозғалысына қатысушылардың күтпеген мінез-құлқы) байланысты болуы мүмкін.). Бұл жағдайда жүргізушінің мінез-құлқын үшінші деңгейден бірінші деңгейге өзгерту өте жағымсыз процесс.

Мұндай жағдайды басқару мәселесінің толық автоматтандырылған шешімін енгізу және осы кезеңде көрсетілген себептерге байланысты болмаған адамды жою арқылы болдырмауға болады. Бұл тәсілмен біз шұғыл түрде жүргізудің салдарын бейтараптандыратын және жүргізушінің рульдегі дұрыс емес әрекеттерін түзететін жүйені жасауымыз керек.



3-сурет – ЖКО себеп-салдарлық Ағаш бұтақтарын тасымалдауды оңтайландыру кезінде жағымсыз (жеткіліксіз) басқару әсерлері [6]

Мұндай «ағаш» жүйесі және «логикалық операциялардың» сәйкес төмен деңгейлі блоктарымен біріктіріледі, бұл сәтсіздік ықтималдығын едәуір азайтады (сурет 3) болжамды іске асыру үшін негізгі кемшіліктердің бірі ғана емес, сонымен қатар сәтсіздікке жауапты жүйенің бұзылуы қажет болады. бұл әсерлерді оңтайландыру және бақылау үшін қажет [8].

«ABS» жүйесі тарихта осындай жүйені құрған алғашқы жүйе болды. Ол руль дөңгелегі тудыратын тежеу күшін азайтады, бұл тежеу кезінде ең тиімді тартуды қамтамасыз етеді. Автоматты тежегіш кедергісін басқару жүйесі (ASC) үдеткіш педальды басқан кезде жүргізушінің артық қуатын шектейді.

VMW-ның белсенді кинематикалық артқы суспензия жүйесі артқы доңғалақты басқару режимін (ARK) жүзеге асырады, бұл көлікке қалаға кірген кезде де экстремалды қозғалыс жағдайында бүйірлік тұрақтылықты сақтауға мүмкіндік береді. Бұған алдыңғы және артқы оське бағытталған бүйірлік күштерді бөлу арқылы қол жеткізіледі. Осылайша, динамикалық тұрақтылықты басқару жүйесі (DSC) барлық операциялық режимдер мен шектеулі маневрлердің барлық түрлері үшін әмбебап шешім болып табылады [9].

Бір ерекшелігі, бұл жүйелердің жұмыс істеуі жоғарыда аталған басқару рөліне тікелей қайшы келмейді, өйткені бұл жүргізуші қол жеткізуге тырысатын басқарылатын әсердің оңтайлы параметрлеріне әкеледі. Практикалық шешімнің мысалы ретінде біз жүйелерді басқару мен тұрақтылықты оңтайландырудың маңызды көрсеткіштерін береміз.

Автокөліктің тұрақтылығы мен басқарылуын жақсартуға бағытталған дәстүрлі емес зерттеу бағыттары бар. Қазіргі уақытта аэродинамика сияқты сыртқы күштерді басқаруға аз көңіл бөлінеді. Дегенмен, мұндай басқару қуатын әртүрлі

қолданбаларда және жоғарыда сипатталған әртүрлі тапсырмаларды шешу үшін пайдалануға болады.

Екінші жағынан, бұл күштерді ашық басқарылатын арнайы аэродинамикалық құрылғыларды пайдалану арқылы көлік құралының басқарылуы мен тұрақтылығын жақсарту үшін пайдалануға болады, машинаның сызықтық динамикалық әрекеті).

Келесі көңіл бөлетін фактор «Көлік параметрлерін анықтау». Ол дәлдігі мен күрделілігі зерттеу мақсатына байланысты бірнеше модельдерді қолданады. Сонымен қатар, ең дәл жол сынақтары кейбір параметрлерді анықтау арқылы жүргізілмейді, бұл әдетте үлкен мәселе емес. Модельдің физика-математикалық аппараты жағдайды толығымен талдайды, алынған параметрлерді кіріс сипаттамалары ретінде пайдаланады және көрсеткіштерді толық шығару үшін қажетті мәндерді жоғары дәлдікпен болжайды. Осылайша, жол сынақтарының максималды нәтижелеріне ең аз шығындармен қол жеткізіледі.

Мәселені одан әрі дамыту жүйелік тәсіл негізінде белсенді қауіпсіздік параметрлерін реттеу принциптерін әзірлеу мүмкіндігін көрсетеді:

а) жол-көлік оқиғаларын талдау (терең талдау қиынға соғады, өйткені барлық қажетті статистикалық мәліметтер алынбайды);

б) жекелеген жүйелер мен компоненттердің сенімділігін талдау, ауытқу ықтималдығын, айрықша факторларды (неғұрлым объективті және ғылыми) анықтау;

в) автомобиль өнеркәсібі үшін стандарттарды барлық көрсеткіштер бойынша 50 %-ға және басқа көрсеткіштер бойынша 50 %-ға белгілейтін Халықаралық көлік ұйымының (БҰҰ ЕЭК) талаптарымен реттелетін ұлттық нормативтік құжаттардың (ISO) қағидаттарына сәйкестігін талдау.

Қорытынды

Қазіргі уақытта жолаушылар көлігінің жұмысы соңғы уақытқа дейін шешілмеген күрделі мәселелермен қатар жүруде. Бұл жол қауіпсіздігі мен техникалық қызмет көрсетудің төмендігін білдіреді. Жолаушылар тасымалы проблемасы тарифтерді (қалалық және қала маңындағы көлік) реттеуді қаржыландырудың төмен деңгейімен және қалааралық және өңіраралық желілерде заңсыз тасымалдардың үлкен өсуімен байланысты.

Сондай-ақ, Еуропада және біздің елде жолаушылардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету тәсілдерінде айтарлықтай айырмашылықтар бар екендігі атап өтілді. Еуропаның дамыған елдерінде бастапқы дайындық деңгейі тереңірек, ал ұзақтығы ұзағырақ. Сонымен қатар, лицензияны бекіту жыл сайын қайталанады. Жұмыс, демалыс және жол қозғалысын ұйымдастырудың басқа түрлері туралы айтпағанда. Жыл сайын дерлік жаңа белсенді қауіпсіздік жүйелері пайда болады, олар жүргізушінің жағдайын ішінара қадағалап, нақты жол жағдайларындағы қателерді түзете алады, олардың кейбіреулері (мысалы, DBL жүйесі көлік жылдамдығын шектеу жүйесі және басқалары) жүргізушінің қателіктерін кешіктіруі мүмкін. Жаңа қауіпсіздік жүйесін пайдалануды үйрену жыл сайынғы қайта даярлаудың бөлігі болып табылады. Еуропада автобус жүргізушісінің кәсібі

құрметтеледі және жақсы төленеді, қоғамдық қауіпсіздіктің жоғары деңгейін айтпағанда.

Көлік құралын басқару жүйесіне жүргізушінің жұмысын жеңілдететін және сол арқылы белгілі бір жүргізу функцияларын орындайтын қауіпті ескерту құрылғыларын қосу арқылы жол қауіпсіздігін арттыруға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Автомобиль көлігімен жолаушылар мен багажды тасымалдау қағидалары [Мәтін] : ҚР Индустрия және жаңа технологиялар министрінің 2015 жылғы 26 наурыздағы № 349 бұйрығы.

2 Алматыда жолаушылар тасымалының қауіпсіздігі талқыланды [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://polisia.kz/ru/bezopasnost-passazhirskih-perevozok-obsudili-v-almaty/ysclid=meoaqhoxxw792589070 (Дата обращения: 15.11.2025).

3 **Загорский, М. А., Володкин, П. П.** Эффективность организации регулярных перевозок пассажирским автомобильным транспортом [Текст]. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2012. – 154 с.

4 **Антонов, М. Н.** Совершенствование методов обоснования параметров транспортного обслуживания населения по автобусным маршрутам регулярных перевозок [Текст]. – М. : 2010. – 157 с.

5 **Полякова, С. В.** Стратегические приоритеты обеспечения безопасности участников дорожного движения [Текст] // Правопорядок: история, теория, практика. – 2015. – № 1. – С. 85–89.

6 **Тимакова В. В.** Некоторые аспекты международного опыта в обеспечении безопасности дорожного движения [Текст] // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2012. – № 2(3). – С. 36–39.

7 **Россинский, Б. В.** Административные правонарушения как угроза национальной безопасности [Текст] // Вестник Университета имени О. Е. Кутафина (МГЮА). – 2022. – № 11(1). – С. 30–40.

8 **Ходес, В. И.** Управление автомобилем и активная безопасность (водитель, механик, инженер) [Текст]. – Волгоград : Изд-во ВолгГТУ, 2010. – 140 с.

9 **Дятлов, М. Н.** Уменьшение аварийных ситуаций пассажирских автобусных перевозок путём внедрения современных технологий безопасности [Текст] // Молодой учёный. – 2013. – № 5(52). – С. 52–55.

10 Автомобиль көлігімен жүктерді тасымалдау қағидаларын бекіту туралы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V1500012463 (Дата обращения: 15.11.2025).

REFERENCES

1 Avtomobil kóligimen jolaoşylar men bagajdy tasymaldau qagidalary [Rules for Passenger and Baggage Transportation by Automobile Transport] [Text] // Qazaqstan Respublikasynyń Industriya jáne jańa tehnologiyalar ministriniń 2015 jylǵy 26 naýryzdagy № 349 búiyryǵy.

2 Almatyda jolaoşylar tasymalynyń qauipsizdigi talqylandy [Passenger transport safety discussed in Almaty] [Text] // [Electronic resource]. – https://polisia.kz/ru/bezopasnost-passazhirskih-perevozok-obsudili-v-almaty/ysclid=meoaqhoxxw792589070 (Accessed: 15.11.2025).

3 **Zagorsky, I. O.** Effektivnost organizatsii regulyarnykh perevozok passazhirskim avtomobilnym transportom [Efficiency of organizing regular passenger automobile transport operations] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2012. – 154 p.

4 **Antonov, M. N.** Sovershenstvovanie metodov obosnovaniya parametrov transportnogo obsluzhivaniya naseleniya po avtobusnym marshrutam regulyarnykh perevozok [Improvement of methods for substantiating the parameters of public transport services on regular bus routes] [Text]. – M. : 2010. – 157 p.

5 **Polyakova, S. V.** Strategicheskie prioritety obespecheniya bezopasnosti uchastnikov dorozhnogo dvizheniya [Strategic priorities for ensuring the safety of road users] [Text] // Pravoporyadok: istoriya, teoriya, praktika. – 2015. – № 1. – P. 85–89.

6 **Timakova, V. V.** Nekotorye aspekty mezhdunarodnogo opyta v obespechenii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Some aspects of international experience in ensuring road traffic safety] [Text] // Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii. – 2012. – № 2(3). – P. 36–39.

7 **Rossinskiy, B. V.** Administrativnye pravonarusheniya kak ugroza natsionalnoy bezopasnosti [Administrative offenses as a threat to national security] [Text] // Vestnik Universiteta imeni O. E. Kutafina (MGYuA). – 2022. – № 11(1). – P. 30–40.

8 **Khodes, V. I.** Upravlenie avtomobilem i aktivnaya bezopasnost (voditel, mekhanik, inzhener) [Driving and active safety (driver, mechanic, engineer)] [Text].– Volgograd : Izd-vo VolgGTU, 2010. – 140 p.

9 **Dyatlov, M. N.** Umenshenie avariynykh situatsiy passazhirskikh avtobusnykh perevozok putem vnedreniya sovremennykh tekhnologiy bezopasnosti [Reducing emergency situations in passenger bus transportation through modern safety technologies] [Text] // Molodoy Uchenyy. – 2013. – № 5(52). – P. 52–55.

10 Avtomobil kóligimen júkterdi tasymaldau qagidalaryn bekitý turaly [On approval of the rules for cargo transportation by automobile transport] [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V1500012463 (Accessed: 15.11.2025).

Поступило в редакцию 19.04.25.
Поступило с исправлениями 04.08.25.
Принято в печать 26.08.25.

*Т. С. Бекетов[1], В. Ф. Лукиных[2], С. Болатқызы[3], Р. Х. Искаков[4]
[1,3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]Государственный аграрный университет, Россия, г. Красноярск;
[4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
19.04.25 ж. баспаға түсті.
04.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
26.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

АКТИВНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК АВТОТРАНСПОРТОМ

В данной статье мы проанализировали неблагоприятную ситуацию в системе пассажирских перевозок в нашей стране и разработали научно-практические рекомендации по повышению безопасности дорожного движения. Ведь проблема высокой дорожно-транспортной аварийности поставлена в числе самых актуальных в стране из-за высоких темпов автомобилизации населения. Поэтому снижение количества ДТП является одной из приоритетных задач, поставленных перед современным обществом. На заседании Кабинета министров под председательством Премьер-министра Олжаса Бектенова 15 сентября 2025 года в рамках реализации поручений Главы государства были рассмотрены вопросы обеспечения безопасности дорожного движения и пешеходов. Для проведения исследования государственными изданиями использованы точные статистические данные в области пассажирских перевозок, научно-теоретические рекомендации ведущих ученых, а также методы выявления вредных факторов при реализации задачи по обеспечению безопасности внутренних пассажирских перевозок. Со стороны научного предложения: может облегчить работу водителя, тем самым повысив безопасность вождения, добавив в систему управления транспортным средством специальные устройства, которые действуют как водитель и предупреждают об опасности. Практическая значимость: показывает, что в дальнейшем принципы регулирования параметров активной безопасности могут быть разработаны на основе системного подхода. Результаты. Основными причинами гибели людей являются: несоответствие дорожной инфраструктуры современным требованиям; низкая готовность и дисциплинированность водителей; отсутствие средств связи и машин скорой помощи; отсутствие целенаправленной просветительской работы с населением.

Ключевые слова: пассажир, транспорт, автомобиль, безопасность дорожного движения, фактор, водители.

T. S. Beketov[1], V. F. Lukinykh[2], S. Bolatkyzy[3], R. H. Iskakov[4]
[1,3]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]State Agrarian University, Russian Federation, Krasnoyarsk;
[4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 19.04.25.
Received in revised form 04.08.25.
Accepted for publication 26.08.25.

ACTIVE SAFETY OF PASSENGER TRANSPORTATION BY CAR

In this article, we have analyzed the unfavorable situation in the passenger transportation system in our country and developed scientific and practical recommendations for improving road safety. After all, the problem of high traffic accidents is one of the most urgent in the country due to the high rates of motorization of the population. Therefore, reducing the number of accidents is one of the priorities set for modern society. At a meeting of the Cabinet of Ministers chaired by Prime Minister Olzhas Bektenov on September 15, 2025, issues of ensuring road safety and pedestrian safety were considered as part of the implementation of the instructions of the Head of State. To conduct the research, government publications used accurate statistical data in the field of passenger transportation, scientific and theoretical recommendations from leading scientists, as well as methods for identifying harmful factors in the implementation of the task of ensuring the safety of domestic passenger transportation. From the scientific side: it can facilitate the driver's work, thereby increasing driving safety by adding special devices to the vehicle control system that act as a driver and warn of danger. Practical significance: it shows that in the future the principles of regulation of active safety parameters can be developed on the basis of a systematic approach. Results. The main causes of death are: non-compliance of the road infrastructure with modern requirements; low readiness and discipline of drivers.; lack of communication facilities and ambulances; lack of targeted educational work with the population.

Keywords: passenger, transport, car, road safety, factor, drivers.

МРНТИ 73.49.99

https://doi.org/10.48081/WVFR9686

Н. К. Булатов[1], А. Б. Ахметжанова[2], *А. Б. Увалиева[3], А. К. Умбетова[4], К. Б. Манапов[5]

[1,2,4]Кокшетауский Университет имени А. Мырзахметова, Республика Казахстан, г. Кокшетау;
[3]Алматы Менеджмент университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[5]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3721-2280
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-9945-042X
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5609-2563
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6407-8216
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9459-8753

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ ПРИ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТАХ КОНВЕЙЕРОМ В КРЫТЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

В этой статье на основе исследования распределяемости концентрации пыли вокруг частей ленточного конвейера при погрузке и выгрузке пылящих грузов в крытых транспортных средствах были определены основные эффективные факторы распределения концентрации пыли. Это исследование важно для изучения процесса погрузки и разгрузки пылящих грузов применяя новые технологии, которые помогают контролировать концентрацию пыли в данной среде. Проведены замеры анемометром скорости подачи поддува или ветра и с использованием пылеуловителя концентрацию пыли методом мембранного фильтра для анализа механизма распределения концентрации пыли и соответствующих факторов воздействия при работе с пылящим грузом. В соответствии с теорией подобия была создана модель подобия дорожного полотна ленточного конвейера и установлены различные точки измерения на основе пространственного распределения модели в этом исследовании. Кроме того, распределение концентрации пыли в модели дорожного полотна с различными параметрами было исследовано методом фильтрующей мембраны. Из этого процесса были сделаны выводы по потоку воздуха, концентрации пыли в крытых грузовых вагонах, основные факторы, влияющие на распределение концентрации пыли и влажности с замером параметров при разных скоростях движения конвейера.

Ключевые слова: пылящие грузы, ленточный конвейер, погрузочно-разгрузочные операции, крытое транспортное средство, концентрация пыли.

Введение

В мешковых тарах расфасованные порошкообразные, зерновые, и строительные грузы при погрузочно-разгрузочных операциях в крытых помещениях и в транспортных средствах в связи с тем, что относятся к пылящим грузам создают неблагоприятную обстановку для работающих людей и техники. Если люди при длительной и постоянной работе в данной обстановке получают профессиональные болезни легких и дыхательных путей, то оборудования и техника, задействованная при погрузке и загрузке грузов также подвергаются к процессам быстрого изнашивания. Такие как, например, оседание пыли на электродвигателях приводят быстрее к перегоранию обмотки, при оседании на движущих частях быстрее выводятся из строя подшипники и т.д. [1; 2; 3; 4].

Материалы и методы

Создание аналогичной модели. Размеры прототипа выражены с учетом размеров крытых транспортных средств наиболее часто задействованные в перевозке пылящих грузов и за основу взят крытый вагон со следующими внутренними размерами: длина кузова – 13844 – 18560 мм, ширина кузова – 2764 – 3760 мм, высота от пола по боковой стене – 2791 – 3050 мм, с дверным проемом – 3794 х 2343 мм. Данный вагон загружается или выгружается конвейерной системой, состоящей из двух ленточных конвейеров. Один конвейер располагается в транспортном средстве, на который через бункер ведет загрузку (или выгрузку) второй снаружи транспортного средства стоящий конвейер. Модель площади внутренней части вагона берем по следующим размерам: 3 м в высоту, 2,8 м в ширину и 8 м в длину. Размеры ленточного конвейера составляют: 1,2 м в ширину, 1,4 м в высоту с подъемом на 1 м и в поперечнике 1 м. Таким образом, соответствующую модель точки замеров пыли в пределах размера действия пыли спроектируем как 1,85 м в высоту, 2 м в ширину и 6 м в длину.

Ленточный конвейер длиной 5 м расположен в центре вагона и начинается в области дверного проема и заканчивается на расстоянии 1,5 м от торцевой стены вагона. Встраиваемый вентилятор и воздуховод установлены с противоположной стороны открытого проема, откуда идет погрузка или разгрузка конвейерной системой пылящего груза в тарированного в мешках, с высотой выхода по центру 1,3 м и на расстоянии 0,2 м от правой стены. Воздух возвращается после столкновения с одиночной насадкой, а затем течет вдоль проезжей части. Схема аналогичной модели размещения ленточного конвейера в крытом вагоне показана на рисунке 1.

Методы измерения экспериментальных параметров и расположение точек измерения.

В этом эксперименте использовался процесс погрузки и выгрузки цемента в мешковой таре из полипропилена и бумаги на железнодорожных тупиках в открытой местности СВХ в городе Астана, марки М400 и М500 Д20, с исходной влажностью – 0,1 % и переносная вытяжная система с циклонным фильтром для очистки воздуха с подсоединением гибкой трубы (рисунок 2) [5].

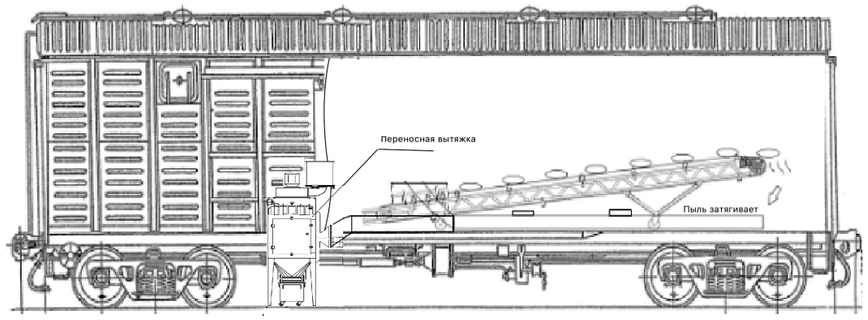


Рисунок 1 – Схема модели погрузки мешкотары с пылящим характером груза в крытом товарном вагоне с использованием ленточного конвейера

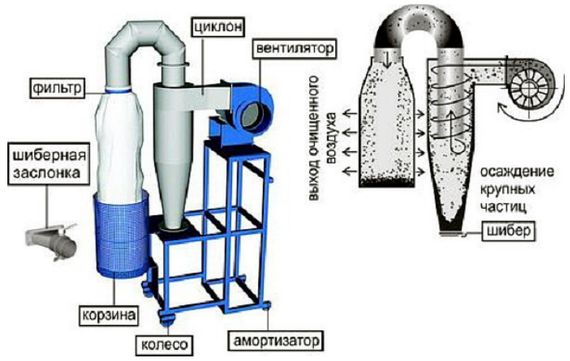


Рисунок 2 – Переносная вытяжная система с циклонным фильтром для очистки воздуха

Параметры, которые необходимо проверить в эксперименте, включают скорость ветра и концентрацию пыли. Для измерения скорости ветра использовался многофункциональный анемометр Testo 410-2 (на рисунке 3). Во время измерения тепловой датчик был установлен в направлении потока ветра, чтобы зафиксировать значение потока ветра, когда оно будет стабильным. Тем временем концентрацию пыли измеряли методом мембранного фильтра с использованием пылеуловителя FC-4 (на рисунке 4). Общая концентрация пыли может быть рассчитана по приращению фильтрующей мембраны и выработке газа [6].

Рисунок 3 – Многофункциональный анемометр Testo 410-2 для измерения скорости подачи поддува или ветра

Точки измерения экспериментальных параметров

На основе расположения модели подобия точки измерения скорости и точки измерения концентрации пыли были установлены для регистрации распределения воздушного потока и концентрации пыли. Каждая точка должна быть измерена не менее трех раз для анализа ошибок. И средние значения были приняты в исследовании. [7; 8]

Рисунок 4 – Пылемер АтМАС

(1) Точки измерения скорости

На основе модели длины дорожного полотна и теоретического поля струйного течения выбрано 17 поперечных сечений в модели дорожного полотна, и в каждом поперечном сечении были размещены точки измерения скорости 3 × 4 для измерения скорости ветра. На рисунке 5 показано положение каждой точки измерения. Ось W представляет расстояние между точками измерения и левой стеной; ось H представляет расстояние от пола. Измерительные сечения были установлены интенсивно в передней области, в то время как в задней области они были редкими.

(2) Точки измерения концентрации пыли

Для расположения точек измерения концентрации пыли в модели дорожного полотна были выбраны шесть поперечных сечений, и на каждом поперечном

сечении были размещены точки измерения концентрации пыли размером 3 × 4, аналогично точкам измерения скорости. Точки измерения были расположены по осевой линии левого борта конвейера, по осевой линии правого вентилятора ствола и по центральным осям конвейера вдоль направления движения ленточного конвейера. Точки были установлены через каждые 0,8 м, начиная от загрузочного отверстия хвостовой части до головы. Расположение точек измерения концентрации пыли в аналогичной экспериментальной модели показано на рисунке 6 [9; 10].

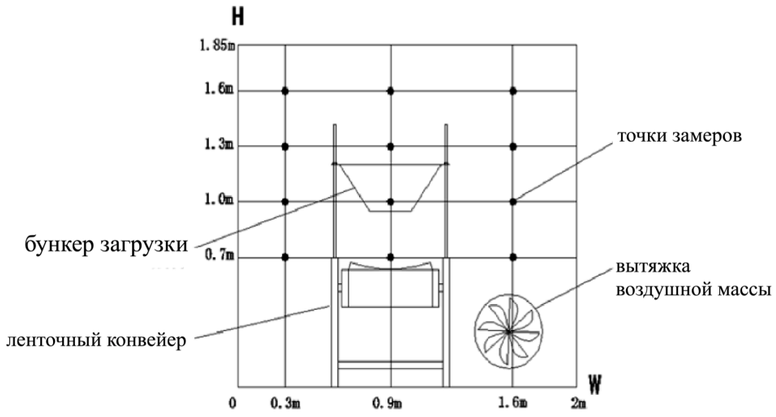
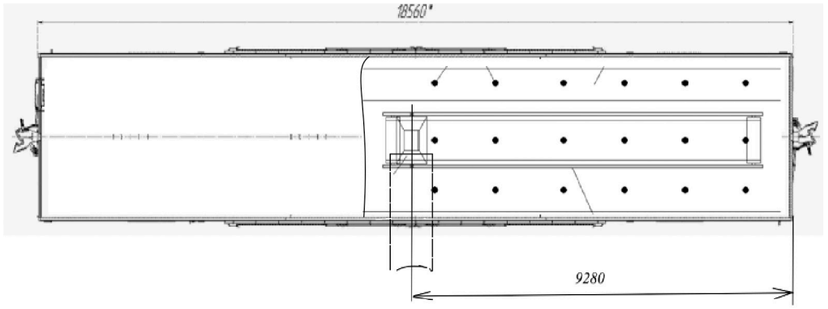


Рисунок 5 – Расположение точек замеров пыльности



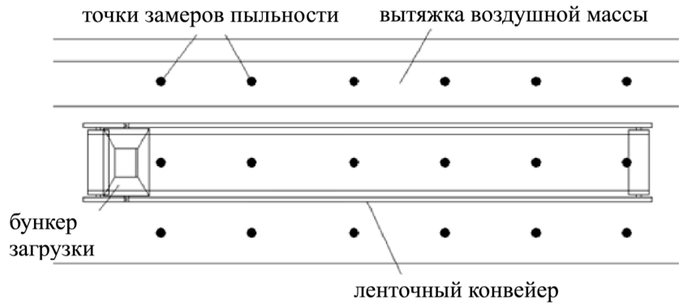


Рисунок 6 – Расположение точек измерения концентрации пыли

В соответствии с теорией подобия была создана модель подобия дорожного полотна ленточного конвейера и установлены различные точки измерения на основе пространственного распределения модели в крытом транспортном средстве при работе с мешкотарном грузом. Из этого процесса были сделаны выводы, что в модели подобия точки измерения скорости и точки измерения концентрации пыли были установлены для регистрации распределения воздушного потока и концентрации пыли. Точки измерения предлагается расположить по осевой линии левого борта конвейера, по осевой линии вентилятора ствола и по центральным осям конвейера вдоль направления движения ленточного конвейера. Существует хорошее соответствие между распределением поля потока и полевыми данными, что помогает проводить аналогичные эксперименты [11].

Результаты и обсуждение

1) Распределение воздушного потока

Для изучения распределения воздушного потока в модели ленточного конвейера в эксперименте скорость выхода пыли составляла около 7 м/с. Места на высоте H = 1,0 м и H = 1,6 м были выбраны для демонстрации результатов исследования в данной статье. На рисунках 7 и 8 показаны изменения скорости плоскости H=1,0 м и H=1,6 м с поперечными сечениями W=0,3 м, W=0,9 м, W = 1,6 м соответственно.

1 Скорость возвращающегося воздуха резко падает и имеет тенденцию быть стабильной в месте, расположенном на расстоянии 3,5 м от одиночного напора в плоскости H = 1,0 м и поперечных сечениях W = 0,9 м и W = 1,6 м. В поперечном сечении W = 3,0 м скорость ветра сначала уменьшается, затем увеличивается, а затем снова резко уменьшается. Она также имеет тенденцию быть стабильной в месте, удаленном на 3,5 м от одиночного напора. Скорость, по существу, остается на уровне около 0,32 м/с в области, удаленной более чем на 3,5 м.

На плоскости H = 1,6 м скорость возвращающегося воздуха сначала резко уменьшается со стороны одиночного напора и достигает минимального значения в месте на расстоянии 3-4 м от стороны одиночного напора. Затем скорость постепенно увеличивается и, как правило, остается постоянной в месте,

расположенном на расстоянии 5 м от торца вагона, при скорости ветра около 0,4 м/с.

Поле воздушного потока относительно стабильно. Оно соответствует распределению поля наклонной ленточного конвейера 11/96. Поэтому целесообразно провести эксперимент по подобию распределения пыли на проезжей части ленточного конвейера.

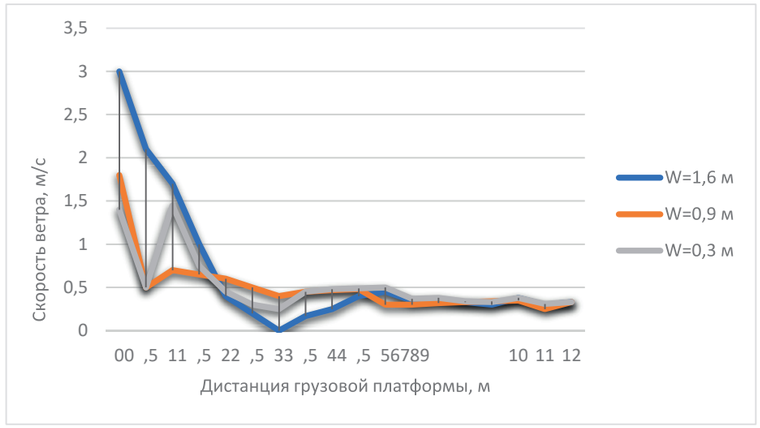


Рисунок 7 – Изменение скорости в плоскости H = 1,0 м

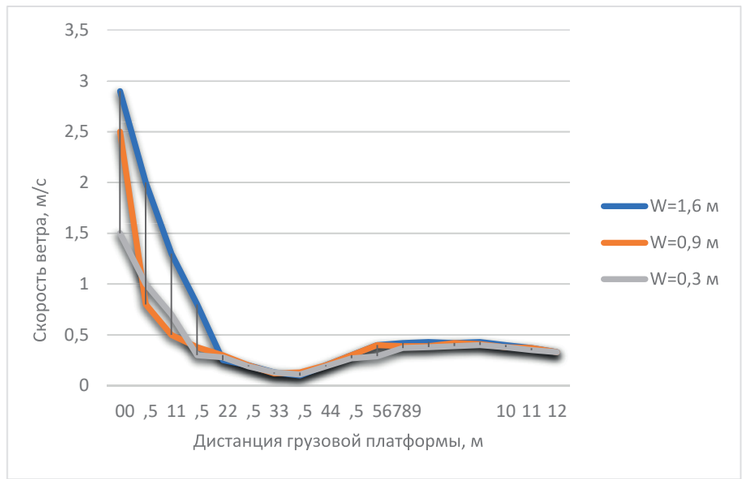


Рисунок 8 – Изменение скорости в плоскости H = 1,6 м

2) Распределение концентрации пыли

Чтобы исследовать распределение концентрации пыли в модели дорожного полотна (ленточного конвейера), для проведения теста концентрации пыли

была выбрана скорость ветра 7 м/с у дверного проема. Ленточный конвейер движется по воздуху со скоростью 1,5 м/с, влажность воздуха составляет 1,97%, скорость подачи - 1,5 кг/с, высота подачи - 34 см. Рисунки 9 и 10 иллюстрируют распределение концентрации пыли на высоте H = 1,0 м в различных поперечных сечениях проезжей части и различных левых тротуарах. Видно, что:

1 Пыль следует направлению потока воздуха, проходящего через верхнюю ленту, и рассеивается в боковом направлении после образования на поверхности верхней ленты и загрузочного отверстия. Концентрация пыли сначала постепенно увеличивается до максимального значения, а затем медленно уменьшается с увеличением расстояния от загрузочного отверстия.

2 В горизонтальном направлении концентрация пыли достигает наибольшего значения в центральной части ленты (W = 0,9 м) и становится более низкой с правой стороны (W = 1,6 м) ленты, в то время как наименьшее значение она получает с левой стороны (W = 0,3 м) ленты. Кроме того, максимальные значения концентрации пыли в каждом поперечном сечении отображаются в разных положениях. Максимальные значения получены на расстоянии 1,7 м, 2,5 м и 3,3 м от места загрузки через бункер в центральном, левом и правом местах ленты соответственно.

3 В вертикальном направлении концентрация пыли достигает максимального значения в точке H = 1,0 м и постепенно снижается от этого места к области вверх и вниз.

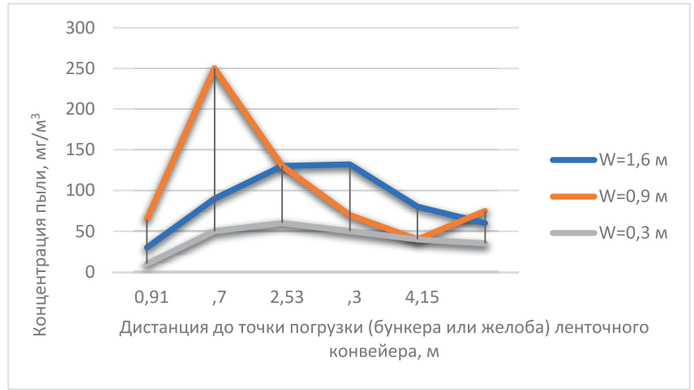


Рисунок 9 – Изменения концентрации пыли в различных поперечных сечениях дорожного полотна

3) Распределение концентрации пыли при различных параметрических условиях

Согласно полевым исследованиям и обзору соответствующей литературы, можно заметить, что направление воздушного потока, средняя скорость ветра, рабочая скорость ленты, влажность воздуха, скорость подачи и высота подачи являются шестью основными факторами, влияющими на концентрацию

пыли на проезжей части ленточного конвейера. В исследовании используется анализ распределения концентрации пыли на поперечной линии центрального поперечного сечения тротуара (W = 0,3 м) и плоскости H = 1,0 м путем изменения параметров воздействия пыли.

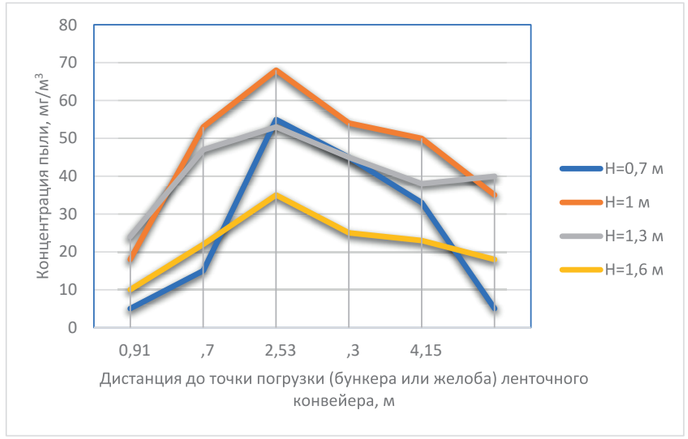


Рисунок 10 – Изменение концентрации пыли в плоскостях разной высоты

(1) Распределение концентрации пыли при различных направлениях ветра на проезжей части

Для исследования влияния направлений воздушного потока на распределение концентрации пыли на проезжей части ленточного конвейера распределение концентрации пыли измерялось в условиях вдоль направления ветра и против направления ветра на проезжей части. Это можно видеть (рисунок 11).

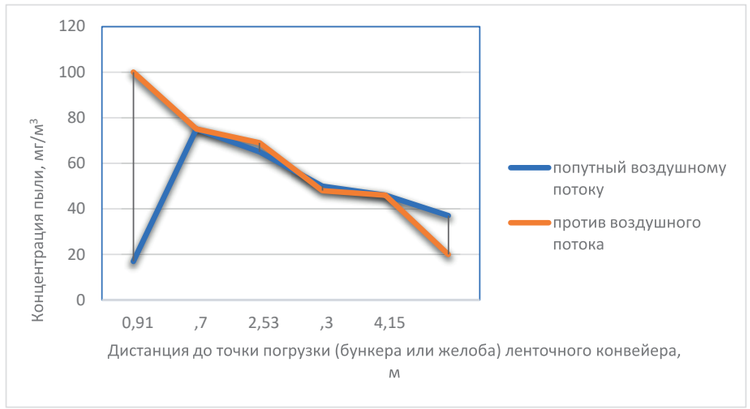


Рисунок 11 – Изменение концентрации пыли при различных направлениях ветра

Концентрация пыли постепенно снижается со стабильной скоростью, когда ленточный конвейер работает против направления ветра. Концентрация пыли достигает максимального значения в устье сбрасывателя и минимального значения в головке ленточного конвейера. После выхода из выпускного отверстия пыль не может рассеяться в направлении движения из-за обратного потока воздуха. Пыль, образующаяся из головки и поверхности ленты, ветром разносится к выпускному отверстию, что приводит к максимальному значению концентрации пыли в области выпускного отверстия.

В целом, концентрация пыли выше, когда ленточный конвейер работает против направления ветра. Это связано с тем, что руда на поверхности дорожного полотна движется против ветра и относительная скорость больше. Количество нагнетаемого воздуха больше, и с поверхности образуется больше частиц пыли.

(2) Распределение концентрации пыли при различных средних скоростях движения по проезжей части

Распределение концентрации пыли было измерено в условиях различных средних скоростей движения по проезжей части, и результаты показаны на рисунке 12. При скоростях съезда 3,5 м/с, 7 м/с, 10,5 м/с и 14 м/с средние скорости поперечных сечений проезжей части составляют 0,15 м/с, 0,30 м/с, 0,45 м/с и 0,6 м/с соответственно.

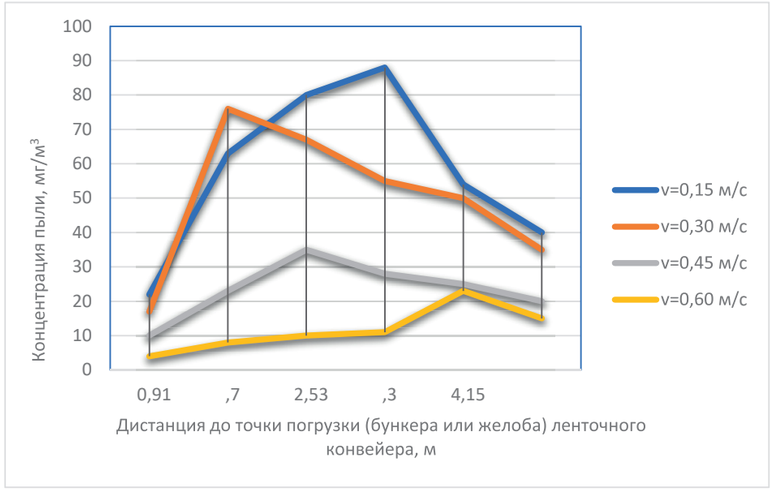


Рисунок 12 – Изменение концентрации пыли при различной скорости ветра

На проезжей части со средней скоростью 0,15~0,6 м/с, чем выше скорость ветра, тем ниже может быть концентрация пыли. Максимальное значение достигается на самом удаленном участке от падающей мыши.

Можно отметить, что более высокая скорость ветра может способствовать растворению и удалению пыли. Кроме того, расстояние перемещения пыли больше

по сравнению с расстоянием при более низкой скорости ветра. Следовательно, положение максимального значения концентрации пыли находится дальше от зоны подачи.

(3) Распределение концентрации пыли при различных рабочих скоростях ленточного конвейера

Распределение концентрации пыли оценивается при различных рабочих скоростях ленточного конвейера 1,0 м/с, 1,5 м/с, 2,0 м/с и 2,5 м/с соответственно. Результаты показаны на рисунке 13.

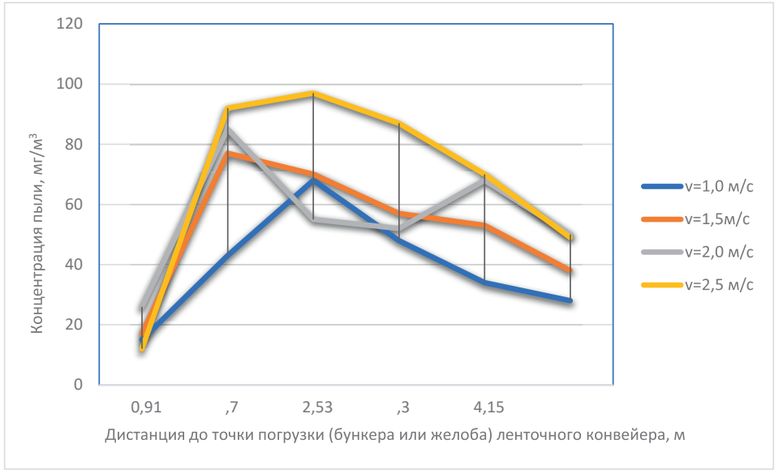


Рисунок 13 – Изменения концентрации пыли при различных рабочих скоростях ленточного конвейера

Когда скорость ленточного конвейера находится в пределах 1,0~2,5 м/с, распределение концентрации пыли соответственно увеличивается с увеличением скорости ленты, и положение максимального значения находится ближе к загрузочному отверстию.

При более высокой скорости движения на проезжей части образуется большее количество нагнетаемого воздуха, поэтому с воздухом будет выделяться больше пыли. Кроме того, концентрация пыли также увеличивается с увеличением частоты и амплитуды вибрации ленты.

Частицы пыли не могут вовремя удаляться при быстром движении ленты. Следовательно, место, где концентрация пыли достигает максимального значения, находится близко к загрузочному отверстию.

(4) Распределение концентрации пыли при различной влажности воздуха

Распределение концентрации пыли различной влажности исследуется с помощью эксперимента по сушке. Влажность воздуха изменяется в зависимости от погодных условий (солнечно, прохладно, пасмурно, в дождь, в снег) снаружи транспортного средства. Для измерения распределения концентрации пыли

выбрано шесть различных содержаний влаги в воздухе (1.65 %, 1.97 %, 2.17 %, 2.36 % и 3,85 %). Результаты представлены на рисунке 14.

Распределение концентрации пыли уменьшается по мере увеличения влажности воздуха. Когда влажность воздуха постепенно увеличивается с 1,65 % до 3,09 %, концентрация пыли снижается до 20 мг/м^3 с 80~120 мг/м^3. Когда содержание влаги превышает 3,09 %, концентрация пыли снижается до стабильного значения примерно 5~15 мг/м^3.

Хотя увеличение влажности воздуха может помочь подавить образование пыли, это может вызвать некоторые негативные явления, такие как проскальзывание ленты и выравнивание. Лента работает в обычном режиме при этих шести различных значениях влажности воздуха, поэтому рекомендуется контролировать влажность воздуха на уровне около 3,09 %, когда лента находится в эксплуатации.

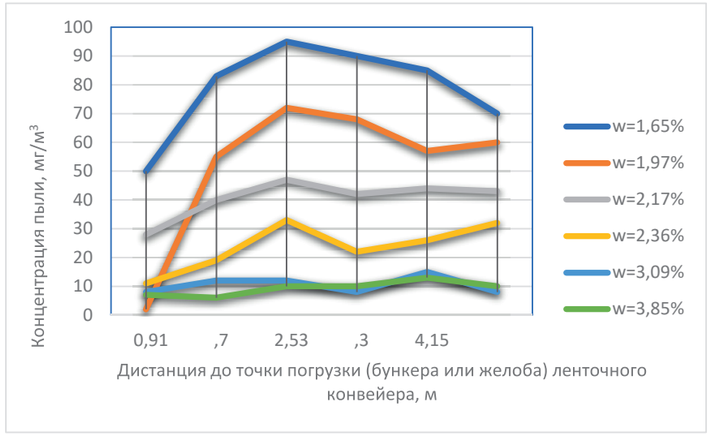


Рисунок 14 – Изменения концентрации пыли при различном содержании влаги

(5) Распределение концентрации пыли при различных скоростях питания

Чтобы исследовать концентрацию пыли при различных скоростях питания, объемы транспортировки были изменены для получения различных скоростей питания. В эксперименте выбраны три скорости подачи (0,5 кг/с, 1,0 кг/с и 1,5 кг/с). Распределение концентрации пыли при этих скоростях подачи показано на рисунке 15.

Концентрация пыли увеличивается с увеличением скорости подачи, когда диапазон скоростей составляет 0,5~1,5 кг/с. Чем выше скорость подачи, тем больше получается объем транспортируемого груза в мешках. Следовательно, в процессе работы ленты выделяется больше пыли при увеличении количества подаваемого воздуха. С другой стороны, увеличивающаяся рабочая нагрузка ленточного конвейера приводит к усилению вибрации, что является еще одной причиной повышенной концентрации пыли.

В процессе работы ленточного конвейера для поддержания комфортных условий труда скорость подачи должна быть ограничена до минимального значения для завершения производства. Таким образом, образование частиц пыли контролируется источником, что уменьшает распределение концентрации пыли на проезжей части.

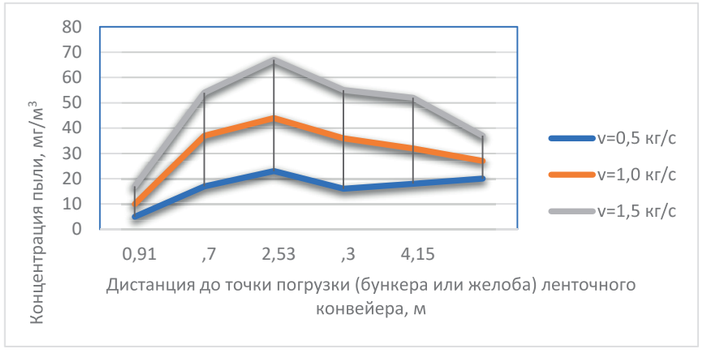


Рисунок 15 – Изменение концентрации пыли при различных скоростях подачи

(6) Распределение концентрации пыли на разных высотах подачи

Влияние высоты между точками подачи на распределение концентрации пыли на проезжей части ленточного конвейера исследуется путем изменения высоты загрузочного бункера. Результаты показаны на рисунке 16. Для проведения экспериментов были выбраны четыре высоты подачи (10 см, 20 см, 25 см и 34 см).

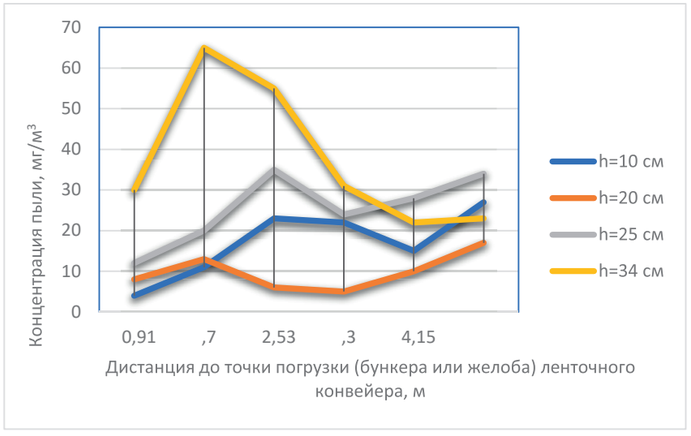


Рисунок 16 – Изменение концентрации пыли при различной высоте подачи

Большая высота подачи приводит к большей концентрации пыли при высоте подачи от 12 см до 34 см. Большая высота подачи приводит к увеличению времени осыпания частиц цемента с мешка. Следовательно, образуется больше пыли за счет эффекта сдвига между мешками и воздухом. Это приводит к образованию большого количества пыли в области источника пыли и увеличивает концентрацию пыли по мере того, как пыль расширяется с потоком воздуха.

В реальных условиях эксплуатации, чтобы контролировать количество пыли, образующейся в точках перекачки, и уменьшить распределение концентрации пыли в пространстве проезжей части, высоту сбрасывания необходимо уменьшить до разумного уровня, если позволяет пространство проезжей части. Кроме того, меньший перепад высот сбрасывания обеспечивает благоприятные условия для ленточного конвейера в процессе транспортировки пыльных грузов в мешкотаре, поскольку уменьшает повреждение мешкотары и уменьшения содержащегося в мешках пыльного груза (цемента, муки) на ленточном конвейере.

Выводы

В соответствии с теорией подобия была создана модель подобия дорожного полотна ленточного конвейера и установлены различные точки измерения на основе пространственного распределения модели в этом исследовании. Кроме того, распределение концентрации пыли в модели дорожного полотна с различными параметрами было исследовано методом фильтрующей мембраны. Из этого процесса были сделаны следующие выводы:

1 В модели дорожного полотна скорость ветра резко падает вдоль направления возвращающегося воздуха от одиночного напора и имеет тенденцию быть стабильной в положении на расстоянии 3,5 м от одиночного напора. Существует хорошее соответствие между распределением поля потока и полевыми данными, что помогает проводить аналогичные эксперименты.

2 Концентрация пыли в модели дорожного полотна постепенно увеличивается до максимального значения, а затем медленно снижается. В горизонтальном направлении концентрация пыли достигает наибольшего значения в центральной части ленты и наименьшего значения с левой стороны ленты. В вертикальном направлении концентрация пыли достигает максимального значения в плоскости H = 1,0 м, и это значение постепенно уменьшается от центра вверх и вниз.

3 Существует шесть основных факторов, влияющих на распределение концентрации пыли на проезжей части ленточного конвейера, включая направление воздушного потока, среднюю скорость ветра, рабочую скорость ленты, влажность воздуха, скорость подачи и высоту подачи.

4 Более низкая концентрация пыли может наблюдаться при более высокой средней скорости ветра на проезжей части и более низкой скорости движения ленты вдоль направления ветра.

Чем выше влажность воздуха, тем ниже может быть получена концентрация пыли. Однако после того, как влажность воздуха достигнет 3,09 %, концентрация пыли больше не будет снижаться. Кроме того, концентрация пыли увеличивается с увеличением скорости подачи и высоты подачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Особенности проведения погрузочно-разгрузочных и складских работ с различными грузами: учебное пособие / В. Е. Зиновьев; Рост. гос. ун-т пу-тей сообщения. – Ростов н/Д, 2005. – 60 с.

2 **Witt, P. J., Carey, K. G., Nguyen, T. V.** Prediction of dust loss from conveyors using computational fluid dynamics modeling // Applied Mathematical Modelling. – 2002. – Vol. 26. – № 2. – P. 297–309. – https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00062-2

3 **Морозова, В. С., Поляцко, В. Л.** Транспортные и погрузочно-разгрузочные средства: учебное пособие. –Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2010 – 96 с.

4 **Андруш, В. Г.** Охрана труда: учебное пособие / под ред. В. Г. Андруша. – Минск : РИВШ, 2021. – 620 с.

5 **Wines, T. H., Mokhatab, S**. 4 – Industrial filtration technologies // Contamination Control in the Natural Gas Industry. – 2022. – P. 83–118. – https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816986-5.00004-0

6 **Descamps, I., Harion, J., Baudion, B.** Taking-off model of particles with a wide size distribution // Chemical Engineering and Processing. – 2005. – Vol. 44. – № 2. – P. 159–166. – http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2004.04.007

7 **Wang, P., Feng, T., Liu, R.** Numerical simulation of dust distribution at a fully mechanized face under the isolation effect of an air curtain // Mining Science and Technology (China). – 2011. – Vol. 21, Issue 1. – P. 65 – 69. – https://doi.org/10.1016/j.mstc.2010.12.001

8 **Zhou, G., Kong, Y., Meng, Q., Jiang, B., Liu, Y., Li, G., Sun, B., Wang, J., Yan, D., Li, Z.** Research on dust dispersion law of fully mechanized mining faces under different inclinations and tracking closed dust control method // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Article № 16633. – https://doi.org/10.1038/s41598-022-20606-9

9 **Ansart, R., de Ryck, A., Dodds, J. A., Roudet, M., Fabre, D., Charru, F.** Dust emission by powder handling: Comparison between numerical analysis and experimental results // Powder Technology. – 2009, Vol. 190 (1-2). – P. 274–281. – https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.053.hal-01680757

10 **Li, Z., Jing, D., Ge, S., Meng, X., Yang, D., Ren, S.** Research on the mechanism of coal wall fragmentation and dust production characteristics in the perspective of differentiated discrete elements // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article № 9312. – https://doi.org/10.1038/s41598-024-60192-6

11. Posner, J.D., Buchanan, D., Dunn-Rankin, D. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room // Energy Build. – 2003. – Vol. 35. – P. 515–526. – https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00163-9

REFERENCES

1 Osobennosti provedeniya pogruzochno-razgruzochny`x i skladskix rabot s razlichny`mi gruzami: uchebnoe posobie [Features of loading, unloading, and warehousing operations with various cargo : a study guide] // Zinov`ev, V. E.; Rost. gos. un-t pu-tej soobshheniya. – Rostov n/D, 2005. – 60 p.

2 **Witt, P. J., Carey, K. G., Nguyen, T. V.** Prediction of dust loss from conveyors using computational fluid dynamics modeling // Applied Mathematical Modelling. – 2002. – Vol. 26. – № 2. – P. 297–309. – https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00062-2

3 **Morozova, V. S., Polyaczko, V. L.** Transportny`e i pogruzochno-razgruzochny`e sredstva: uchebnoe posobie. [Transport and handling equipment : a study guide.] –Chelyabinsk : Izdatel`skij centr YuUrGU, 2010. – 96 p.

4 **Andrush, V. G.** Oxrana truda: uchebnoe posobie [Labor protection: a training manual] / pod red. V. G. Andrusha. – Minsk : RIVSh, 2021. – 620 p.

5 **Wines, T. H., Mokhatab, S**. 4 – Industrial filtration technologies // Contamination Control in the Natural Gas Industry. – 2022. – P. 83–118. – https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816986-5.00004-0

6 **Descamps, I., Harion, J., Baudion, B.** Taking-off model of particles with a wide size distribution // Chemical Engineering and Processing. – 2005. – Vol. 44. – № 2. – P. 159–166. – http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2004.04.007

7 **Wang, P., Feng, T., Liu, R.** Numerical simulation of dust distribution at a fully mechanized face under the isolation effect of an air curtain // Mining Science and Technology (China). – 2011. – Vol. 21. – Issue 1. – P. 65 – 69. – https://doi.org/10.1016/j.mstc.2010.12.001

8 **Zhou, G., Kong, Y., Meng, Q., Jiang, B., Liu, Y., Li, G., Sun, B., Wang, J., Yan, D., Li, Z.** Research on dust dispersion law of fully mechanized mining faces under different inclinations and tracking closed dust control method // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Article № 16633. – https://doi.org/10.1038/s41598-022-20606-9

9 **Ansart, R., de Ryck, A., Dodds, J. A., Roudet, M., Fabre, D., Charru, F.** Dust emission by powder handling: Comparison between numerical analysis and experimental results // Powder Technology. – 2009. – Vol. 190 (1–2). – P. 274–281. – https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.053.hal-01680757

10 **Li, Z., Jing, D., Ge, S., Meng, X., Yang, D., Ren, S.** Research on the mechanism of coal wall fragmentation and dust production characteristics in the perspective of differentiated discrete elements // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article № 9312. – https://doi.org/10.1038/s41598-024-60192-6

11. Posner, J.D., Buchanan, D., Dunn-Rankin, D. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room // Energy Build. – 2003. – Vol. 35. – P. 515–526. – https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00163-9

Поступило в редакцию 19.04.25.
Поступило с исправлениями 04.08.25.
Принято в печать 26.08.25.

Н. Қ. Болатов[1], А. Б. Ахметжанова[2], *А. Б. Увалиева[3], А. К. Умбетова[4], Қ. Б. Манапов[5]
[1,2,4]А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ.;
[3]Алматы Менеджмент университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[5]Л. Н. Гумилев атындағы Евразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
19.04.25 ж. баспаға түсті.
04.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
26.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖАБЫҚ КӨЛІК ҚҰРАЛДАРЫНДА КОНВЕЙЕРМЕН ТИЕУ-ТҮСІРУ ЖҰМЫСТАРЫ КЕЗІНДЕ ШАҢ КОНЦЕНТРАЦИЯСЫНЫҢ ҮЛЕСТІРІЛУІ

Бұл мақалада жабық көліктердегі шаңды жүктерді тиеу және түсіру кезінде таспалы конвейер бөліктерінің айналасындағы шаң концентрациясының таралуын зерттеуге негізделген шаң концентрациясының таралуының негізгі тиімді факторлары анықталды. Бұл зерттеу шаңды жүктерді тиеу және түсіру процесін зерттеу үшін маңызды берілген ортадағы шаң концентрациясын бақылауға көмектесетін жаңа технологияларды қолдану. Үрлеу немесе жел беру жылдамдығының анемометрімен және шаң жинағышты пайдаланып, шаң концентрациясының таралу механизмін және шаң жүктемесімен жұмыс істеу кезінде тиісті әсер ету факторларын талдау үшін мембраналық сүзгі әдісімен шаң концентрациясын өлшеу жүргізілді. Ұқсастық теориясына сәйкес таспалы конвейердің жол төсемінің ұқсастық моделі жасалды және осы зерттеуде модельдің кеңістіктік таралуына негізделген әртүрлі өлшеу нүктелері орнатылды. Сонымен қатар, әртүрлі параметрлері бар жол төсемі үлгісіндегі шаң концентрациясының таралуы сүзгі мембранасының әдісімен зерттелді. Бұл процестен ауа ағыны, жабық жүк вагондарындағы шаң концентрациясы, конвейер қозғалысының әртүрлі жылдамдықтарындағы параметрлерді өлшей отырып, шаң мен ылғалдылық концентрациясының таралуына әсер ететін негізгі факторлар бойынша қорытындылар жасалды.

Кілтті сөздер: шаң басатын жүктер, таспалы конвейер, тиеу-түсіру операциялары, жабық көлік құралы, шаң концентрациясы.

N. K. Bulatov[1], A. B. Akhmetzhanova[2], *A. B. Uvaliyeva[3], A. K. Umbetova[4], K. B. Manapov[5]
[1,2,4]Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov,
Republic of Kazakhstan, Kokshetau;
[3]Almaty Management University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[5]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana
Received 19.04.25.
Received in revised form 04.08.25.
Accepted for publication 26.08.25.

DISTRIBUTION OF DUST CONCENTRATION DURING CONVEYOR LOADING AND UNLOADING OPERATIONS IN COVERED VEHICLES

In this article, based on a study of the distributability of dust concentration around conveyor belt parts during loading and unloading of dusty goods in covered vehicles, the main effective factors of dust concentration distribution were identified. This study is important for studying the process of loading and unloading dusty goods using new technologies that help control the concentration of dust in a given environment. Measurements of the blowing or wind flow rate with an anemometer and, using a dust collector, the dust concentration using a membrane filter method were carried out to analyze the mechanism of distribution of dust concentration and the corresponding impact factors when working with dusty cargo. In accordance with the similarity theory, a model of the similarity of a conveyor belt roadway was created and various measurement points were established based on the spatial distribution of the model in this study. In addition, the distribution of dust concentration in the roadway model with various parameters was investigated by the filter membrane method. Conclusions were drawn from this process on air flow, dust concentration in covered freight wagons, and the main factors influencing the distribution of dust concentration and humidity with measurement of parameters at different conveyor speeds.

Keywords: dusty cargo, conveyor belt, loading and unloading operations, covered vehicle, dust concentration.

SRSTI 73.47.12

https://doi.org/10.48081/XWYP9636

A. K. Kazhmuratova[1], *A. Y. Kalkabayeva[2], G. S. Mukhanova[3], K. S. Chakeeva[4], Zh. M. Tymbayeva[5]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty

[2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2119-4831

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4985-4018

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1473-0744

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7705-9874

*e-mail: D@stud.satbayev.university

DIGITAL MATURITY AS A COMPONENT OF DIGITALIZATION DEVELOPMENT IN THE TRANSPORT AND LOGISTICS SECTOR

In the context of the rapid development of digital technologies and the global digitalization of all spheres of life, there has been a significant transformation in the requirements for human capital. The digital maturity of human capital has become one of the key factors in ensuring the competitiveness of organizations, regions, and entire states. Modern scientific research is increasingly focused on identifying methodological foundations, models, and tools that make it possible to assess, shape, and develop the digital competencies and digital culture of employees, managers, and communities as a whole.

The purpose of this study is to analyze modern scientific approaches to the development of models for the formation, advancement, and assessment of the digital maturity of human capital, as well as to identify trends and factors influencing the digital transformation of human resources. To assess the digital maturity of companies in the transport and logistics sector, we conducted a study based on expert evaluations from division managers of companies in this industry.

Keywords: digital maturity, digitalization, transport and logistics sector, digital technologies, human capital.

Introduction

Digital maturity is the ability of an organization to successfully adapt to digital changes, effectively use modern technologies, implement innovative solutions, and integrate digital tools into all key business processes. The assessment of digital maturity allows companies not only to determine their current position but also to identify areas for development, design a strategy for digital transformation, and build a roadmap for transitioning to the next level of maturity.

In both academic research and business practice, two main approaches to the development of digital maturity models have emerged:

Scientific models – developed on the basis of theoretical research and empirical data. They are used for in-depth analysis of the state of digitalization within a company,

comparative assessments, and evaluation across multiple parameters (Becker et al., Schumacher et al.).

Applied (consulting) models – designed for practical application in business. Most often, these are developed by consulting agencies (such as Deloitte, Capgemini, BCG, etc.) and serve as tools for planning and managing digital transformation processes.

The models themselves may also take two forms:

Linear (staged) – implying progression from one level of maturity to the next only after the full completion of the current stage.

Continuous – allowing maturity to be assessed across multiple dimensions independently of one another, without a strict linear sequence.

According to industry research, between 2020 and 2025 the share of companies implementing digital technologies (AI, Big Data, IoT) increased from 30 % to 85 %. This growth is driven by the need to enhance operational efficiency, automate processes, and strengthen competitiveness in the face of global challenges [1].

As a result of studies on medium-sized businesses, researchers concluded that the components of digital indicators (or sub-indicators) have varying but significant effects on the digital performance of companies and, consequently, on their digital transformation and overall digital maturity.

Materials and methods

The methodology of digital maturity is a structured approach to assessing and improving the digital capabilities and processes within an organization. It typically includes several key components and stages that help organizations determine their current state, develop strategies to enhance digital competencies, and adapt to a rapidly changing business environment.

Each company must select a model depending on its industry characteristics, scale, transformation objectives, and the maturity of its organizational culture. Modern digital maturity models provide both an initial assessment and the possibility of in-depth analysis, making them a universal tool in the hands of top managers, consultants, and IT directors.

The approaches studied show that digital maturity is a multidimensional concept that encompasses strategic, technological, cultural, and organizational aspects. The choice of assessment methodology depends on:

– the scale of the business;
– industry affiliation;
– the goals of digital transformation;
– the stage at which the organization currently stands.

For instance, large companies may apply approaches developed by Gartner, Capgemini, and others. Manufacturing enterprises can use the model by Brunner & Jodlbauer, while small and medium-sized businesses may benefit from the framework proposed by Gamache [2;3]. The methodology of Colli et al., focused on interaction and learning, can be applied in organizational development projects or as part of consulting [4].

All models converge on one idea: digital maturity is not a one-time adoption of technologies but a continuous evolutionary process based on deliberate strategic decisions, people's engagement, and flexible adaptation to the future.

In the context of the rapid development of digital technologies and the global digitalization of all spheres of life, significant changes are occurring in the requirements for human capital. The digital maturity of human capital is becoming one of the key factors in ensuring the competitiveness of organizations, regions, and entire nations. Modern scientific research increasingly focuses on identifying methodological foundations, models, and tools that make it possible to assess, develop, and enhance the digital competencies and culture of employees, managers, and communities as a whole.

The concept of digital maturity encompasses the degree of readiness of an individual or organization to effectively use digital technologies in professional activity, learning, and social communication. Modern scholars view digital maturity as a combination of digital skills, technological adaptability, as well as strategic and critical thinking in a digital environment [5].

Human capital, according to Gary Becker's classical interpretation, represents the sum of knowledge, skills, motivations, and other characteristics that contribute to productive activity. In the context of digitalization, this capital is being transformed to include digital competencies, digital literacy, flexibility, and the capacity for lifelong learning [6].

Digital transformation entails not only the adoption of technologies but also changes in employee behavior, motivation, and organizational culture. For this reason, in recent years increasing attention has been paid to models in which the human factor is a key object of evaluation.

To assess the use of digital technologies and determine the level of digital development of companies, we conducted a study based on expert evaluations from division managers in transport and logistics companies. Expert surveys are primarily used to process input data in order to obtain objective results in the field of digitalization within the transport and logistics industry. The advantage of this approach is that it allows for the reliable confirmation of the proposed hypothesis, the evaluation of the current level of digitalization within a company, the identification of strengths and weaknesses, the understanding of strategic objectives of managers, and the determination of key pain points. This method also makes it possible to cover a large number of respondents and obtain sufficiently detailed information about the object of study.

Given the above, to evaluate the activities of transport and logistics companies in the process of implementing digital technologies, we used qualitative research methods such as surveys and expert evaluations. The object of this study is the digital maturity of transport and logistics companies as a component of the level of digitalization in the transport and logistics sector.Literature Review

The concept of digital maturity has been widely studied in both foreign and domestic academic literature. Researchers emphasize that digital maturity is a multidimensional concept that encompasses not only technological readiness but also organizational, cultural, and managerial aspects.

According to Westerman et al. (2014), digital maturity reflects the ability of an organization to successfully integrate digital technologies into its strategy and operations, thereby achieving sustainable competitive advantages. Kane et al. (2017) highlight that digital maturity is not limited to the introduction of modern technologies but is closely linked to changes in corporate culture, leadership styles, and the development of digital competencies among employees.

In the works of domestic researchers, special attention is paid to the peculiarities of digitalization in the context of the transport and logistics sector. For example, studies by Kazakh and Russian scholars show that the introduction of digital technologies in logistics contributes to improving the transparency of supply chains, optimizing routes, reducing transaction costs, and increasing the overall efficiency of transport systems.

At the same time, scholars note that the level of digital maturity of companies in the transport and logistics sector is heterogeneous and depends on a number of factors, including the availability of financial resources, the level of staff qualifications, state support, and the development of digital infrastructure.

Thus, the analysis of existing literature shows that assessing digital maturity is an important tool for managing the processes of digital transformation in transport and logistics. It makes it possible to evaluate the readiness of enterprises for digitalization, determine development priorities, and monitor the effectiveness of implemented measures.

Results and discussion

Modern scientific research pays considerable attention to the concepts of the digital economy and the mechanisms for assessing the digital maturity of individual organizations, viewing them as stages in the transition to a new digital era. An analysis of the approaches developed by leading consulting companies has made it possible to identify the most widespread models for assessing the digital maturity of enterprises and to compare them in order to reveal common aspects and diagnostic mechanisms (see Table 1).

Table 1 – Overview of Key Digital Maturity Models

Model	Main components	Maturity levels	Distinctive features
Deloitte	Customer, strategy, technology, operations, culture	5 levels	Detailed structure with 28 subcategories; suitable for in-depth diagnostics
BCG (DAI)	Strategy, technology, data, culture, KPIs	1–5 points	Strong focus on accelerating digitalization and managing change
KPMG (Digital Aptitude)	Digital strategy, technology, processes, culture, customer experience, risks	No clear levels	Suitable for assessing digital resilience
Capgemini	Customers, processes, business model	3 levels	Simple, universal model; suitable for initial assessment
IMD & Cisco (Digitization Piano)	Strategy, people, technology, processes, data	4 levels	Visual "piano"-style model; easy to understand
Acatech (Industry 4.0 Index)	Strategy, processes, organization, culture, data	5 levels	Designed for manufacturing firms; useful for automation analysis

ODMM (Open ROADS)	Strategy, customer, culture, skills, innovation, AI/big data	–	Applied by accredited experts; suitable across industries
ECO model (Bretza et al.)	Work environment, competencies, performance	4 levels	Focus on human capital and soft/hard skills
Gamache (for SMEs)	Culture, leadership, technology, data, metrics, customer experience	–	Designed for small and medium-sized manufacturing enterprises
Note: Compiled based on sources [7; 8; 9; 10; 11; 12].			

In the academic literature, several approaches to modeling digital maturity can be distinguished. Among the most well-known are:

The Capgemini Digital Maturity Model, which includes five levels of maturity and evaluates such parameters as strategic vision, culture, IT infrastructure, and employee competencies.

– The Digital Competence Framework (DigComp) of the European Commission, which systematizes digital skills into five main areas: information literacy, communication, content creation, safety, and problem-solving.

– The Digital Maturity Model of Personnel by V.G. Suslov (2020), which takes into account the level of digital competencies, motivational readiness, and involvement in digital transformation.

Each of these models has its strengths and weaknesses, and the choice of approach largely depends on the goals of assessment and the specifics of a given organization or region.

The formation of digital maturity requires a comprehensive approach that encompasses educational initiatives, human resource policies, corporate culture development, as well as investments in technology and digital infrastructure. Leading directions in this field include:

– lifelong learning and reskilling as a strategic priority for sustainable development;

– corporate training and digital simulators that shape applied digital skills and help staff adapt to new technologies;

– government and regional programs for the development of digital competencies.

It is important to note that sustainable development of digital maturity is impossible without the formation of an appropriate digital culture and change management.

The key challenges faced by organizations and society in the process of digital transformation of human capital include:

– rapid obsolescence of knowledge and skills;

– unequal access to digital resources;

– resistance to change among employees;

– the need for ethical and legal regulation in the digital environment.

Assessing the digital maturity of human capital is an important tool for diagnosing the readiness of personnel for digital transformation.

Digital maturity is a key indicator of an organization's ability to effectively adapt to contemporary digital realities and implement innovative solutions in key business processes. The assessment of digital maturity allows companies not only to understand

their current state but also to design a strategy for further development, defining directions for digital transformation and creating detailed plans for advancing maturity.

There are two main approaches to assessing digital maturity: scientific models, based on theory and empirical data, and applied models, developed by consulting companies to solve practical business problems. These models may be either linear or continuous, which allows companies to adapt the assessment process to their unique conditions.

According to forecasts, the share of companies that will have implemented digital technologies is expected to increase significantly–from 30 % to 85 %-in the period from 2020 to 2025. This underscores the importance of these changes for enhancing operational efficiency and competitiveness. It also reflects the growing awareness of the significance of digital tools and technologies as essential factors for the successful transformation of businesses in the face of global challenges.

Thus, the evaluation and enhancement of digital maturity will become critical strategic objectives for organizations seeking to remain competitive in a rapidly changing business environment. In this regard, it is especially relevant to consider digital maturity models across various countries, as this enables a deeper analysis of how different states approach the formation of digital competencies, the management of human capital, and the development of national digital strategies.

At present, the transition to a digital economy has become one of the main global economic trends. In nearly all advanced countries, strategic documents have been developed and approved for transitioning to a digital economy—characterized by a new technological paradigm based on Industry 4.0 technologies. The level of digitalization at the macro level is achieved through appropriate government policies [13]. To reach a high level of digitalization in a country, a balanced policy of digital economic transformation is required—one that takes into account the characteristics and digital maturity of organizations, since organizations are the key economic actors that determine the digitalization potential of entire industries.

The success of digital transformation and the sustainability of growth trends in digitalization can be determined not only by analyzing indicators but also by comparing theory with the practice of implementing digital maturity models and digital readiness – considering positive experiences and the contributions of leading countries in the field of digitalization. Comparative analysis makes it possible to determine a country's position within the coordinate system of digitalization leaders.

Of course, leading countries differ in their potential and initial conditions for digital transformation, as well as in their scientific approaches to the consideration of particular dimensions, methods, and levels of digital maturity. The selection of these countries as a comparative base is due to the nature of their digital modernization efforts, the readiness of industries and companies for digitalization, and the establishment of high-quality digital competencies within their workforce potential.

As a comparative base, the following leading countries were chosen [5; 14; 15; 16-20]: the USA, Switzerland, Austria, Brazil, Denmark, Germany, Russia, Nigeria, Canada, Serbia, Hungary, Spain, South Korea, Italy, and China. The implementation

of digital maturity models in these countries is examined through the lens of key dimensions such as:

– Strategy and leadership
– Customers
– Products and services
– Operations
– Business processes
– Digital culture and etiquette
– People
– Digital literacy and competence
– Management
– Technology
– Digital security (threats and risks)
– Stages of digital maturity

The United States and Germany, represented by analytical centers, are among the key countries in developing and implementing digital maturity models. Unlike some other countries engaged in digital transformation, the qualitative growth of digitalization in the USA was achieved through applied developments of digital models, i.e., their focus on practical application in business, improving the digital competencies of companies and employees, and readiness to adapt to a rapidly changing business environment. For this reason, comparing the achievements of this country with those of others is of particular interest. A detailed analysis and determination of the place of various countries in the coordinate system of digitalization leaders makes it possible to identify and forecast their stages of digital development.

Analyzing the successful experience of different countries, we identified the dimensions most frequently considered by researchers in their studies of digital maturity assessment. Figure 1 illustrates the number of dimensions used in digital maturity models across publications by authors from different countries. Of the 24 publications we reviewed, the «strategy» indicator was considered most often–21 times. The least frequently considered indicators were leadership (6 times), customers (6 times), and digital security (threats and risks) (4 times). The remaining six dimensions–products and services; operations and business processes; digital culture and etiquette; digital literacy and competence; management; and technology–were included on average between 13 and 17 times across the reviewed publications.

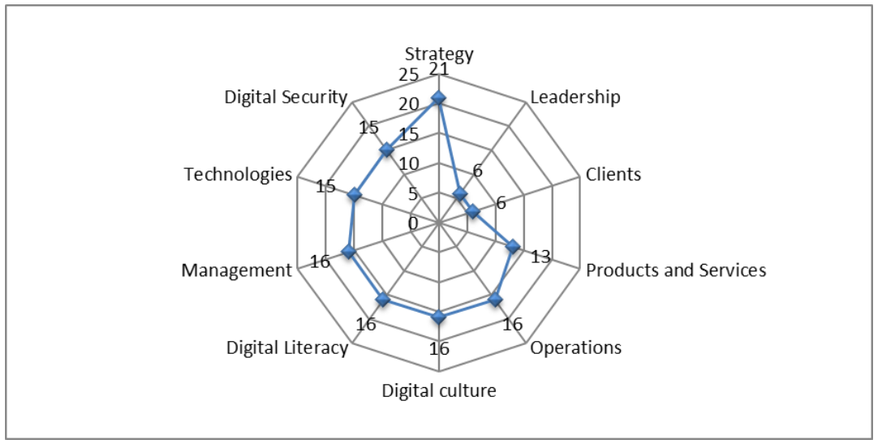


Figure 1 – Number of Dimensions Used by Authors in Digital Maturity Models

To assess the level of digital maturity in transport and logistics companies, the method of expert surveys was applied, targeting division managers of transport and logistics enterprises. The survey was conducted among representatives of medium-sized businesses (with 100 to 500 employees). Medium-sized businesses occupy an intermediate position between small and large enterprises. More than 83 department heads from transport and logistics companies participated in the study. Such companies typically have a more stable financial base and the ability to attract investments, which enables them to develop, including in the digital sphere.

The checklist for the application of digital technologies in transport and logistics enterprises consisted of several blocks:

I. General information about the enterprise
II. Level of digitalization
III. Impact of digitalization on business processes
IV. Prospects and plans for digitalization
V. Digital competencies of human capital

It should be noted that the development of selection criteria and the structure of the expert sample represents a key stage in organizing the expert survey, as it directly affects the quality and reliability of the data obtained. In the course of the research, experts with deep knowledge and practical experience in the field of digitalization were selected. The criteria for selecting experts in the transport and logistics industry are presented below.

Basic (mandatory) criteria:

Field of professional activity: Employment in a company operating within the transport and logistics sector:

– Transport operators (road, rail, air, maritime).
– Logistics providers (3PL, 4PL).
– Courier and postal services.

– Operators of ports, terminals, and warehouses.

Direct involvement with digital technologies: The expert is engaged in processes related to digital transformation, as reflected in their professional duties:

– Strategic level: Executives (CIO, CTO, CDO, Vice Presidents for Development) responsible for IT strategy and digitalization.

– Tactical level: Heads and leading specialists of departments (IT, automation, data analytics, digital development, project offices).

– Operational level: IT implementation managers, business analysts, and data specialists.

Professional experience:

– At least 5–7 years of experience in the transport and logistics industry.

– At least 3 years in a position directly related to the management, implementation, or application of digital technologies.

Specialized (preferred) criteria:

4. Expertise in specific technologies: Participation in projects involving the implementation or utilization of key digital technologies relevant to the transport and logistics sector, such as:

– Data management: Big Data, AI/ML, Data Science.

– Automation: RPA, IoT (Internet of Things), AI.

– Tracking and monitoring technologies: GPS/GLONASS monitoring, RFID, sensors.

– Platform solutions: TMS, WMS, ERP systems, digital freight platforms.

– Blockchain (for supply chain traceability).

– Advanced technologies: Autonomous transport, drones, computer vision.

The study also applied the following key parameters for structuring the sample:

Table 2 – Parameters for Structuring the Sample

Parameter	Group	Target Share in the Sample
Type of company	Large 3PL/4PL logistics providers	30%
	Transport operators (road, rail, air, maritime)	40%
	Terminal and warehouse operators	15%
	IT vendors / Startups	15%
Management level	Strategic level (CIO, CDO, Vice President)	25%
	Tactical level (Head of Department, Lead Specialist)	60%
	Operational level (Project Manager, Business Analyst)	15%
Functional expertise	Data management/AI/ML	~30%
	Process automation (RPA, IoT)	~30%
	Digital platforms (TMS, WMS, ERP)	~40%

Note: Compiled based on sources [21].

The combination of well-defined selection criteria and a carefully designed sample structure made it possible to obtain in-depth, well-founded, and comprehensive results regarding the implementation and use of digital technologies in the transport and logistics industry.

Taking the above into account, the respondents were asked the following question: «Which digital technologies have been implemented in your company?».

The responses of division managers in transport and logistics companies were distributed as follows: 33 % of respondents reported the implementation of ERP systems, 30 % CRM systems, 10% the Internet of Things (IoT), 10% robotic process automation (RPA), 3 % artificial intelligence and machine learning, 2% blockchain, and 2% digital twins (see Figure 2).

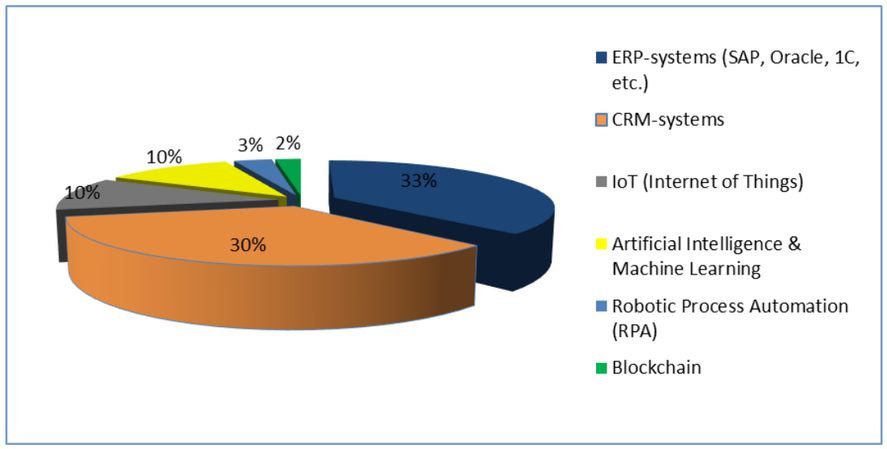


Figure 2 – Use of Digital Technologies in Transport and Logistics Companies

The expert survey revealed that the management of transport and logistics companies believes the level of digital readiness and digital maturity is interconnected with the quality of infrastructure and human resources, as well as with the competencies of employees. Therefore, a logical question was posed to division managers: What is the level of digital maturity in your enterprise? The majority of respondents (80 %) considered the digital maturity level of their enterprise to be medium. About 15 % reported that they actively use digital technologies, indicating a high level of digital maturity. Only 5 % of respondents noted that the implementation of digital technologies in their company is only being planned, meaning they are at the initial stage (see Figure 3).

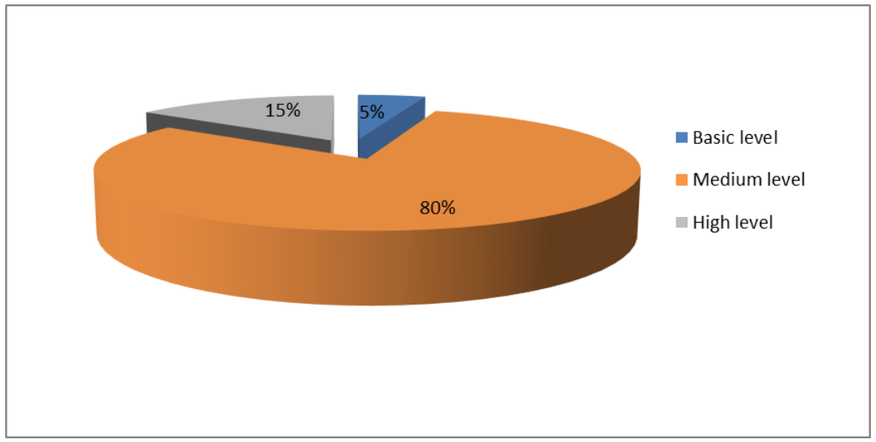


Figure 3 – Level of Digital Maturity of Transport and Logistics Enterprises

The survey revealed that 30 % of respondents consider the automation of production processes to be the priority area of digitalization in transport and logistics companies. About 27 % identified data analysis and forecasting, while 25 % pointed to the optimization of supply chains. Additionally, 10 % of respondents attached significant importance to the development of digital marketing tools, and 8 % emphasized the improvement of customer interaction.

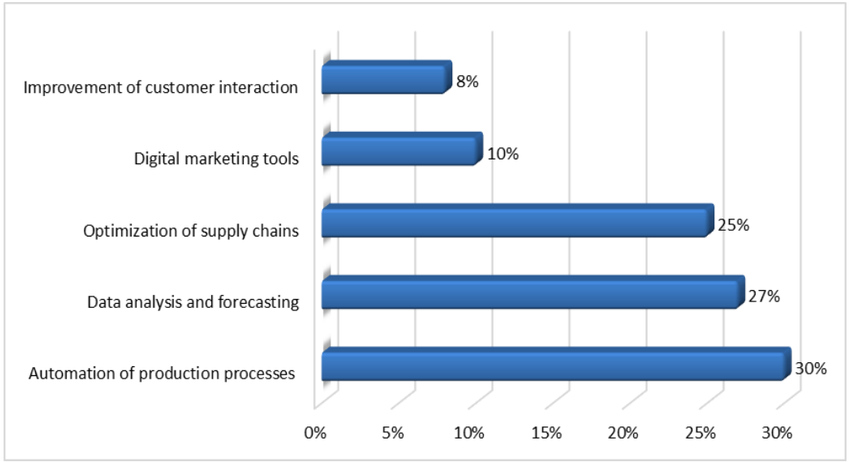


Figure 4 – Priority Areas for Digitalization in Transport and Logistics Enterprises

In modern conditions, the improvement of digital literacy has become an integral part of the strategic planning of enterprises, and the assessment of employees' digital competencies is gradually becoming a standard, regular procedure. During the survey,

division managers were asked which digital competencies employees of their companies should possess. The responses were distributed as follows: 28 % of respondents emphasized the importance of computer literacy; 25 % considered the ability to read digital blueprints essential for work; 24 % highlighted data collection and analysis; 6 % and 5 % respectively believed that skills in using digital twins and interacting with artificial intelligence were sufficient; 4 % of experts stressed the importance of cybersecurity skills, and another 4 % underscored the knowledge of algorithms and their application in work (see Figure 5).

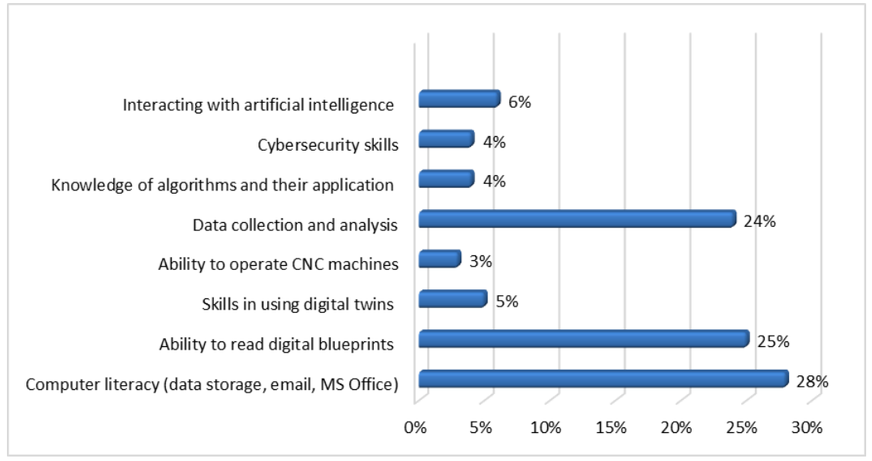


Figure 5 – Digital Competencies of Employees in Transport and Logistics Companies

In the current situation, the development of digitalization and the introduction of innovations are essential for improving the transport and logistics sector. Therefore, in our view, it was important to study the constraints that hinder digital transformation in this field. The responses of the survey participants were distributed as follows: 50 % cited high implementation costs, 40 % pointed to a shortage of qualified specialists, 5 % noted the absence of a clear digitalization strategy, and another 5 % mentioned employee resistance to change.

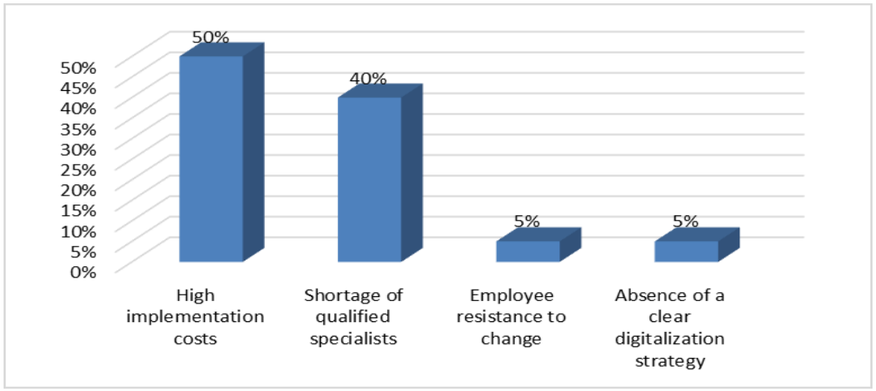


Figure 6 – Key Barriers to the Digitalization of Transport and Logistics Companies

Thus, the survey processed the assessments and recommendations of stakeholders. The results obtained made it possible to identify areas that require further development of companies' digital maturity. The conducted research provided valuable information that will be used in future studies on this issue through descriptive, qualitative, and quantitative methods. The study also revealed perspectives aimed at identifying a number of factors that hinder the development of digitalization.

Looking ahead, the development of digitalization and the use of electronic information technologies in the provision of transport and logistics services will contribute to the effective growth of enterprises. In the context of global digital transformation, issues of digital maturity of human capital are becoming key to the successful development of enterprises. Digital maturity models focused on the human factor make it possible to more accurately assess the readiness of personnel to implement digital technologies and adapt to changing business conditions. The application of international experience and its adaptation to the specific context of Kazakhstan contributes to the creation of effective and comprehensive approaches to the development of human capital in the era of digitalization.

Financing information

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the Grant № BR27198643 – «Development of digital competences of human capital in industry and logistics through cluster collaboration of science, education and industry».

Conclusions

The digital maturity of human capital is a key factor for the successful digital transformation of enterprises in Kazakhstan. The integration of international experience and its adaptation to national conditions will contribute not only to the development of individual organizations but also to strengthening the country's economy in the context of the global digital revolution.

In the course of the study, we analyzed existing developments in the field of digitalization across countries and identified the main research directions, particularly in relation to digital maturity models. Today, all countries recognize that Industry 4.0 is a new production paradigm and the driving force of the Fourth Industrial Revolution. It must also be acknowledged that there are difficulties in adapting to the digital transition, and that real challenges exist for enterprises–especially small and medium-sized businesses–which require new approaches. For proper implementation of this pathway, tools such as maturity models can be highly useful, as they help assess the initial state of a company and design a roadmap for development. Recently, maturity models oriented toward Industry 4.0 have been developed and implemented, some of which are specifically tailored to certain sectors of the economy, which also holds significant value for the advancement of both science and practice.

According to the research findings, more than 28 % of respondents demonstrated a lack of computer literacy, while 25 % and 24 % reported insufficient skills in reading digital schematics and data collection and analysis, respectively. At present, the digital competencies required by companies in the transport and logistics sector are at the stage of being aligned with the digital maturity level of these organizations.

Given the above, it can be concluded that the digital maturity of human capital is one of the key factors of resilience and competitiveness of enterprises in the context of rapid digital transformation. Human capital equipped with the necessary digital competencies, a high degree of adaptability, and motivation for continuous learning becomes the foundation for the effective implementation of innovative solutions. In this context, the development of adaptive digital maturity models that take into account both international standards and the specific national and sectoral context acquires particular importance.

REFERENCES

1 Statista. Logistics Digital Transformation Index. – McKinsey Logistics Survey – 2023. – [Electronic resource]. – https://www.statista.com

2 **Brunner, M., & Jodlbauer, H.** Mind the gap: Requirement engineering for learning factories with maturity model support. Procedia Manufacturing. – 2020. – № 45. – 510–515 P. – https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.067.

3 **Westerman, G., Calméjane, C., Bonnet, D., Ferraris, P., & McAfee, A.** Digital Transformation: A Road-Map for Billion-Dollar Organizations. MIT Center for Digital Business and Capgemini Consulting. [3] – 2021. [Electronic resource]. – https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/07/Digital_Transformation__A_Road-Map_for_Billion-Dollar_Organizations.pdf

4 **Colli, M., Madsen, O., Berger, U., Møller, C., Wæhrens, B. V., & Bockholt, M.** Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0. IFAC-PapersOnLine, 2018 – Vol.51(11). – P. 1347–1352. – https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.343

5 **Valtonen, T., Hoang, N., Sointu, E., Näykki, P., Virtanen, A., Pöysä-Tarhonen, J., Häkkinen, P., Järvelä, S., Mäkitalo, K., & Kukkonen, J.** How pre-service teachers perceive their 21st-century skills and dispositions: A longitudinal perspective. Computers in Human Behavior, 2021. – Vol.106643. – 116 p. – https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106643

6 **Becker, G. S.** Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education. University of Chicago Press, 1993. – 118–129 p.

7 **Deloitte.** Digital Maturity Model: Achieving digital maturity to drive growth, 2023.

8 [Electronic resource]. – https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Technology-Media-Telecommunications/deloitte-digital-maturity-model.pdf

9 Global Center for Digital Business Transformation. Digital Business Transformation: A Conceptual Framework, 2022. – [Electronic resource]. – https://ru.scribd.com/document/372049639/DigitalBusiness-Transformation-Framework-pdf

10 Acatech. Industry 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies, 2022. – [Electronic resource]. – https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_rus_Maturity_Index-WEB.pdf.

11 Strategy CDTO. Digital Transformation Strategy: Write to Execute. [10] – 2023. – https://strategy.cdto.ranepa.ru/4-2-cifrovaya-zrelost

12 KMDA Digital Consulting, 2022. – https://komanda-a.pro/audit

13 **Valdez-de-Leon, O.** A digital maturity model for telecommunications service providers. Technology Innovation Management Review, 2016. – 19–32 p.

14 **Abramov, V. I., Borzov, A. V., & Semenkov, K. Yu.** Theoretical and methodological analysis of digital maturity models for Russian companies. Economics, Management, Entrepreneurship. Digital Business Transformation, 2021. Vol 04(50), P. 45–48 p.

15 Gartner. Digital Business Benchmark & Maturity Assessment, 2023. – https://www.gartner.com/imagesrv/symposium/orlando/docs/2014GartnerSymposiumconsultingDigitalBusness.pdf

16 **Gill, M., & VanBoskirk, S.** The Digital Maturity Model 4.0. Benchmarks: Digital Business Transformation Playbook. Forrester Research, 2016. – P. 256–264 p.

17 **Westerman, G., Tannou, M., et al.** The Digital Advantage: How Digital Leaders Outperform Their Peers in Every Industry. Capgemini Consulting & MIT Sloan Management, 2012 – P. 86–88. – [Electronic resource]. – https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/07/

18 Capgemini. Helping Siemens supply chain management implement a learning journey for leaders, 2025. – [Electronic resource]. – https://www.capgemini.com/gb-en/news/client-stories/helping-siemens-supply-chain-management-implement-a-learning-journey-for-leaders/

19 **Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., & Krüger, A.** Industry 4.0 Maturity Index. National Academy of Science and Engineering, 2020 – P. 73–88 p.

20 **Blatz, F., Bulander, R., & Dietel, M.** Maturity model of digitization for SMEs. 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 2018. – https://doi.org/10.1109/ice.2018.8436251

21 **Bretza, L., Klinkner, F., Kandler, M., Shun, Y., & Lanza, G.** The ECO Maturity Model – A human-centered Industry 4.0 maturity model. Procedia CIRP, 2024. – https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.160

22 European Commission. Digital Competence Framework (DigComp): Development of digital skills and competences [Electronic resource]. – Available at: https://digitalization.org.tilda.ws/methodology (Accessed October 20, 2025).

Received 24.09.25.
Received in revised form 04.10.25.
Accepted for publication 04.11.25.

А. К. Қажмуратова[1], *А. Е. Қалқабаева[2], Г. С. Мұханова[3], К. С. Чакеева[4], Ж. М. Тымбаева[5]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2,3,4,5]Сәтпаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
24.09.25 ж. баспаға түсті.
04.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
04.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КӨЛІКТІК-ЛОГИСТИКАЛЫҚ САЛАДАҒЫ ЦИФРЛАНДЫРУ ДАМУЫНЫҢ ҚҰРАМДАС БӨЛІГІ РЕТІНДЕ ЦИФРЛЫҚ ЖЕТІЛГЕНДІК

Жылдам дамып келе жатқан цифрлық технологиялар мен өмірдің барлық салаларының жаһандық цифрландырылуы жағдайында адами капиталға қойылатын талаптардың елеулі трансформациясы байқалуда. Адами капиталдың цифрлық жетілгендігі ұйымдардың, өңірлердің және тұтас мемлекеттердің бәсекеге қабілеттілігін қамтамасыз етудің негізгі факторларының біріне айналуда. Қазіргі ғылыми зерттеулер көбінесе қызметкерлердің, басшылардың және тұтас қауымдастықтардың цифрлық құзыреттері мен цифрлық мәдениетін бағалауға, қалыптастыруға және дамытуға мүмкіндік беретін әдіснамалық негіздерді, үлгілерді және құралдарды айқындауға шоғырлануда.

Осы зерттеудің мақсаты – адами капиталдың цифрлық жетілгендігін қалыптастыру, дамыту және бағалау үлгілерін әзірлеуге арналған қазіргі ғылыми тәсілдерді талдау, сондай-ақ адами ресурстардың цифрлық трансформациясына ықпал ететін үрдістер мен факторларды анықтау. Көліктік-логистикалық сала компанияларының цифрлық жетілгендігін

бағалау үшін біз осы саладағы компаниялардың бөлім басшыларының сараптамалық бағаларына негізделген зерттеу жүргіздік.

Кілтті сөздер: цифрлық жетілгендік, цифрлық технологиялар, цифрлық трансформация, адами капитал.

А. К. Кажмуратова[1], *А. Е. Калкабаева[2], Г. С. Муханова[3], К. С. Чакеева[4], Ж. М. Тымбаева[5]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2,3,4,5]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 24.09.25.
Поступило с исправлениями 04.10.25.
Принято в печать 04.11.25.

ЦИФРОВАЯ ЗРЕЛОСТЬ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ В ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СФЕРЕ

В условиях стремительного развития цифровых технологий и глобальной цифровизации всех сфер жизнедеятельности наблюдается существенная трансформация требований к человеческому капиталу. Цифровая зрелость человеческого капитала становится одним из ключевых факторов обеспечения конкурентоспособности организаций, регионов и целых государств. Современные научные исследования все чаще сосредоточены на выявлении методологических основ, моделей и инструментов, позволяющих оценивать, формировать и развивать цифровые компетенции и цифровую культуру работников, руководителей и сообществ в целом.

Целью данного исследования является анализ современных научных подходов к разработке моделей формирования, развития и оценки цифровой зрелости человеческого капитала, а также выявление тенденций и факторов, влияющих на цифровую трансформацию человеческих ресурсов. Для оценки цифровой зрелости компаний транспортно-логистической сферы нами было проведено исследование, основанное на экспертных оценках руководителей подразделений компаний данной отрасли.

Ключевые слова: цифровая зрелость, цифровые технологии, цифровая трансформация, человеческий капитал.

МРНТИ 73.01.77
https://doi.org/10.48081/CRTP7219

Ж. К. Кегенбеков[1], А. К. Конгуева[2], А. Н. Алипова[3]
[1,2,3]Казахстанско-Немецкий университет, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8175-7440
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6338-1028
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5172-4687
*e-mail: kegenbekov@dku.kz

УПРАВЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫМИ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИНЕРАЛОВ: БИБЛИОМЕТРИЧЕСКИЙ И КОНТЕНТ-АНАЛИЗ

В статье анализируется развитие исследований в области управления глобальными цепями поставок полупроводников и стратегически значимых минералов с использованием библиометрического и контент-анализа. Особое внимание уделено вопросам устойчивости и резилентности производственно-логистических систем в условиях цифровой трансформации, геополитической нестабильности и усиливающейся международной конкуренции. Методологическую основу составил библиометрический анализ публикаций из ведущих научных баз данных за 1994–2025 гг., позволивший определить ключевые тенденции, исследовательские кластеры, динамику научной повестки и трансформацию исследовательских приоритетов. Контент-анализ выявил основные направления применения цифровых инструментов – интернета вещей, машинного обучения, технологий блокчейна, больших данных, облачных решений и предиктивной аналитики – в управлении цепями поставок, повышении эффективности и прогнозировании рисков. Полученные результаты свидетельствуют о формировании новой исследовательской парадигмы, в которой цифровизация и интеграция интеллектуальных систем выступают стратегическими инструментами повышения прозрачности, гибкости, устойчивости и адаптивности глобальных производственно-логистических структур. Дополнительно акцентируется внимание на роли международного сотрудничества, политико-экономических факторов, кибербезопасности, экологических стандартов и принципов устойчивого развития в формировании цифровых экосистем поставок и укреплении стратегической автономии государств и компаний.

Ключевыеслова: глобальные цепипоставок, полупроводники, стратегически значимые минералы, датацентричный подход, библиометрический анализ, большие данные, интернет вещей (IoT), машинное обучение.

Введение

В последние годы глобальные цепи поставок полупроводников и стратегически значимых минералов приобрели критически важное значение для мировой экономики и национальной безопасности. Их устойчивость напрямую влияет

на стабильность производственных процессов, развитие высокотехнологичных отраслей и функционирование цифровой инфраструктуры. Сложность современных производственно-логистических систем, высокая концентрация поставщиков и зависимость от ограниченного числа стран делают такие цепи поставок уязвимыми к геополитическим рискам, экономическим кризисам и технологическим сбоям [3].

В условиях цифровой трансформации актуализируется необходимость поиска новых подходов к обеспечению прозрачности, гибкости и резилентности глобальных цепочек. Одним из перспективных направлений выступает датацентричный подход, основанный на использовании больших данных, интернета вещей, алгоритмов машинного обучения и предиктивной аналитики [4;7]. Эти технологии позволяют осуществлять мониторинг и прогнозирование логистических процессов в реальном времени, выявлять потенциальные риски и оперативно адаптировать управленческие решения [5].

Современная научная литература демонстрирует растущий интерес к данной проблематике, однако она носит ярко выраженный междисциплинарный характер. Исследования охватывают как технические аспекты развития полупроводниковых технологий и вычислительных архитектур, так и прикладные вопросы управления цепями поставок, интеграции цифровых инструментов и оценки эффективности [6]. В этой связи особую ценность приобретает систематизация накопленных знаний и выявление ключевых направлений научного дискурса.

Целью настоящей статьи является комплексное исследование научных публикаций в области датацентричного управления цепями поставок полупроводников и стратегически значимых минералов. Для достижения поставленной цели применяются методы библиометрического анализа, позволяющие отразить структуру и динамику исследовательской повестки, а также контент-анализ, обеспечивающий выявление основных тенденций и управленческих последствий.

Научная новизна исследования заключается в выявлении интеграционных направлений между технологическими, управленческими и аналитическими компонентами, формирующих основу новой парадигмы устойчивого управления глобальными цепями поставок [8]. Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов для разработки стратегий повышения резилентности и эффективности логистических систем в условиях неопределённости и глобальных вызовов [1; 2].

Материалы и методы

Развитие глобальных цепей поставок полупроводников и стратегически значимых минералов в последние годы приобрело критически важное значение для устойчивости мировой экономики и национальной безопасности. Сложность производственно-логистических систем, высокая зависимость от ограниченного числа поставщиков и геополитические риски усилили внимание исследователей к вопросам резилентности и адаптивности этих цепей. В условиях цифровой трансформации особое место занимает датацентричный подход, предполагающий

использование больших данных, технологий интернета вещей, машинного обучения и предиктивной аналитики для обеспечения прозрачности, гибкости и устойчивости поставок.

Для выявления основных направлений и динамики научных исследований в данной области целесообразным является применение методов библиометрического анализа. Данный инструмент позволяет не только систематизировать существующие публикации, но и выявить ключевые тенденции, доминирующие кластеры научного знания и эволюцию исследовательской повестки. Построение библиографических и временных карт на основе данных ведущих научных баз даёт возможность отразить междисциплинарный характер темы, объединяющей технологические, управленческие и аналитические аспекты.

Подход систематического обзора используется для всестороннего анализа научной литературы с использованием количественных и качественных методов. Поиск литературы проводился с использованием базы данных – Google Scholar, которая охватывает период с 1994 по 2025 годы. Исходная строка поиска включала следующие ключевые слова: «data-centric», «supply chain» и «semiconductors». Поиск материалов проводился по следующим предметным областям: логистика, транспорт.

Следующий шаг направлен на предоставление обзора документов, посвященных вопросу роли основных областей в качестве логистического управления. Для достижения этой цели был использован библиометрический сетевой анализ. Библиометрическая сеть состоит из узлов и ребер. Узлами могут быть, например, публикации, журналы, исследователи или ключевые слова.

Наконец, был проведен контент-анализ, чтобы обрисовать подробную картину проблем, затронутых в литературе, и подчеркнуть управленческие последствия выбранных областей для повышения эффективности цепей поставок.

Выделение связанных ключевых слов в базах данных позволяет провести более детальное исследование темы, раскрывая их контекст и помогая выявить значимые аспекты. На рисунке 1 ниже представлена библиографическая карта базы данных научной литературы Google Scholar (статьи были отфильтрованы по статьям из базы данных Scopus и Web of Science) по следующим ключевым словам: «data-centric», «supply chain» и «semiconductors».

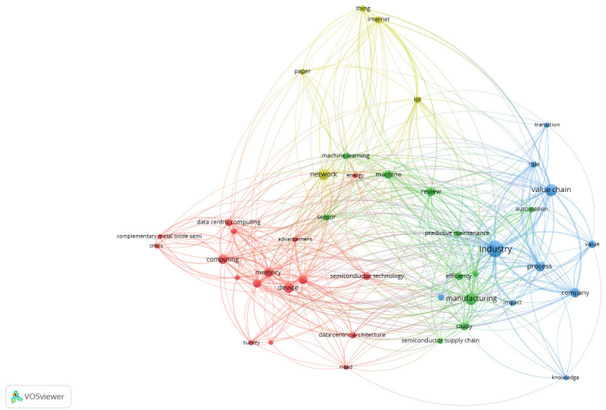


Рисунок 1 – Библиометрическая карта

Библиографическая карта, представленная на рисунке 1, позволяет выявить основные направления научных исследований, связанных с датацентричным подходом, цепями поставок и полупроводниковыми технологиями. Анализ структуры сети ключевых слов показывает наличие нескольких кластеров, каждый из которых отражает специфические аспекты рассматриваемой тематики и в совокупности формирует междисциплинарное поле исследования.

Первый кластер, выделенный красным цветом, концентрируется вокруг понятий computing, memory, device, semiconductor techology, data centric computing. Данный сегмент характеризует фундаментальную технологическую основу датацентричного подхода. Исследования в этой области направлены на развитие архитектур вычислений и совершенствование устройств хранения и обработки данных. В контексте рассматриваемой темы этот кластер представляет особую значимость, так как именно полупроводниковые технологии обеспечивают возможности масштабной работы с данными, лежащей в основе современных моделей устойчивого управления цепями поставок.

Второй кластер, окрашенный в жёлто-зелёный цвет, объединяет ключевые слова IoT, machine learning, sensor, internet of things, network. Он отражает процессы цифровизации и интеллектуализации управления цепями поставок. В данном направлении акцентируется внимание на использовании технологий интернета вещей, сенсорных систем и алгоритмов машинного обучения, обеспечивающих сбор, обработку и анализ информации в реальном времени. Именно эти методы позволяют формировать предиктивные модели, выявлять потенциальные «узкие места» и прогнозировать сбои в функционировании глобальных цепей поставок полупроводников и стратегически значимых минералов.

Третий кластер, представленный синим цветом, связан с ключевыми словами value chain, industry, manufacturing, process, automation, company. Данный сегмент отражает прикладные аспекты функционирования цепей поставок и

производственных систем. Здесь рассматриваются вопросы автоматизации, интеграции промышленных процессов и управления созданием ценности в цепях поставок. Для темы исследования этот кластер является критически важным, так как именно в нём концентрируются работы, посвящённые обеспечению устойчивости и резилентности глобальных производственно-логистических систем в условиях нестабильности внешней среды.

Четвёртый кластер, окрашенный в зелёный цвет, выполняет связующую функцию и объединяет ключевые слова review, study, efficiency, predictive maintenance, semiconductor supply chain. В нём представлены исследования, которые сочетают технологическую и управленческую перспективы, уделяя внимание вопросам эффективности, предиктивного обслуживания и устойчивости цепей поставок. Данный кластер можно рассматривать как центральный элемент карты, отражающий переход от теоретико-технологических основ к прикладным механизмам повышения резилентности.

Таким образом, проведённый анализ библиографической карты позволяет сделать вывод о том, что современное научное знание в исследуемой области распределено между тремя ключевыми направлениями: развитие полупроводниковых и вычислительных технологий, внедрение цифровых инструментов анализа данных (машинное обучение, IoT, большие данные) и совершенствование методов управления цепями поставок. Интеграция этих направлений образует основу датацентричного подхода, который рассматривается как стратегический инструмент повышения устойчивости и резилентности цепей поставок полупроводников и стратегически значимых минералов.

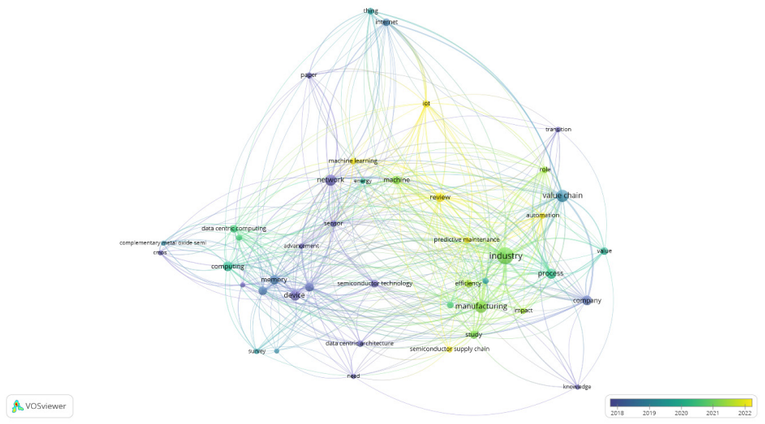


Рисунок 2 – Библиометрическая временная карта

На раннем этапе (2018–2019 гг.) наблюдается активность вокруг понятий semiconductor techology, device, memory, computing, data centric computing. Это свидетельствует о том, что первоначально исследования концентрировались на

технической основе – развитии архитектур вычислений, полупроводниковых технологий и устройств обработки данных. Данный фокус закономерно связан с необходимостью технологической базы для реализации датацентричных подходов.

В период 2020 года в центре внимания оказываются темы, связанные с управлением производственными процессами и цепями поставок: manufacturing, industry, efficiency, semiconductor supply chain, predictive maintenance. На этом этапе формируется исследовательская повестка, связанная с повышением эффективности и устойчивости цепей поставок, что отражает актуализацию проблем, вызванных глобальными сбоями в производственно-логистических системах.

Наконец, в наиболее поздний период (2021–2022 гг. и после) ведущими становятся исследования, посвящённые цифровым и интеллектуальным технологиям: IoT, machine learning, sensor, review. Эти ключевые слова указывают на сдвиг в сторону внедрения датацентричных инструментов для анализа и прогнозирования функционирования цепей поставок. Использование интернета вещей и алгоритмов машинного обучения позволяет реализовать новые механизмы обеспечения резилентности, включая раннее выявление рисков и адаптивное управление потоками ресурсов.

Далее необходимо провести контент-анализ избранных статей авторов, чтобы выделить основные аспекты исследований этой темы. Контент-анализ представлен ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Контент-анализ избранных статей

Статья	Основные аспекты исследований	Авторы
Data-driven supply chain orientation and supply chain performance: empirical investigation using a contingent resource-based view perspective	Статья исследует, как ориентация на данные в управлении цепями поставок (DDSCO) влияет на их эффективность (SCP). На основе опроса 307 китайских предприятий показано, что использование данных повышает эффективность цепей через развитие устойчивости и гибкости. Эти характеристики частично опосредуют влияние DDSCO, а динамичность рынка усиливает эффект. Работа расширяет понимание цифровых стратегий, подчеркивая роль управления рисками для повышения результативности цепей поставок.	Cailin Zhang
Big Data Driven Supply Chain Management	Статья посвящена созданию новой модели управления цепями поставок на основе больших данных. Авторы критикуют традиционные линейные подходы и предлагают архитектуру, сочетающую физическую, виртуальную и сервисную цепи, а также центры обработки данных (IoT, моделирование, сервисы). Такая система делает цепи поставок более гибкими, адаптивными и устойчивыми. Модель уже тестируется в крупном автопроизводстве в Шанхае.	Qi Li a, Ang Liu
Data-driven supply chain orientation and in№vation: the role of capabilities and information complexity	Статья исследует, как ориентация на данные в цепях поставок (DDSCO) влияет на инновационную эффективность. На основе опроса 296 китайских предприятий показано, что DDSCO развивает динамические и импровизационные способности, которые повышают уровень инноваций. При этом сложность информации и взаимодействие этих способностей по-разному влияют на результат: импровизационные способности усиливают собственное влияние на инновации, но ослабляют эффект динамических способностей.	Xinmeng Liu, Suicheng Li, Xiang Wang, Cailin Zhang

Big data-driven supply chain performance measurement system: a review and framework for implementation	Статья посвящена изучению показателей эффективности в цепочках поставок, основанных на использовании больших данных (BDDSC). Авторы проанализировали 66 научных публикаций и выявили две группы метрик: показатели для оценки возможностей big data-аналитики (24) и показатели для оценки процессов в цепочке поставок (130). Отмечается появление новых метрик, связанных с развитием прогнозной и социальной аналитики. На основе анализа предложена рамочная система измерения эффективности BDDSC, которая может помочь менеджерам выстраивать более прозрачное и результативное управление цепями поставок.	Sachin S. Kamble &Angappa Gunasekaran
Data-Driven Prediction of Order Lead Time in Semiconductor Supply Chain	Статья посвящена прогнозированию времени выполнения заказов в цепочке поставок с использованием искусственного интеллекта. В исследовании используется многомерный набор реальных данных из цепочки поставок производителя полупроводников, включающий характеристики заказов, поставок, планирования, клиентов и продукции. Авторы анализируют различные алгоритмы машинного обучения — от линейной регрессии и деревьев решений до нейронных сетей — и сравнивают их по точности прогнозов, скорости вычислений и интерпретируемости. Результаты показывают, что наилучшее сочетание высокой точности и эффективности вычислений дают бустинговые алгоритмы. Полученные выводы позволяют специалистам по цепям поставок формировать обоснованные прогнозы времени выполнения заказов и лучше понимать механизмы предсказаний.	Xin Shen, Patrick Moder, Christian Pfeiffer, Grit Walther & Hans Ehm

Результаты и обсуждение

Проведённый библиометрический анализ показал, что исследовательская повестка в области датацентричного подхода к управлению цепями поставок полупроводников и стратегически значимых минералов носит ярко выраженный междисциплинарный характер.

На ранних этапах основное внимание уделялось развитию полупроводниковых технологий и вычислительных архитектур, что формировало технологическую основу для обработки данных. В последующем акцент сместился в сторону прикладных задач управления производством и логистикой, связанных с повышением эффективности и устойчивости цепей поставок.

Современный этап исследований характеризуется активным внедрением цифровых инструментов – интернета вещей, машинного обучения и предиктивной аналитики, обеспечивающих прозрачность, гибкость и адаптивность цепочек.

Таким образом, интеграция технологических, управленческих и аналитических направлений позволяет рассматривать датацентричный подход как ключевой инструмент повышения резилентности глобальных цепочек поставок полупроводников и стратегически значимых минералов.

Информация о финансировании

Выполнено в рамках грантового финансирования молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2025–2027 годы» (Проект ИРН AP27508139 «Дата-центричный подход к повышению резилентности цепочек поставок полупроводников и стратегически значимых минералов»)

Выводы

Исследования в области датацентричного управления глобальными цепями поставок полупроводников имеют междисциплинарный характер и объединяют технологические, управленческие и аналитические направления.

Эволюция научной повестки показывает смещение акцента от технологической базы (полупроводники и вычислительные архитектуры) к управленческим задачам и цифровым инструментам анализа данных.

Ключевыми драйверами устойчивости и резилентности цепей поставок становятся интернет вещей, машинное обучение и предиктивная аналитика.

Датацентричный подход обеспечивает компаниям возможность повышения прозрачности, адаптивности и эффективности цепей поставок, что имеет критическое значение в условиях глобальной нестабильности.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования его результатов для разработки стратегий повышения устойчивости глобальных цепей поставок, а также для формирования государственной политики в сфере национальной и экономической безопасности.

REFERENCES

1 **Christopher, M.** Logistics & Supply Chain Management. – 6th ed. – Harlow : Pearson Education, 2016. – 347 p.

2 **Sheffi Y.** The Resilient Enterprise : Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage. – Cambridge, MA : MIT Press, 2005. – 336 p.

3 **Gereffi, G., Humphrey, J., Sturgeon, T.** The governance of global value chains // Review of International Political Eco№my. – 2005. – Vol. 12. – № 1. – P. 78–104. – https://doi.org/10.1080/09692290500049805

4 **Kamble S. S., Gunasekaran A.** Big data-driven supply chain performance measurement system : a review and framework for implementation // International Journal of Production Research. – 2019. – Vol. 58. – № 1. – P. 65–86. – https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630770

5 **Shen, X., Moder, P., Pfeiffer, C., Walther, G., Ehm, H.** Data-Driven Prediction of Order Lead Time in Semiconductor Supply Chain // International Conference on Operations Research. – Cham : Springer, 2022. – P. 645–652. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-24907-5_77

6 **Liu, X., Li, S., Wang, X., Zhang, C.** Data-driven supply chain orientation and invation : the role of capabilities and information complexity // European Journal of Invation Management. – 2023. – Vol. 28. – № 3. – P. 783–805. – https://doi.org/10.1108/EJIM-01-2023-0045

7 **Li Q., Liu A.** Big data driven supply chain management // Procedia CIRP. – 2019. – Vol. 81. – P. 1089–1094. – https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.258

8 **Zhang, C., Li, S., Liu, X.** Data-driven supply chain orientation and supply chain performance: empirical investigation using a contingent resource-based view perspective // European Journal of In№vation Management. – 2025. – Vol. 28. – № 3. – P. 812–830. – https://doi.org/10.1108/EJIM-01-2024-0017

9 **Iva№v D., Dolgui A.** A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0 // Production Planning & Control. – 2020. – Vol. 32. – №. 9. – P. 775–788. – https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450

10 **Choi T.-M., Wallace S. W., Wang Y.** Big Data Analytics in Operations and Supply Chain Management : A Review of the Literature and Future Directions // Production and Operations Management. – 2018. – Vol. 27. – №. 10. – P. 1868–1886. https://doi.org/10.1111/poms.12838

Поступило в редакцию 25.08.25.
Поступило с исправлениями 07.11.25.
Принято в печать 19.11.25.

Ж. К. Кегенбеков[1], А. К. Конгуева[2], А. Н. Алипова[3]
[1,2,3]Қазақ-Неміс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
25.08.25 ж. баспаға түсті.
07.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕР МЕН МИНЕРАЛДАРДЫҢ ЖАһАНДЫҚ ЖЕТКІЗУ ТІЗБЕКТЕРІН БАСҚАРУ: БИБЛИОМЕТРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ МАЗМҰНДЫҚ ТАЛДАУ

Мақалада библиометриялық және мазмұнды талдауды қолдана отырып, жартылай өткізгіштер мен стратегиялық маңызды минералдарды жеткізудің жаһандық тізбектерін басқару саласындағы зерттеулердің дамуы талданады. Цифрлық трансформация, геосаяси тұрақсыздық және күшейіп келе жатқан Халықаралық бәсекелестік жағдайындағы өндірістік-логистикалық жүйелердің тұрақтылығы мен резилеттілігі мәселелеріне ерекше назар аударылды. Әдістемелік негіз 1994–2025 жылдардағы жетекші ғылыми дерекқорлардан алынған басылымдардың библиометриялық талдауы болды, бұл негізгі тенденцияларды, зерттеу кластерлерін, ғылыми күн тәртібінің динамикасын және зерттеу басымдықтарының өзгеруін анықтауға мүмкіндік берді. Мазмұнды талдау цифрлық құралдарды – заттар интернетін, машиналық оқытуды, блокчейн технологияларын, үлкен деректерді, бұлттық шешімдерді және болжамды аналитиканы – жеткізу тізбегін басқаруда, тиімділікті арттыруда және тәуекелдерді болжауда қолданудың негізгі бағыттарын анықтады. Алынған нәтижелер зияткерлік жүйелерді цифрландыру және интеграциялау жаһандық өндірістік-логистикалық құрылымдардың ашықтығын, икемділігін, тұрақтылығы мен бейімделуін арттырудың стратегиялық құралы ретінде әрекет ететін жаңа зерттеу парадигмасының қалыптасқанын айғақтайды.

Халықаралық ынтымақтастықтың, саяси-экономикалық факторлардың, Киберқауіпсіздіктің, экологиялық стандарттар мен тұрақты даму қағидаттарының жеткізудің цифрлық экожүйесін қалыптастырудағы және мемлекеттер мен компаниялардың стратегиялық дербестігін нығайтудағы рөліне қосымша назар аударылады.

Кілтті сөздер: жаһандық жеткізу тізбектері, жартылай өткізгіштер, стратегиялық маңызды минералдар, датацентрикалық тәсіл, библиометриялық талдау, үлкен деректер, интернет заттары, машиналық оқыту.

Zh. K. Kegenbekov[1], A. K. Konguyeva[2], A. N. Alipova[3]
[1,2,3]Kazakh-German University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 25.08.25.
Received in revised form 07.11.25.
Accepted for publication 19.11.25.

MANAGING GLOBAL SUPPLY CHAINS OF SEMICONDUCTORS AND MINERALS: BIBLIOMETRIC AND CONTENT ANALYSIS

The article analyzes the development of research in the field of global supply chain management of semiconductors and strategically important minerals using bibliometric and content analysis. Special attention is paid to the issues of stability and resilience of production and logistics systems in the context of digital transformation, geopolitical instability and increasing international competition. The methodological basis was formed by a bibliometric analysis of publications from leading scientific databases for 1994–2025, which made it possible to identify key trends, research clusters, the dynamics of the scientific agenda and the transformation of research priorities. The content analysis revealed the main areas of application of digital tools – the Internet of Things, machine learning, blockchain techologies, big data, cloud solutions and predictive analytics – in supply chain management, efficiency improvement and risk forecasting. The results obtained indicate the formation of a new research paradigm in which digitalization and integration of intelligent systems act as strategic tools for increasing transparency, flexibility, sustainability and adaptability of global production and logistics structures. Additionally, attention is focused on the role of international cooperation, political and economic factors, cybersecurity, environmental standards and principles of sustainable development in shaping digital supply ecosystems and strengthening the strategic automy of states and companies.

Keywords: global supply chains, semiconductors, strategically important minerals, datacentric approach, bibliometric analysis, Big Data, Internet of Things, machine learning.

МРНТИ 73.01.77
https://doi.org/10.48081/IGCI5887

А. К. Нуралина[1], Р. Б. Муканов[2], Ж. Ж. Альтаева[3]
[1,2,3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1318-2942
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-0513
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1027-9159
*e-mail: nuralina85@list.ru

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ТУРИСТИЧЕСКОЙ ЛОГИСТИКИ ЮЖНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА

Статья систематизирует методологические подходы к моделированию логистических систем, рассматривая их как сложные иерархические, многоуровневые и стохастические объекты, функционирующие в условиях ограниченных ресурсов, неопределенности спроса и вариативности транспортной инфраструктуры. Показано, что интеграция системного, математического, иерархического и цифрового подходов обеспечивает воспроизводимость, верифицируемость и масштабируемость решений.

В качестве кейса рассмотрена туристическая логистика южного региона Казахстана, где иерархический метод служит универсальным механизмом декомпозиции глобальной задачи распределения потоков с последующей координацией локальных решений. Разработаны формальные постановки для оптимизации распределения потоков, сформулированы алгоритмические процедуры (Лагранжева релаксация, координационные итерации), выполнено сравнение с альтернативными методами (линейное/целочисленное программирование, имитационное моделирование, динамическое программирование, методы Монте-Карло, многокритериальная оптимизация).

Особое внимание уделено роли цифровых платформ в интеграции данных, использованию IoT/Big Data для мониторинга туристических потоков, а также учёту экологической пропускной способности территорий. Дополнительно проанализированы вопросы транспортной доступности ключевых туристических маршрутов, взаимодействия автомобильных и железнодорожных перевозок, а также влияния сезонности на колебания туристического спроса. Рассматриваются перспективы внедрения интеллектуальных транспортных систем, которые позволяют в реальном времени адаптировать логистические решения к изменяющимся условиям.

Предложенные решения могут служить основой для стратегического планирования, повышения устойчивости транспортно-логистической системы и развития туризма в условиях глобальных вызовов. Подчёркивается, что комплексный подход к моделированию не только повышает эффективность управления потоками, но и обеспечивает баланс между

экономическими интересами, комфортом туристов и сохранением природного потенциала региона.

Ключевые слова: логистическая система, иерархическое управление, математическое моделирование, цифровизация, устойчивое развитие, транспортная инфраструктура, туристические потоки.

Введение

Логистические системы объединяют материальные, информационные и финансовые потоки и по своей природе являются многоуровневыми и взаимосвязанными.

В условиях цифровизации экономики, роста требований к устойчивости и обострения ресурсных ограничений именно моделирование становится ядром принятия решений.

Модели позволяют прогнозировать поведение сети, оценивать сценарии, оптимизировать распределение ресурсов, минимизировать затраты и риски.

Особенно остро задачи моделирования проявляются в транспортно-логистических сетях туристических регионов, где спрос носит ярко выраженный сезонный и событийный характер, а пропускная способность инфраструктуры и экологические ограничения разнообразны [1;2;3]. Практика показывает, что изолированное применение одиночных методов зачастую уступает комплексным методологиям, которые объединяют системное видение, строгие математические постановки и цифровые инструменты анализа данных.

Материалы и методы

Теоретические основы логистических систем. Логистическая система – это целевая, организационно и технологически связанная совокупность элементов (узлов, каналов, ресурсов), обеспечивающая преобразование входных потоков в выходные при соблюдении ограничений и достижении целевых показателей. По масштабу выделяют макро- (национальные/международные), мезо- (региональные/отраслевые) и микроуровневые (предприятие/склад/ терминал) системы [4;5;6].

Системы могут быть открытыми (с обменом потоками с внешней средой) и закрытыми (внутренний оборот), детерминированными и стохастическими, статическими и динамическими.

Информационные потоки и цифровые платформы играют роль «соединительной ткани», позволяя синхронизировать операции, наблюдать за состоянием сети в реальном времени и осуществлять координацию участников [7].

Основными характеристиками являются: структура (топология сети, уровни), процессы (перемещение, складирование, обслуживание), ресурсы (транспорт, мощности), правила (политики управления, тарифы), а также показатели эффективности (стоимость, время, надежность, устойчивость). Сложность возрастает с увеличением размерности задачи, что обусловливает необходимость иерархии и декомпозиции.

Методологические подходы к моделированию логистических систем представляют собой комплекс теоретических, аналитических и практических инструментов, направленных на создание, анализ и оптимизацию потоков товаров,

услуг, информации и финансов в рамках единой системы. Эти подходы основаны на принципах системного анализа, где логистическая система рассматривается как открытая, динамичная структура, взаимодействующая с внешней средой. В контексте туристической логистики, которая включает управление цепочками поставок для туристов (транспорт, размещение, экскурсии, питание), моделирование помогает решать задачи оптимизации маршрутов, минимизации затрат и обеспечения устойчивости. Рассмотрим ключевые подходы, а затем применим их к примеру туристической логистики южного региона Казахстана (включая г.Шымкент, Алматинскую, Туркестанскую, Жамбылскую области и прилегающие территории с богатым историко-культурным и природным потенциалом).

Методология моделирования логистических систем эволюционировала от простых аналитических моделей к интегрированным цифровым и симуляционным инструментам. В таблице 1 приведены структурированные ключевые подходы.

Таблица 1 – Основные методологические подходы, применяемые в туристической логистике

Подход	Описание подхода	Инструменты и методы	Применение в логистике
Системный подход	Рассматривает логистическую систему как целостный объект с входами (ресурсы), процессами (перевозки, хранение) и выходами (доставка услуг). Учитывает взаимодействия элементов и внешние факторы (экономика, экология).	Системный анализ, декомпозиция на подсистемы (транспортная, складская, информационная).	Моделирование цепочек поставок (supply chain management) для прогнозирования потоков туристов и ресурсов.
Математическое моделирование	Использует уравнения и алгоритмы для оптимизации. Фокус на многокритериальной оценке (затраты, время, риски).	Линейное и нелинейное программирование, многокритериальная оптимизация (например, модель Pareto для баланса затрат и качества). Алгоритмы, такие как двухуровневый алгоритм для расчета параметров терминалов.	Оптимизация маршрутов (например, алгоритм Дейкстры для транспортных сетей) и распределения ресурсов в туристических кластерах.
Имитационное (симуляционное) моделирование	Имитирует реальные процессы в виртуальной среде для тестирования сценариев. Учитывает стохастику (случайные события, как погодные условия).	Монте-Карло симуляция, агентное моделирование (где «агенты» – туристы, поставщики). Программное обеспечение: AnyLogic, Simul8.	Симуляция пиковых нагрузок в туристических сезонах, прогнозирование пробок или задержек в логистике.

SWOT-анализ и стратегическое моделирование	Качественно-аналитический метод для оценки сильных/ слабых сторон, возможностей/ угроз. Интегрируется с количественными моделями.	Матрицы SWOT, PEST-анализ (политические, экономические, социальные, технологические факторы).	Оценка инфраструктуры и маршрутов в регионах, выявление барьеров (например, качество дорог).
Смешанные методы (mixed-methods)	Комбинация качественных (интервью, фокус-группы) и количественных (регрессия, корреляция) данных для комплексного анализа.	Корреляционный анализ (например, Пирсона для связи между инфраструктурой и потоком туристов), регрессионное моделирование.	Изучение устойчивости: интервью с заинтересованными сторонами + статистический анализ данных о туристах.

Эти подходы опираются на теоретическую базу, включая работы по логистике (например, фундаментальные источники по транспортной логистике) и адаптированы для туризма, где ключевыми потоками являются «туристские» (пассажиропотоки, услуги размещения) [8]. В моделировании подчеркивается интеграция ИТ (ERP-системы, GPS-трекинг) для реального времени управления.

Системный подход

Системный подход трактует логистику как целостный организм, где эффект зависит не только от параметров компонентов, но и от их взаимодействий.

Ключевые принципы: целостность, иерархичность, обратные связи, эмерджентность. На практике это приводит к построению многоуровневых моделей, в которых цели верхнего уровня декомпозируются до задач нижнего уровня, а результаты локальных оптимизаций согласуются с глобальными критериями.

Туристическая логистика моделируется как интегрированная система, включающая подсистемы: транспорт (авто, ж/д «Шымкент<=>Алматы»), размещение (отели) и информационную (цифровой атлас для маршрутов). Например, в рамках программы «Digital Kazakhstan» создается модель цепочки поставок, где туристы – «клиенты», а поставщики – локальные гиды и транспортные компании. Это позволяет анализировать взаимодействия, минимизируя задержки (например, интеграция ж/д с автобусными маршрутами) [9].

Математические модели логистики охватывают широкий спектр: сетевые модели потоков (LP/MIP), задачи размещения мощностей (p-median, p-center, hub-location), маршрутизацию (VRP, VRPTW), расписания (scheduling), очереди (теория массового обслуживания), стохастическое и робастное программирование, динамическое программирование и имитационное моделирование.

Оптимизационные модели типично формулируются в виде минимизации совокупных затрат или максимизации полезности при ограничениях пропускной способности и спроса.

Пример типовой постановки для многоэшелонной сети:
минимизировать функцию

$$Z = \sum\{(i,j)\in E\}\ c_{ij}\ x_{ij} + \sum\{k\in F\}\ f_k\ y_k$$

при ограничениях

$\sum\{j\}\ x_{ij} - \sum\{h\}\ x_{hi} = d_i,\ \forall i\in V$ (баланс потоков);
$\sum\{j\}\ x_{ij} \le U_i\ y_i,\quad \forall i\in F$ (мощности);
$x_{ij} \ge 0,\ y_i \in \{0,1\}$,

где x_{ij} – поток по дуге (i,j),
y_i – бинарная переменная открытия объекта,
c_{ij} – удельные затраты,
f_k – фиксированные издержки,
U_i – мощность.

Для оптимизации маршрутов используется многокритериальная модель, учитывающая затраты на топливо, время в пути и экологический фактор. Пример: двухуровневая оптимизация для логистических центров в Шымкенте (стратегический уровень – размещение хабов; тактический – расписание экскурсий). Алгоритм рассчитывает параметры терминалов (количество машин, время хранения багажа), с учетом случайных потоков туристов (до 800 тыс. в сезон). Это основано на данных АО «НК КТЖ» и адаптировано для туризма, где цель – сократить время от прибытия в аэропорт Алматы до исторических сайтов на 20–30 % [10].

Результаты и обсуждение

Иерархический подход опирается на декомпозицию глобальной задачи на согласуемые локальные подзадачи [11]. Верхний уровень задает координирующие параметры (теневые цены, лимиты, приоритеты), а нижние уровни максимизируют локальные целевые функции с учетом этих сигналов.

Согласование достигается итерационными процедурами: Лагранжева релаксация, субградиентные методы, процедуры цен Лагранжа, двусторонние штрафы.

Подход особенно эффективен при наличии конфиденциальности локальных данных и распределенной ответственности.

Экологический и устойчивый подход

Современное моделирование учитывает ограничения экологической пропускной способности, углеродный след и воздействие на хрупкие экосистемы.

Это приводит к многоцелевым постановкам, где минимизация выбросов CO_2, потребления энергии и шумового воздействия интегрируется с экономическими критериями.

В практических моделях ограничения вводятся в виде штрафов, лимитов или отдельных компонент целевой функции.

Цифровизация и Smart-логистика

IoT-датчики и геоинформационные системы обеспечивают поток данных в реальном времени; Big Data и машинное обучение поддерживают прогнозирование спроса, времен в пути и рисков; блокчейн-решения повышают прозрачность транзакций. Интеграционные платформы объединяют перевозчиков, склады, туристические объекты и регуляторов, что позволяет внедрять замкнутый контур управления от данных к решениям [12; 13].

SWOT-анализ

В южном регионе сильные стороны – разнообразие туров (историко-культурный, экотуризм); слабости – плохое качество дорог и логистика (недостаток удобных маршрутов); возможности – развитие новых кластеров (например, «Великий шелковый путь»); угрозы – кадровый дефицит и инфраструктурные пробелы. Моделирование включает корреляционный анализ: связь между числом мест размещения (около 50 тыс. в регионе) и притоком туристов (рост на 15 % ежегодно). Это помогает прогнозировать доходы и инвестиции (цель – 6,3 трлн тг ВДС от туризма к 2025 г.) [9; 14].

Иерархическое моделирование туристической логистики (кейс южного Казахстана)

Рассмотрим задачу распределения ограниченного туристического потока между тремя регионами: Туркестан (x1), Алматы (x2), Шымкент (x3).

Глобальное ограничение: $x_1 + x_2 + x_3 = 10\ 000$. Локальные функции эффективности отражают качество инфраструктуры и экологические ограничения:

$$f_1(x_1) = 2x_1 - 0.0002x_1^2;$$
$$f_2(x_2) = 1.8x_2 - 0.0001x_2^2;$$
$$f_3(x_3) = 2.2x_3 - 0.0003x_3^2.$$

Глобальная цель: максимизировать $G = f_1(x_1)+f_2(x_2)+f_3(x_3)$ при указанном ограничении.

Верхний уровень выбирает координирующий множитель λ, нижние уровни максимизируют $f_i(x_i) - \lambda x_i$. На каждой итерации λ корректируется в сторону соблюдения суммарного лимита.

Каркас алгоритма:

1) Инициализация λ0.

2) На шаге t каждая подсистема решает:

$$x_i(t) = \text{argmax}(x_i \geq 0)\ (f_i(x_i) - \lambda^t x_i).$$

3) Координатор обновляет $\lambda^{t+1} = \lambda^t + \alpha^t (\sum_i x_i^t - 10\ 000)$,
где α_t – шаг субградиента.

4) Повторять до выполнения ограничений и стагнации G.

Полученное решение даёт распределение: Туркестан ≈ 2909, Алматы ≈ 4818, Шымкент ≈ 2273, что обеспечивает G ≈ 13 927 и согласуется с локальными ограничениями (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Сравнение распределения туристов по регионам

Регион	Равномерно	Ручная настройка	Иерархическое оптимум
Туркестан	3333	2800	≈ 2909
Алматы	3333	4500	≈ 4818
Шымкент	3333	2700	≈ 2273

Локальная декомпозиция внутри региона Алматы (x_2) на три объекта – Шымбулак ($x_{2.1}$), Чарын ($x_{2.2}$), Танбалы ($x_{2.3}$) – подчиняется ограничению $x_{2.1} + x_{2.2} + x_{2.3} = x_2$.

Локальные функции эффективности с учётом экологии задаются квадратичными аппроксимациями. Оптимизация показывает смещение потока к Шымбулаку при умеренной нагрузке на Чарын и Танбалы, что согласуется с принципами устойчивого туризма.

Методологические основы управления туристическими потоками и транспортно-логистическими сетями широко отражены в работах по устойчивому туризму, интеллектуальным транспортным системам и оптимизационному моделированию. Исследования демонстрируют эффективность интеграции цифровых технологий (онлайн-платформы, геоаналитика, IoT) и строгих оптимизационных методов при ограничениях инфраструктуры и экологии. Сопоставление с практиками Турции и Испании подтверждает критическую роль цифровых платформ и математических моделей в разгрузке «узких мест» и распределении посетителей по зонам с учётом пропускной способности [15 – 19].

В контексте иерархических систем управлением потоками в транспортных сетях эффективно поддерживается за счёт многоуровневой координации, где верхний уровень формулирует цели и ограничения, а нижние оптимизируют локальные функции с учётом сигналов. Такой подход облегчает масштабирование, сохраняет автономию подсистем и снижает вычислительную сложность за счёт распараллеливания.

Методология и алгоритмические решения

Формальные постановки

Многоцелевые модели формулируют задачу в виде: максимизировать

$$J = w_1 \cdot \text{Экон} + w_2 \cdot \text{Кач} + w_3 \cdot \text{Уст},$$

где Экон – экономические показатели (доход/затраты),
Кач – сервис (время, надежность),
Уст – устойчивость (эмиссии, шум, экологическая нагрузка),
w_k – веса критериев.
Альтернативно применяются методы Парето-оптимальности и ε-ограничений.

Стохастические постановки описывают неопределенность через сценарии $s \in S$ с вероятностями ps. Типичный вид: минимизировать $E_s[Z_s(x, y, \omega_s)]$ при ресурсных и балансных ограничениях во всех сценариях и неантиципативности на «первом уровне». Робастные модели оптимизируют наихудший случай или ожидаемый риск (CVaR).

Лагранжева релаксация и координация

Связующие ограничения (например, суммарные лимиты или баланс) переносятся в целевую функцию с множителями. Полученная двойственная задача решается субградиентными/координатными методами, после чего осуществляется восстановление примального решения и проверка оптимальности (KKT/допустимость).

Имитационные модели и цифровые двойники

Дискретно-событийная имитация (DES) и агентное моделирование (ABM) применяются для оценки пропускной способности дорог, очередей в терминалах, поведенческих реакций туристов на сервисные изменения. Цифровые двойники позволяют в безопасной среде тестировать стратегии тарифов и маршрутизации, в том числе алгоритмы динамического ценообразования и управления спросом.

Симуляция сценариев (например, пиковый сезон в Алматы) с использованием Монте-Карло для учета погодных рисков. Mixed-methods: опросы 150+ местных жителей и регрессия для оценки влияния логистики на устойчивость (снижение выбросов за счет эко-транспорта). Внедрение технологий (GPS для маршрутов, локальные поставщики еды) оптимизирует цепочки, как в примерах Коста-Рики, адаптированных для Казахстана. Проблемы, выявленные в 2025 г.: нехватка инфраструктуры, решаемая через субсидии на авиаперелеты и кластеры [20, 21].

Архитектура цифровой платформы логистики

Архитектура охватывает уровни: (1) сбор данных (IoT-датчики, мобильные приложения, биллинговые системы), (2) слой хранения и потоковой обработки, (3) аналитика и ML-модели, (4) оптимизационные сервисы (модули LP/MIP/SP/RELAX), (5) интерфейсы для координации с участниками и регуляторами.

Безопасность обеспечивается разграничением прав и шифрованием; приватность – анонимизацией и агрегированием.

Эксперимент по иерархическому распределению туристических потоков подтверждает преимущества декомпозиции: в сравнении с равномерным распределением и ручной настройкой достигается большее значение целевой функции G при соблюдении ограничений.

Чувствительный анализ показывает, что 10÷15-процентные изменения параметров функций эффективности приводят к смещению оптимума на 3÷7 %, однако структура решения (приоритет развитых узлов) сохраняется (см. таблицу 3). Добавление экологических лимитов на «чувствительные» объекты снижает локальные нагрузки, перепрофилируя часть потока без критичного падения глобальной эффективности.

Таблица 3 – Результаты чувствительного анализа (иллюстрация)

Сценарий	Δ параметров	x_1	x_2	x_3
Базовый	0%	≈ 2909	≈ 4818	≈ 2273
Инфраструктура Алматы+	+10%	≈ 2750	≈ 5000	≈ 2250
Экология Чарын	лимит	≈ 2950	≈ 4700	≈ 2350
Спрос пик	+15%	≈ 2850	≈ 4950	≈ 2200

Обсуждение и ограничения

Несмотря на высокую объясняющую силу, модели чувствительны к калибровке параметров и качеству данных.

Классические квадратичные аппроксимации полезности – лишь первый шаг; для точной настройки востребованы эмпирические оценки на основе реальных данных и экспериментов.

Допущения о статичности спроса и стационарности процессов ограничивают применимость в ситуациях резких шоков (погодные условия, форс-мажоры, события).

Требуется дальнейшее развитие адаптивных, онлайн-обучаемых моделей.

Практические рекомендации

1. Внедрить иерархическую координацию при планировании потоков между регионами и объектами.

2. Создать цифровую платформу управления спросом и маршрутизацией с интеграцией данных IoT/GIS и алгоритмов оптимизации.

3. Институционализировать учет экологической пропускной способности и механизмов «мягкого» перераспределения.

4. Развивать кадровые компетенции и методические регламенты по моделированию и верификации моделей.

Выводы

В работе обоснована необходимость комплексного методологического подхода к моделированию логистических систем, сочетающего системное видение, строгие оптимизационные постановки, иерархическую координацию и цифровизацию. На кейсе туристической логистики Южного региона Казахстана показано, что иерархическое распределение потоков обеспечивает улучшение глобальной эффективности при соблюдении инфраструктурных и экологических ограничений. Перспективы включают интеграцию ИИ-методов прогнозирования, робастные оптимизации и развертывание цифровых двойников регионов.

В итоге, моделирование позволяет повысить эффективность на 15÷25 %, способствуя целям Концепции развития туризма РК (рост занятости до 800 тыс., инвестиции в инфраструктуру) [22]. Для южного региона ключ – интеграция с транзитными коридорами (Центр-Юг), что усиливает роль логистики как драйвера экономического роста.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Шыныкулова, А. Б.** Проблемы развития транспортной инфраструктуры в туристических регионах Казахстана // Вестник транспортной логистики. – 2022. – № 3. – С. 22–31.

2 Президент РК Касым-Жомарт Токаев. Выступление на совещании по развитию туризма, март 2024. – [Электронный ресурс] – URL: https://www.akorda.kz (дата обращения: 20.04.2025).

3 Отчет МИИР РК о состоянии региональных дорог. – Астана, 2023.

4 **Ghaderi, H., Henderson, J.** Logistics and Tourism Development: A Case of Integrated Modeling. Tourism Economics, 18(2). – P. 373–392.

5 **Hall, C. M., Gössling, S., Scott, D.** The Routledge Handbook of Tourism and Sustainability. Routledge.

6 **Wang J., Zhang D., Cao J.** Hierarchical Control in Intelligent Transportation Systems. IEEE T-ITS, 15(3). – P. 1240–1248.

7 **Каракулов, Д. Р.** Цифровизация транспортных систем : опыт Казахстана и СНГ. – Алматы: Қазақ университеті, 2022.

8 Министерство культуры и спорта РК. Дорожная карта по развитию ТОП-20 туристских зон. – Астана, 2022.

9 **Saparbayev, A., Saparova, G., Makulova, A., Imataeva, A.** Methodology of the research of orga nizational and economic bases of development of agro, ethno and spiritual tourism in the Republic of Kazakhstan. January 2020. E3S Web Conferences 159(4): 04010. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015904010.

10 **Шабанов, А. Ш.** Модели и алгоритмы оптимизации транспортно-логистических систем: на примере Республики Казахстан: автореф. дис. канд. техн.наук: 05.22.01. – М., 2006. – 23 с.

11 **Умбетов, У.** Иерархические системы управления химико-технологическими комплексами: автореф. докт. техн. наук. – Алматы, КазНТУ, 2008.

12 **Bukhari, S. A. H., Said, R., Usman, M.** Smart Tourism and Sustainable Transport Infrastructure. Sustainability, 12(21), 9020.

13 Smart City Institute. Smart City Solutions for Tourism : Enhancing Visitor Experience. 2022.

14 Юг Казахстана объединяет усилия для развития туризма : состоялось онлайн-совещание отраслевых советов. НПП РК «Атамекен». [Электронный ресурс]. – https://akmola.atameken.kz/ru/news/54594-yug-kazahstana-ob-edinyaet-usiliya-dlya-razvitiya-turizma-sostoyalos-onlajn-soveshanie-otraslevyh-sovetov?utm_source=chatgpt.com. Дата обращения: 31.08.2025г.

15 UNWTO. Global Guidelines for Tourism Infrastructure Development. Madrid, 2021.

16 **Öztürk, Y.** Digital Transformation in Tourism: The Case of Turkey. Journal of Tourism and Hospitality Management, 2022.

17 **García, M. et al.** Optimizing Tourist Flows in Spain Using Mathematical Models. IJTR, 2021.

18 UNEP. Tourism and the Environment : Challenges and Opportunities. 2022.

19 **Smith, J. et al.** Artificial Intelligence in Tourism : Predicting Tourist Flows. Journal of Travel Research, 2023.

20 В Усть-Каменогорске прошел круглый стола на тему : «Перспективы развития туризма Восточно-Казахстанской области». [Электронный ресурс]. – https://qaztourism.kz/ru/press-center/all/85/ (Дата обращения: 02.09.2025).

REFERENCES

1 **Shynykulova, A. B.** Problemy razvitiya transportnoy infrastruktury v turisticheskikh regionakh Kazakhstana [Problems of transport infrastructure development in the tourist regions of Kazakhstan]. Vestnik transportnoy logistiki. – 2022. – № 3. – P. 22–31.

2 **Tokayev, K.-Zh.** Vyistuplenie na soveshchanii po razvitiyu turizma [Speech at the meeting on tourism development]. March 2024. – [Electronic resource] – URL: https://www.akorda.kz (accessed: 20.04.2025).

3 Otchet MIIR RK o sostoyanii regionalnykh dorog [Report of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan on the state of regional roads]. – Astana. – 2023.

4 **Ghaderi, H., Henderson, J.** Logistics and Tourism Development: A Case of Integrated Modeling. Tourism Economics, 18(2), P. 373–392.

5 **Hall, C. M., Gössling, S., Scott, D.** The Routledge Handbook of Tourism and Sustainability. Routledge.

6 **Wang, J., Zhang, D., Cao, J.** Hierarchical Control in Intelligent Transportation Systems. IEEE T-ITS, 15(3), P. 1240–1248.

7 **Karakulov, D. R.** Tsifrovizatsiya transportnykh sistem: opyt Kazakhstana i SNG [Digitalization of transport systems: experience of Kazakhstan and CIS]. – Almaty : Kazakh University, 2022.

8 Ministerstvo kultury i sporta RK. Dorozhnaya karta po razvitiyu TOP-20 turistskikh zon [Roadmap for the development of the TOP-20 tourist zones]. – Astana, 2022.

9 **Saparbayev A., Saparova G., Makulova A., Imataeva A.** Methodology of the research of orga nizational and economic bases of development of agro, ethno and spiritual tourism in the Republic of Kazakhstan. January 2020. E3S Web Conferences 159(4): 04010. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015904010.

10 **Shabanov, A. Sh.** Modeli i algoritmy optimizatsii transportno-logisticheskikh sistem: na primere Respubliki Kazakhstan [Models and algorithms for optimization of transport and logistics systems: on the example of the Republic of Kazakhstan]. Abstract of Candidate of Technical Sciences Dissertation, M. : 2006. – 23 p.

11 **Umbetov, U.** Iyerarkhicheskie sistemy upravleniya khimiko-tekhnologicheskimi kompleksami [Hierarchical management systems of chemical-technological complexes]. Abstract of Doctor of Technical Sciences Dissertation, Almaty, KazNTU, 2008.

12 **Bukhari, S .A. H., Said, R., Usman, M.** Smart Tourism and Sustainable Transport Infrastructure. Sustainability, 12(21), 9020.

13 Smart City Institute. Smart City Solutions for Tourism: Enhancing Visitor Experience, 2022.

14 Yug Kazakhstana obyedinayet usiliya dlya razvitiya turizma [The South of Kazakhstan unites efforts for tourism development]. NPP RK «Atameken». Online source : [Electronic resource]. – https://akmola.atameken.kz/ (accessed: 31.08.2025).

15 UNWTO. Global Guidelines for Tourism Infrastructure Development. Madrid, 2021.

16 **Öztürk, Y.** Digital Transformation in Tourism: The Case of Turkey. Journal of Tourism and Hospitality Management, 2022.

17 **García, M. et al.** Optimizing Tourist Flows in Spain Using Mathematical Models. IJTR, 2021.

18 UNEP. Tourism and the Environment : Challenges and Opportunities. 2022.

19 **Smith, J. et al.** Artificial Intelligence in Tourism: Predicting Tourist Flows. Journal of Travel Research, 2023.

20 V Ust-Kamenogorske proshel kruglyi stol na temu : «Perspektivy razvitiya turizma Vostochno-Kazakhstanskoy oblasti» [Round table on the topic: Prospects for the development of tourism in the East Kazakhstan region]. Online source: [Electronic resource]. – https://qaztourism.kz/ (accessed: 02.09.2025).

Поступило в редакцию 12.09.25.
Поступило с исправлениями 18.10.25.
Принято в печать 04.11.25.

А. К. Нуралина[1], Р. Б. Муканов[2], Ж. Ж. Альтаева[3]
[1,2,3]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
12.09.25 ж. баспаға түсті.
18.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
04.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІК ӨҢІРІНІҢ ТУРИСТІК ЛОГИСТИКАСЫ МЫСАЛЫНДА ЛОГИСТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУДІҢ ӘДІСНАМАЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІ

Мақала логистикалық жүйелерді модельдеудің әдіснамалық тәсілдерін жүйелейді, оларды шектеулі ресурстар, сұраныстың белгісіздігі және көлік инфрақұрылымының өзгергіштігі жағдайында жұмыс істейтін күрделі иерархиялық, көп деңгейлі және стохастикалық нысандар ретінде қарастырады. Жүйелік, математикалық, иерархиялық және цифрлық тәсілдердің интеграциясы шешімдердің қайталануын, тексерілуін және масштабталуын қамтамасыз ететіні көрсетілген. Іс ретінде Қазақстанның оңтүстік өңірінің туристік логистикасы қаралды, мұнда иерархиялық әдіс жергілікті шешімдерді үйлестіре отырып, ағындарды бөлудің жаһандық міндетін ыдыратудың әмбебап тетігі ретінде қызмет етеді. Ағындардың таралуын оңтайландыру үшін формальды қойылымдар жасалды, алгоритмдік процедуралар тұжырымдалды (Лагранж релаксациясы, координациялық итерациялар), балама әдістермен салыстыру жүргізілді (сызықтық/бүтін бағдарламалау, модельдеу, динамикалық бағдарламалау, Монте-Карло әдістері, көп критериалды оңтайландыру). Деректерді біріктірудегі цифрлық платформалардың рөліне, туристік Ағындарды бақылау үшін IoT/Big Data-ны пайдалануға, сондай-ақ аумақтардың экологиялық өткізу қабілетін есепке алуға ерекше назар аударылады. Негізгі туристік маршруттардың көліктік қолжетімділігі, автомобиль және теміржол тасымалдарының өзара іс-қимылы, сондай-ақ маусымдықтың туристік сұраныстың ауытқуына әсері мәселелері қосымша талданады. Нақты уақыт режимінде логистикалық шешімдерді өзгермелі жағдайларға бейімдеуге мүмкіндік беретін Интеллектуалды көлік жүйелерін енгізу перспективалары қарастырылады. Ұсынылған шешімдер Стратегиялық жоспарлау, көлік-логистикалық жүйенің тұрақтылығын арттыру және жаһандық сын-қатерлер жағдайында туризмді дамыту үшін негіз бола алады. Модельдеуге кешенді көзқарас ағындарды басқарудың тиімділігін арттырып қана қоймай, экономикалық мүдделер, туристердің жайлылығы мен аймақтың табиғи әлеуетін сақтау арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететіні атап өтілген.

Кілтті сөздер: логистикалық жүйе, иерархиялық басқару, математикалық модельдеу, цифрландыру, тұрақты даму, көлік инфрақұрылымы, Туристік ағындар.

A. K. Nuralina[1], R. B. Mukanov[2], Zh. Zh. Altayeva[3]
[1,2,3]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 12.09.25.
Received in revised form 18.10.25.
Accepted for publication 04.11.25.

APPROACHES TO MODELING TOURISM LOGISTICS SYSTEMS IN THE SOUTHERN REGION OF KAZAKHSTAN

The article systematizes methodological approaches to modeling logistics systems, considering them as complex hierarchical, multilevel and stochastic objects operating in conditions of limited resources, uncertainty of demand and variability of transport infrastructure. It is shown that the integration of system, mathematical, hierarchical, and digital approaches ensures reproducibility, verifiability, and scalability of solutions. As a case study, the tourism logistics of the southern region of Kazakhstan is considered, where the hierarchical method serves as a universal mechanism for decomposing the global problem of flow distribution with subsequent coordination of local solutions. Formal formulations for optimizing the distribution of flows have been developed, algorithmic procedures (Lagrangian relaxation, coordination iterations) have been formulated, and comparisons with alternative methods (linear/integer programming, simulation modeling, dynamic programming, Monte Carlo methods, and multi-criteria optimization) have been performed. Special

attention is paid to the role of digital platforms in data integration, the use of IoT/Big Data for monitoring tourist flows, as well as taking into account the environmental capacity of territories. Additionally, the issues of transport accessibility of key tourist routes, the interaction of road and rail transportation, as well as the influence of seasonality on fluctuations in tourist demand are analyzed. The prospects of introducing intelligent transport systems that allow real-time adaptation of logistics solutions to changing conditions are being considered. The proposed solutions can serve as a basis for strategic planning, increasing the sustainability of the transport and logistics system and developing tourism in the face of global challenges. It is emphasized that an integrated approach to modeling not only improves the efficiency of flow management, but also ensures a balance between economic interests, tourist comfort and the preservation of the natural potential of the region.

Keywords: logistics system, hierarchical management, mathematical modeling, digitalization, sustainable development, transport infrastructure, tourist flows.

МРНТИ 73.01.77

https://doi.org/10.48081/FYNM5570

А. Ш. Оразымбетова[1], Г. С. Муханова[2], О. Г. Киселёва[3], *А. С. Избаирова[4], Альфонз Антони[5]

[1,2,3,4]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы;

[5]Будапешт Метрополитан университет, Венгрия, г. Будапешт

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1701-8659

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4985-4018

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1569-7731

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1727-7498

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5476-9144

*e-mail: ialiyas@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

В статье представлены результаты исследования процессов цифровизации в сфере транспортных услуг с акцентом на оценку уровня цифровой зрелости транспортно-логистических компаний Казахстана. Проведен систематический обзор литературы по данным базы Scopus, Web of Science и Science Direct, позволивший определить основные направления исследования в области логистики 4.0 и цифровой трансформации. На основе эмпирических данных, собранных методом анкетирования, выполнен анализ факторов, влияющих на цифровизацию транспортных компаний, включая размер предприятия, наличие цифровых технологий, барьеры внедрения, образовательные программы и цифровые компетенции сотрудников. Для выявления взаимосвязей между показателями использован корреляционный анализ, который позволил определить положительные и отрицательные зависимости различной силы. Результаты показали, что уровень цифровой зрелости формируется в результате комплексного взаимодействия технологических, организационных и человеческих факторов, а не зависит напрямую от масштабов компании. Цифровая трансформация в транспортно-логистической отрасли сопряжена с ростом сложности процессов и требует поддержки кадрового потенциала.

Научная новизна исследования заключается в выявлении ключевых корреляционных связей между барьерами цифровизации, компетенциями персонала и степенью внедрения технологий, что позволяет формировать практические рекомендации по развитию цифровой трансформации транспортно-логистической сферы Казахстана.

Ключевые слова: цифровизация, транспортные услуги, цифровая зрелость, логистика 4.0, цифровые компетенции, барьеры цифровизации, транспортно-логистические компании.

Введение

В условиях стремительного развития цифровых технологий и перехода мировой экономики к новой технологической парадигме, обозначаемой как Индустрия 4.0, сфера транспортных услуг претерпевает качественные трансформации. Концепция «Логистика 4.0» формируется как ответ на вызовы цифровизации, автоматизации и необходимости адаптации логистических цепей к условиям высокой динамики спроса, глобальных рисков и растущих требований к устойчивости и прозрачности.

В научной и прикладной литературе усиливается внимание к вопросам цифровой трансформации логистических процессов, интеграции киберфизических систем, применению интернета вещей, анализа больших данных, облачных платформ и цифровых двойников. Вместе с тем, несмотря на высокий темп публикационной активности, наблюдается фрагментарность и методологическая разрозненность исследований, отсутствие единых подходов к оценке зрелости логистики 4.0, а также нехватка эмпирических исследований в развивающихся странах.

Материалы и методы

Для изучения данной темы проведен системный обзор литературы (SLR) по теме оценки уровня цифровизации транспортных услуг, используя онлайн-базы данных, таких как Science Direct, Web of science, Scopus. Для поиска академических исследований использовалась поисковая система Google и следующие ключевые слова: «digital AND transformation, AND logistics, AND maturity AND model, AND industry 4.0» «digital AND technologies, AND digitization, AND digitalization, AND logistics».

Анализ 50 отобранных научных публикаций, посвященных вопросам внедрения цифровых технологий, позволил выявить ключевые направления развития, используемые методы исследований и существующие пробелы в научной литературе. Период охвата проанализированных публикаций составляет 2017–2024 годы и включает исследования как теоретико-методологического, так и прикладного характера, отражающие современные тенденции и направления развития цифровой трансформации транспортно-логистической сферы.

Наибольшая концентрация научных публикаций наблюдается в странах Европейского союза, таких как Германия, Италия, Венгрия [1–5]. Также имеются исследования, посвященные вопросам внедрения цифровых технологий, в Китае, Бразилии и Индии [6–8].

Германия занимает лидирующие позиции по количеству исследований, что объясняется ее ключевой ролью в формировании и развитии концепции Индустрия 4.0 [9–10]. В научных работах, выполненных в Бразилии и Индии, цифровизация логистики преимущественно рассматривается сквозь призму устойчивого развития и адаптации малых и средних предприятий к цифровым условиям. Публикации исследователей из стран Восточной Европы (в частности, Венгрии и Польши) сосредоточены на проблематике моделирования и оптимизации производственно-логистических систем, что отражает стремление к повышению эффективности и интеграции цифровых решений в процессы управления цепями поставок [11].

По результатам анализа содержания отобранных научных публикаций были идентифицированы ключевые направления исследовательской активности в области цифровой трансформации транспортно-логистических систем (рисунок 1).

Рисунок 1 – Основные направления научных исследований в области логистики 4.0, %

Наиболее распространенным направлением (около 60 % публикаций) является цифровизация логистических процессов, в рамках которой рассматриваются вопросы применения технологий Internet of Things (IoT), Big Data, облачных технологий и цифровых платформ для оптимизации складской, транспортной и распределительной логистики. Существенную долю (порядка 30 %) занимают исследования, посвященные интеллектуальным цепям поставок и обеспечению устойчивости, где акцент сделан на гибкости, прозрачности, адаптивности и устойчивом развитии логистических систем в условиях внешних рисков и дестабилизирующих факторов (в частности, пандемии COVID-19 и нарушений цепей поставок). Около 20 % работ относятся к направлению моделирования и симуляции, в которых применяются методы дискретно-событийного моделирования, технологии цифровых двойников и имитационные модели для оценки эффективности логистических решений. Наконец, порядка 40 % исследований посвящены интеграции технологий Индустрии 4.0, где анализируются взаимосвязи между логистическими и производственными системами, платформенными архитектурами управления и стандартами обмена данными в контексте образования логистических экосистем.

Проведенный анализ выявил значительное разнообразие методологических подходов, используемых в современных научных исследованиях по проблематике цифровизации транспортно-логистических систем (рисунок 2).

К числу наиболее распространенных типов исследований относятся:

– теоретико-обзорные работы, направленные на систематизацию понятийного аппарата и интерпретацию ключевых концепций логистики 4.0;

– кейс-стади, представляющие собой эмпирические исследования, основанные на анализе реальных примеров внедрения цифровых технологий в деятельность транспортно-логистических компаний, что позволяет выявить практические эффекты и типовые проблемы цифровизации;

– методологические и концептуальные исследования, предлагающие авторские рамочные модели оценки цифровой зрелости логистики 4.0, систему индикаторов цифровой трансформации, а также архитектуры киберфизических логистических систем;

– исследования, основанные на моделировании и симуляции, включающие разработку количественных моделей, цифровых двойников и мультиагентных систем для оценки эффективности управленческих решений;

– опросные и анкетные исследования на выявление барьеров, драйверов и институциональных факторов, влияющих на процессы цифровизации, по оценкам экспертов и практиков отрасли;

– обзорные и библиометрические исследования, направленные на анализ динамики публикационной активности, структурных тенденций и географического распределения научных работ в сфере транспортных услуг и логистики 4.0.

Рисунок 2 – Структура методологических подходов в современных исследованиях цифровизации транспортных услуг

Обзор научных публикаций позволил уточнить научно-проблемное поле и определиться с формулировкой цели настоящего исследования, которая

заключается в комплексном анализе процессов цифровой трансформации транспортных услуг, оценке уровня цифровой зрелости транспортно-логистических компаний и выявлении факторов, влияющих на эффективность и устойчивость развития отрасли в условиях внедрения технологий Индустрии 4.0.

В качестве эмпирической базы исследования были выбраны транспортно-логистические компании, функционирующие на территории Республики Казахстан. Среди работников указанные предприятий проведено анкетирование, позволившее собрать репрезентативные данные о степени внедрения цифровых технологий, уровне компетенций и существующих барьерах цифровизации. На основе полученных результатов выполнена оценка текущего состояния рынка транспортных услуг с применением статистических методов анализа, что обеспечило возможность количественной интерпретации выявленных тенденций и факторов, определяющих уровень цифровой зрелости предприятий отрасли.

В качестве факторных переменных (X), влияющих на уровень цифровой зрелости предприятий, выделены:

Размер предприятия – категориальная переменная, закодированная численно от 1 до 3 (малое, среднее, крупное).

Отраслевая принадлежность – для транспортно-логистических компаний принята категория «2».

Наличие цифровых технологий – количественный показатель, отражающий внедрение до восьми различных цифровых решений (ERP, CRM, IoT, искусственный интеллект и др.).

Барьеры цифровизации – интегральная переменная, включающая до пяти ограничивающих факторов (высокая стоимость внедрения, дефицит специалистов, сопротивление изменениям и др.).

Наличие образовательных программ – бинарная переменная (1 = обучение реализуется, 0 = обучение отсутствует).

Цифровые компетенции сотрудников – показатель от 1 до 7, характеризующий спектр владения современными цифровыми навыками (от базовой компьютерной грамотности до взаимодействия с искусственным интеллектом).

В качестве результативной переменной (Y) рассматривается уровень цифровой зрелости предприятия, классифицированный по трехуровневой шкале:

1 – начальный уровень (цифровизация планируется, но не внедрена);

2 – средний уровень (частичная интеграция цифровых решений);

3 – высокий уровень (комплексное использование цифровых технологий).

Исходными данными для исследования являются данные анкетирования в 24 транспортно-логистических компаниях, результаты которого представлены ниже по следующим показателям.

Количественный состав по географическому расположению предприятий. Наибольшая концентрация приходиться на город Актобе составляет 29,2 % от общей выборки. К числу регионов со средними значениями относятся Актау (16,6 %) и Астана, Алматы, Алматинская область по 12,5 %. Низкую долю

демонстрируют такие населенные пункты, как Кызыл-Орда (8,3 %), Петропавловск (4,2 %), Шымкент (4,2 %).

Размер предприятий. В выборке доминируют малые предприятия (37,5 %), что отражает общую тенденцию высокой численности малых организаций в структуре современного бизнеса. Средние предприятия имеют наименьший удельный вес (29,2 %), что соответствует реальным структурным характеристикам сектора, где средний бизнес уступает по численности, как малым, так и крупным компаниям. Крупные предприятия занимают почти равный удельный вес (33,3 %), что указывает на заметное присутствие крупных компаний в транспортно-логистической отрасли.

Таким образом, выявляется сбалансированное распределение между малым, средним и крупным бизнесом с незначительным преобладанием малых предприятий. Данная структура рассматривается как индикатор диверсифицированного развития корпоративного сектора, где каждая группа компаний выполняет специфическую роль: малые предприятия – источник гибкости и инноваций, средние – стабилизирующий элемент, крупные – драйверы масштабных проектов и инвестиций.

Внедрение цифровых технологий на предприятиях. Основным направлением цифровизации транспортно-логистических компаний является внедрение ERP-систем (70,8 %), это их универсальность и значимость для комплексной автоматизации управления ресурсами, планирования и контроля бизнес-процессов. На втором месте по внедрению цифровых технологий находятся CRM-системы (20,8 %), что отражает возросшее внимание организаций к управлению взаимоотношениями с клиентами и повышению качества обслуживания. Применение IoT и технологий искусственного интеллекта (по 4,2 % каждая) носит единичный характер, связано с высокой стоимостью внедрения, необходимостью специализированных компетенций, а также с тем, что подобные технологии чаще востребованы в высокотехнологичных и капиталоемких отраслях.

Цифровизация в транспотно-логистических компаниях носит базовый и прикладной характер, ориентируясь преимущественно на ERP и CRM-решения. Использование более инновационных технологий (AI, IoT) ограничено, что указывает на перспективные направления дальнейшего развития цифровой трансформации.

Барьеры, препятствующие цифровизации. Подавляющее большинство транспортно-логистических компаний (75 %) сталкиваются только с одним доминирующим препятствием цифровизации – высокая стоимость внедрения. 20,8 % транспортно-логистических компаний испытывают комплексное влияние сразу трех барьеров, что указывает на системные проблемы цифровой трансформации, это наложение финансовых, организационных и кадровых трудностей, что существенно замедляет процесс цифровизации. 4,2 % транспортно-логистических компаний не испытывают никаких ограничений, что подтверждает

наличие благоприятной цифровой экосистемы: достаточного финансирования, стратегического планирования и кадрового потенциала.

5. Наличие образовательных программ или программ повышения квалификации. Транспортно-логистические компании, вошедшие в выборку (87,5 %), располагают образовательными программами и программами повышения квалификации. Такой показатель свидетельствует о высокой степени институционализации процессов непрерывного обучения и развитии человеческого капитала. Наличие образовательных программ и программ повышения квалификации в транспортно-логистических компаниях отражает стратегическую ориентацию компаний на формирование компетентностного потенциала сотрудников, что, в свою очередь, повышает их адаптивность к цифровым и технологическим трансформациям.

6. Цифровые компетенции сотрудников. Базовым уровнем цифровых компетенций владеет большинство сотрудников (58,3 %), указали компьютерную грамотность (использование облачных сервисов, офисных приложений, электронной почты). Этим подтверждается то, что фундаментальные цифровые навыки являются наиболее распространенными и обязательными для современного рабочего процесса. Более специализированные компетенции, такие как умение читать цифровые чертежи, работать со станками с ЧПУ и выполнять сбор и анализ данных, встречаются значительно реже (по 12,5 % каждая), что отражает их нишевый характер и связь с конкретными профессиональными задачами. Наименее распространенной компетенцией оказалось знание и применение цифровых двойников (4,2 %), что указывает на ограниченное внедрение передовых технологий в практику компаний.

Уровень цифровизации. Уровень цифровой зрелости транспортно-логистических компаний показывает, что подавляющее большинство организаций находятся на ранних и промежуточных стадиях цифровой трансформации. 41,7 % респондентов указали на начальный уровень цифровизации, что означает ограниченность текущих практик и преимущественную ориентацию на планы внедрения цифровых технологий. 37,5 % транспортно-логистических компаний находятся на среднем уровне, что отражает частичное применение цифровых решений в операционной деятельности. Этот показатель свидетельствует о постепенном переходе транспортно-логистических компаний от экспериментальных к более системным формам цифровизации. 20,8 % транспортно-логистических компаний достигли высокого уровня цифровой зрелости, характеризующегося активным использованием цифровых технологий в бизнес-процессах. Несмотря на относительную ограниченность данной группы, их опыт это ориентир для формирования лучших практик цифровой трансформации.

Результаты и обсуждения

Современные условия цифровой трансформации транспортно-логистической отрасли требуют анализа взаимосвязей между ключевыми факторами цифровизации. Для этого был проведен корреляционный анализ, включающий шесть переменных: размер предприятия, внедренные цифровые технологии,

барьеры цифровизации, цифровые компетенции сотрудников, образовательные программы и цифровая зрелость предприятия (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа по транспортно-логистическим компаниям

	1	1	3	1	1	1
1	1					
1	0,240372	1				
3	0,221575	0,628622	1			
1	-0,20925	0,399096	0,360647	1		
1	0,299305	0,218565	0,30716	-0,30804	1	
1	0,058562	0,129043	-0,12674	0,057519	-0,2583	1

Рассчитанная матрица корреляций позволяет выявить как положительные, так и отрицательные связи различной силы между исследуемыми переменными.

Результаты корреляционного анализа цифровой зрелости транспортно-логистических компаний представлены в таблице 2, где значения коэффициентов корелляции упорядоточены в диапазоне от максимально положительных до наиболее отрицательных значений, что позволяет наглядно проследить направление и силу взаимосвязей между исследуемыми показателями.

Таблица 2 – Результаты корреляционного анализа цифровой зрелости транспортно-логистических компаний

Пары переменных цифровой трансформации компаний	Коэффициент корреляции r	Характеристика связи между переменными
Цифровые технологии – Барьеры цифровизации	0,629	Наиболее выраженная положительная корреляция. Увеличение числа внедрённых технологий сопровождается ростом воспринимаемых барьеров, что подтверждает сложность цифровой трансформации в отрасли.
Цифровые технологии – Цифровые компетенции	0,399	Корреляция умеренной силы указывает на необходимость повышения кадрового потенциала для успешной цифровизации.
Барьеры цифровизации – Цифровые компетенции	0,361	Умеренная положительная связь показывает, что рост числа барьеров стимулирует компании активнее развивать цифровые навыки персонала.
Барьеры цифровизации – Образовательные программы	0,307	Умеренная положительная связь подтверждает компенсаторную роль обучения при возникновении организационных и технических сложностей.
Размер предприятия – Образователь-ные программы	0,299	Слабая положительная корреляция свидетельствует о том, что крупные предприятия чаще реализуют обучающие инициативы.
Размер предприятия – Цифровые технологии	0,240	Слабая положительная корреляция свидетельствует о том, что крупные компании имеют больше возможностей для внедрения цифровых решений. Однако низкая сила связи указывает на наличие дополнительных факторов, определяющих уровень цифровизации.

Цифровые технологии – Цифровая зрелость	0,129	Очень слабая положительная корреляция указывает на то, что само наличие технологий не гарантирует зрелости без их интеграции.
Размер предприятия – Цифровая зрелость	0,059	Практически отсутствует взаимосвязь: масштаб компании не определяет уровень цифровой зрелости.
Цифровые компетенции – Цифровая зрелость	0,058	Практически отсутствует связь, что может быть связано с недостаточной системностью управления компетенциями.
Барьеры цифровизации – Цифровая зрелость	-0,127	Слабая отрицательная корреляция демонстрирует, что наличие барьеров ограничивает, но некритически тормозит развитие зрелости.
Размер предприятия – Цифровые компетенции	-0,209	Слабая отрицательная корреляция демонстрирует, что крупные компании не всегда обеспечивают высокий уровень цифровых навыков работников.
Образовательные программы – Цифровая зрелость	-0,258	Негативная слабая корреляция подтверждает низкую результативность существующих форм обучения для повышения уровня зрелости.
Цифровые компетенции – Образовательные программы	-0,308	Отрицательная корреляция средней силы указывает на формальный характер многих программ, которые не всегда приводят к росту компетенций.

Наиболее выраженные зависимости выявлены между внедренными технологиями и барьерами цифровизации (r = 0,629), а также между технологиями и цифровыми компетенциями сотрудников (r = 0,399). Это подтверждает, что цифровая трансформация в транспортно-логистической отрасли сопряжена с ростом сложности процессов и требует поддержки кадрового потенциала.

Отрицательные корреляции (образовательные программы ↔ компетенции, образовательные программы ↔ зрелость) указывают на недостаточную эффективность существующих обучающих инициатив.

Размер предприятия играет ограниченную роль: он слабо связан с образовательными программами (r = 0,299), и практически не влияет на цифровую зрелость (r = 0,059).

В результате анализа полученных корреляционных зависимостей можно заключить, что уровень цифровой зрелости транспортно-логистических компаний формируется не под влиянием одного фактора, а является результатом комплексного взаимодействия технологий, барьеров и кадровых компетенций. Отдельно следует выделить, что человеческий капитал выступает универсальным фактором цифровой трансформации, что подчеркивает важность разработки отраслевых моделей компетенций, учитывающих специфику производственных процессов и реальную интеграцию цифровых технологий.

Результаты сравнительного анализа также показывают, что уровень цифровой зрелости транспортно-логистического сектора Казахстана находится на стадии активного формирования и характеризуется преобладанием базовых и частично интегрированных цифровых решений (ERP-, CRM-системы, элементы автоматизации документооборота). В отличие от этого, Германия демонстрирует высокую степень цифровой интеграции, где логистические процессы основаны

на принципах киберфизических систем, цифровых двойников и платформенной экосистемы Логистика 4.0. Китай развивает цифровизацию в тесной связке с государственными стратегиями, уделяя приоритетное внимание искусственному интеллекту, интернету вещей и интеллектуальным транспортным системам. Индия, напротив, концентрируется на адаптации цифровых решений для малых и средних предприятий, акцентирую внимание на устойчивости и снижении транзакционных издержек.

Таким образом, предприятия транспортно-логистического сектора в Казахстане в настоящее время демонстрируют средний уровень цифровой зрелости, при котором наблюдается технологическое развитие без системной интеграции сквозных инноваций. Основными ограничивающими факторами выступают дефицит квалифицированных кадров, высокая стоимость внедрения технологий и недостаточная институциональная поддержка.

Информация о финансировании

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по программе BR27198643 «Развитие цифровых компетенций человеческого капитала в промышленности и логистике через кластерное взаимодействие науки, образования и индустрии». Авторы выражают признательность за предоставленную поддержку, которая сыграла существенную роль в развитии научных исследований и практических подходов, направленных на углубление процессов цифровой трансформации в области логистики и транспортных систем.

Выводы

Формирование национального цифрового профиля транспортно-логистической отрасли требует комплексных мер, направленных на ускорение технологической модернизации, развитие человеческого капитала и создание цифровой инфраструктуры взаимодействия между участниками логистических цепей. Это позволит не только сократить разрыв с технологическими лидерами, но и обеспечить устойчивую интеграцию Казахстана в глобальные цифровые транспортно-логистические сети.

REFERENCES

1 **Eber, R., Schwarzer, S.** Toolbox for efficient implementation of digitalization in logistics // Procedia CIRP. – 2024. – Vol. 130. – P. 701–704. – https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.151

2 **Radicic, D., Petković, S.** Impact of digitalization on technological innovations in small and medium-sized enterprises (SMEs) // Technological Forecasting and Social Change. – 2023. – Vol. 191. – Article ID: 122474. – https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122474

3 **Facchini, F., Oleskow-Szlapka, J., Ranieri, L., Urbinati, A.** A maturity model for logistics 4.0: an empirical analysis and a roadmap for future research // Sustainability. – 2019. – Vol. 12. – P. 86. – https://doi.org/10.3390/su12010086

4 **Latino, M.** A maturity model for assessing the implementation of Industry 5.0 in manufacturing SMEs: learning from theory and practice // Technological Forecasting and Social Change. – 2025. – Vol. 214. – P. 124045. – https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124045

5 **De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., Terzi, S.** A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies // In: Advances in Production Management Systems (APMS 2017). – 2017. – P. 13–20. – ISBN 978-3-319-66922-9. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_2

6 **Wei, J., Shen, Y.** Impact and mechanism of digital transformation on performance in manufacturing firms // Innovation and Green Development. – 2025. – Vol. 4, iss. 1. – Article ID: 100205. – https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100205

7 **Schumacher, A., Nemeth, T., Sihn, W.** Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 79. – P. 409–414. – https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.110

8 **Khan, S., Singh, R., Sá, J.C., Santos, G., Ferreira, L. P.** Modelling of determinants of Logistics 4.0 adoption : insights from developing countries // Machines. – 2022. – Vol. 10. – iss. 12. – P. 1242. – https://doi.org/10.3390/machines10121242

9 **Soto Setzke, D., Riasanow, T., Böhm, M., Krcmar, H.** Pathways to digital service innovation: the role of digital transformation strategies in established organizations // Information Systems Frontiers. – 2021. – Vol. 25. – https://doi.org/10.1007/s10796-021-10112-0

10 **Asdecker, B., Felch, V.** Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains // Journal of Modelling in Management. – 2018. – Vol. 13. – P. 840–883. – https://doi.org/10.1108/JM2-03-2018-0042

11 **Tubis, A., Koliński, A., Poturaj, H.** Digital maturity of logistics processes assessed in the areas of technological support for performance measurement, employees, and process management // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – P. 7893. – https://doi.org/10.3390/app14177893

Поступило в редакцию 02.11.25.
Поступило с исправлениями 02.11.25.
Принято в печать 17.11.25.

А. Ш. Оразымбетова[1], Г. С. Муханова[2], О. Г. Киселёва[3],
****А. С. Избаирова[4], Альфонз Антони[5]***
[1,2,3,4]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[5]Будапешт Метрополитан университет, Венгрия, Будапешт қ.
02.11.25 ж. баспаға түсті.
02.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
17.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ИНДУСТРИЯ 4.0 ЖАҒДАЙЫНДА КӨЛІКТІК-ЛОГИСТИКАЛЫҚ КОМПАНИЯЛАРДЫҢ ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Мақалада көлік қызметтері саласындағы цифрландыру үдерістерін зерттеу нәтижелері келтірілген, мұнда Қазақстанның көліктік-логистикалық компанияларының цифрлық жетілу деңгейін бағалауға назар аударылған. Scopus, Web of Science және Science Direct дерекқорлары бойынша жүргізілген жүйелі әдеби шолу логистика 4.0 және цифрлық трансформация саласындағы негізгі зерттеу бағыттарын айқындауға мүмкіндік берді. Сауалнама әдісі арқылы жиналған эмпирикалық деректер негізінде көліктік компаниялардың цифрландыруына әсер ететін факторлар, соның ішінде кәсіпорынның көлемі, цифрлық технологиялардың қолданылуы, енгізу кедергілері, білім беру бағдарламалары мен қызметкерлердің цифрлық құзыреттері талданды. Көрсеткіштер арасындағы өзара байланыстарды анықтау үшін корреляциялық талдау қолданылып, әртүрлі оң және теріс тәуелділіктер айқындалды. Зерттеу нәтижелері компанияның цифрландырылу деңгейі оның ауқымына тікелей тәуелсіз екенін, ол технологиялық, ұйымдастырушылық және адами факторлардың кешенді өзара әрекеттесуі нәтижесінде қалыптасатынын көрсетті. Көлік-логистика саласындағы цифрлық трансформация процестердің күрделілігінің өсуімен ұштасады және кадрлық әлеуетті қолдауды талап етеді.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы цифрландыру кедергілері, кадрлардың құзыреттері мен технологияларды енгізу дәрежесі арасындағы негізгі корреляциялық байланыстарды анықтауда болып табылады, бұл Қазақстанның көліктік логистика саласында цифрлық трансформацияны дамыту бойынша практикалық ұсынымдар қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: цифрландыру, көлік қызметтері, цифрлық жетілу, логистика 4.0, цифрлық құзыреттер, цифрландыру кедергілері, көлік-логистика компаниялары.

A. Sh. Orazymbetova[1], G. S. Mukhanova[2], O. G. Kisselyova[3],
****A. S. Izbairova[4], Alfonz Antoni[5]***
[1,2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[5]Budapest Metropolitan University, Hungary, Budapest.
Received 02.11.25.
Received in revised form 02.11.25.
Accepted for publication 17.11.25.

STUDY OF THE DIGITAL TRANSFORMATION OF TRANSPORT AND LOGISTICS COMPANIES IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

The article presents the results of a study on the digitalization processes in the field of transport services, focusing on the assessment of the digital maturity level of transport and logistics companies in Kazakhstan. A systematic literature review based on the Scopus, Web of Science, and Science Direct databases was conducted, which made it possible to identify the main research directions in the field of Logistics 4.0 and digital transformation. Based on empirical data collected through a survey, an analysis was carried out of the factors influencing the digitalization of transport companies, including enterprise size, availability of digital technologies, implementation barriers, educational programs, and employees' digital competencies. Correlation analysis was applied to identify relationships between the indicators, which revealed both positive and negative dependencies of varying strength. The results showed that the level of digital maturity is formed as a result of the complex interaction of technological, organizational, and human factors rather than being directly dependent on the size of the company. Digital transformation in the transport and logistics industry is associated with an increase in the complexity of processes and requires the support of human resources.

The scientific novelty of the study lies in identifying key correlations between digitalization barriers, staff competencies, and the degree of technology implementation, which enables the development of practical recommendations for advancing digital transformation in Kazakhstan's transport and logistics sector.

Keywords: digitalization, transport services, digital maturity, Logistics 4.0, digital competencies, digitalization barriers, transport and logistics companies.

МРНТИ 73.29.17

https://doi.org/10.48081/COBQ8854

***Ж. Е. Шукаманов[1], Г. А. Сулейменова[2]**

[1]Таразский университет имени М. Х. Дулати, Республика Казахстан, г. Тараз;
[2]ALT университет имени М. Тынышбаева, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3017-7133
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7099-8441
*e-mail: shukamanov@bk.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИСТЕМ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА РАЗВИТИЕ ТРАНЗИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА КАЗАХСТАНА

В условиях растущей значимости Транскаспийского международного транспортного маршрута (ТМТМ) особую актуальность приобретает модернизация систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП) на казахстанской железнодорожной сети. В статье проведён комплексный анализ существующих видов ИРДП, включая полуавтоматическую блокировку, различные формы автоблокировки (кодовая, импульсно-проводная, автоматическая локомотивная сигнализация как самостоятельное средство), а также перспективные системы ИРДП функционирующие на базе радиоканала. На основе официальной статистики и визуализации данных показано преобладание устаревших технологий на ключевых транзитных направлениях, в том числе участках ТМТМ. Выявлены проблемные зоны, в том числе высокая доля однопутных участков и использование полуавтоматической блокировки, что ограничивает пропускную способность. В работе подчёркивается стратегическая важность перехода к цифровым системам управления движением и системам ИРДП на базе радиоканала. Особое внимание уделено государственной политике в области железнодорожной модернизации, включая инициативы по расширению и строительству новых участков. Представленные результаты могут служить обоснованием для приоритетного технического переоснащения участков, имеющих критическое значение для транзитных потоков, и могут использоваться при разработке дорожных карт цифровой трансформации отрасли.

Ключевые слова: интервальное регулирование, полуавтоматическая блокировка, автоблокировка, радиоблокировка, Транскаспийский маршрут, пропускная способность.

Введение

В условиях роста объёмов международных и внутриреспубликанских перевозок на железнодорожном транспорте Республики Казахстан всё более важное значение приобретает эффективное управление движением поездов. Ключевым элементом в обеспечении безопасности, ритмичности и высокой пропускной способности магистралей является система интервального регулирования движения поездов (ИРДП). Эти системы определяют минимально допустимые интервалы между

поездами, регулируют поступательное движение подвижного состава и минимизируют риски столкновений, простоев и несоответствия графику [1].

Интервальное регулирование представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий и средств сигнализации, позволяющих осуществлять последовательное движение поездов с соблюдением заданного временного или пространственного интервала. Эффективная система ИРДП позволяет:

– повышать пропускную способность без капитальной перестройки инфраструктуры;

– снижать вероятность аварийных ситуаций;

– поддерживать оптимальную частоту движения при различной плотности трафика;

– адаптироваться к различным условиям эксплуатации – от малодеятельных региональных линий до перегруженных транзитных коридоров [2].

В железнодорожной сети Казахстана применяются различные типы ИРДП, отличающиеся по принципу действия, степени автоматизации, требуемой инфраструктуре и эксплуатационным характеристикам. Все существующие системы интервального регулирования можно классифицировать на три основные группы, каждая из которых соответствует определённому техническому и историческому этапу развития железнодорожной автоматики:

1 Полуавтоматическая блокировка (ПАБ) – это одна из наиболее ранних и простых форм ИРДП, при которой регулирование движения осуществляется вручную: дежурные по станциям передают разрешение на отправление следующему поезду по телефону, радиосвязи или с помощью электромеханических устройств. ПАБ преимущественно используется на однопутных, малодеятельных участках в отдалённых регионах. Несмотря на простоту и низкую стоимость внедрения, система характеризуется следующими недостатками:

– высокая зависимость от человеческого фактора;

– ограниченная пропускная способность;

– невозможность быстрой адаптации к нештатным ситуациям.

Тем не менее, полуавтоматическая блокировка продолжает использоваться на значительной части железнодорожной сети, особенно на малодеятельных участках. В настоящее время наблюдается постепенный переход от классической релейной ПАБ к её микропроцессорным версиям, при этом основной целью модернизации является не увеличение пропускной способности, а снижение затрат времени и ресурсов на техническое обслуживание устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) [3].

2 Автоблокировка (АБ) – это система интервального регулирования, которая обеспечивает автоматическое занятие и освобождение блок-участков по факту прохода поезда, без участия дежурных по станциям или постам. Она реализуется за счёт устройств рельсовых цепей и автоматических светофоров, которые реагируют на присутствие подвижного состава на перегоне. Такая система обеспечивает непрерывный контроль занятости путей и значительно сокращает

минимально допустимые интервалы между поездами. Автоблокировка является основой для организации интенсивного движения на двухпутных и многопутных направлениях с высокой нагрузкой, особенно вблизи крупных железнодорожных узлов, промышленных центров и в международных коридорах.

На железных дорогах Казахстана в настоящее время применяются следующие разновидности автоблокировки:

– кодовая автоблокировка – наиболее распространённый тип, при котором сигналы передаются в виде частотных кодов по рельсовым цепям непосредственно в кабину машиниста. Кодовая система реализуется в двух формах: релейная – с использованием электромеханических реле (классическое исполнение); электронная (КЭБ) – на основе микропроцессорных систем, обеспечивающих повышенную надёжность и расширенные диагностические возможности.

– импульсно-проводная автоблокировка – система, при которой управление сигналами и передача информации осуществляется по кабелям, проложенным вдоль пути. Используется на ряде участков, преимущественно в сложных климатических и топографических условиях;

– централизованная автоблокировка (ЦАБ) с автоматической локомотивной сигнализацией (АЛСН), применяемой в качестве самостоятельного средства интервального регулирования. В этом случае управление движением осуществляется без внешних светофоров – информация о состоянии пути, сигналы и команды отображаются непосредственно на локомотивном табло, а сами сигналы передаются по рельсовым цепям. Такая система особенно эффективна на двухпутных участках с высокой интенсивностью движения, снижает зависимость от внешней инфраструктуры и повышает устойчивость к сбоям.

Применение перечисленных технологий позволяет адаптировать систему регулирования под различную инфраструктуру и эксплуатационные задачи, обеспечивая безопасное и ритмичное движение поездов в условиях высокой нагрузки [4].

3 Системы интервального регулирования на базе радиоканала (СИРДП-Е) представляют собой наиболее перспективное направление в развитии технологий управления движением поездов. В отличие от традиционных схем, эти системы не требуют физического деления линии на блок-участки, а управление осуществляется в реальном времени на основе непрерывного обмена информацией между поездом и центром управления по цифровому радиоканалу. Это позволяет значительно сократить межпоездные интервалы, повысить гибкость и адаптивность системы регулирования, а также улучшить безопасность.

Актуальность исследования усиливается в контексте реализации стратегических инициатив, связанных с развитием Транскаспийского международного транспортного маршрута (ТМТМ или Middle Corridor) – ключевого транзитного коридора, соединяющего Китай, Казахстан, акваторию Каспийского моря, Азербайджан, Грузию, Турцию и далее страны Европы. Этот маршрут представляет собой альтернативу северному направлению через Россию

и приобретает особое значение в условиях геополитической турбулентности и необходимости диверсификации логистических цепочек (Рисунок 1).

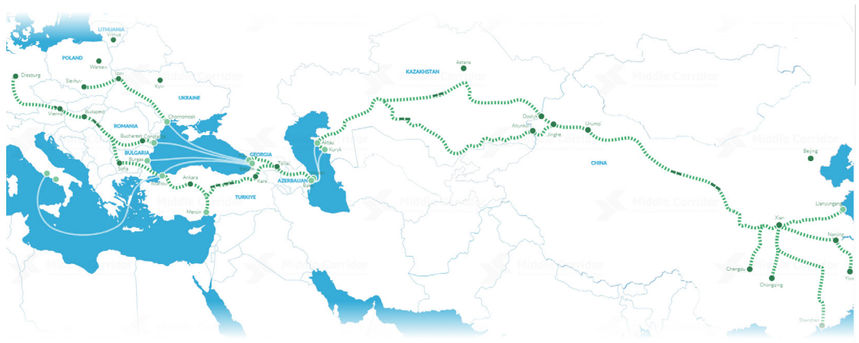


Рисунок 1 – Визуальный маршрут железнодорожного транспорта ТМТМ

Пропускная способность и стабильность перевозочного процесса на казахстанском участке ТМТМ напрямую зависят от состояния и эффективности систем интервального регулирования движения поездов. Без модернизации ИРДП невозможно достичь целевых показателей по скорости, ритмичности и надёжности транзита. В условиях увеличивающегося грузопотока и растущих требований к цифровизации транспортной инфраструктуры именно совершенствование технологий управления движением становится одним из ключевых условий конкурентоспособности казахстанской железнодорожной сети в составе ТМТМ [5].

В мировой практике накоплен богатый опыт организации интервального регулирования движения поездов, который может быть полезен для Казахстана. В странах Европейского союза базовым ориентиром является система ERTMS/ETCS, предусматривающая переход от фиксированных блоков и путевых светофоров к кабельной сигнализации и радиоканалу, управляемому через Radio Block Centre (RBC), это позволяет значительно сокращать межпоездные интервалы. Китай реализует схожую иерархическую систему CTCS (Chinese Train Control System), где уровни CTCS-2/3 функционально соответствуют ETCS Level 1/2, а перспективный CTCS-4 ориентирован на технологию «moving block». На уровне внутрипоездной связи во многих странах используется стандарт TCN (Train Communication Network), включающий подсети MVB и WTB, обеспечивающие надежный обмен данными между подсистемами поезда и взаимодействие с системами сигнализации. Учет опыта внедрения ETCS, CTCS и TCN позволяет сопоставить отечественные решения с международными уровнями и более обоснованно оценить потенциал роста пропускной способности казахстанской железнодорожной сети. Сравнение систем интервального регулирования в Казахстане и международных аналогов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение систем интервального регулирования в Казахстане и международных аналогов

СИРДП в Казахстане	Зарубежный аналог	Характеристика
Полуавтоматическая блокировка	Прямых аналогов нет (устаревшие методы)	Ручная передача разрешений, высокая зависимость от человеческого фактора
Автоматическая блокировка	ETCS Level 1, CTCS-2/3	Фиксированные блоки, путевые светофоры, сокращение интервалов до 7-10 мин
Радиоблокировка	ETCS Level 2/3, CTCS-4	Виртуальные блоки, управление через Radio Block Centre по радиоканалу, минимизация интервала (3-5 мин)
Внутрипоездная связь (нет отдельного стандарта в РК)	TCN (Train Communication Network)	Обеспечивает обмен данными между подсистемами поезда, интеграцию с ATP/ATO

Таким образом, представленное сопоставление позволяет обоснованно оценить текущее положение Казахстана и определить направления модернизации с учётом лучших международных практик.

Материалы и методы

Общая протяжённость железнодорожной сети Казахстана составляет более 15 000 км, из которых 13 562 км оборудованы системами интервального регулирования движения поездов (ИРДП). Из этого объёма 9 120 км приходится на однопутные участки, а 4 442 км – на двухпутные (Рисунок 2).

Рисунок 2 – Доля однопутных и двухпутных участков оборудованных СИРДП

Несмотря на меньшую протяжённость, двухпутные участки обеспечивают значительно более высокую пропускную способность благодаря возможности одновременного движения поездов в обоих направлениях и большей гибкости в организации графика. В то время как однопутные линии требуют строгой координации встречных маршрутов и подвержены возникновению инфраструктурных ограничений, снижающих устойчивость перевозочного

процесса, двухпутные участки позволяют реализовать более плотные интервалы, сократить количество задержек и повысить ритмичность движения. На казахстанской части Транскаспийского международного транспортного маршрута (ТМТМ) доминирование однопутных участков остаётся основным сдерживающим фактором, ограничивающим пропускную способность и развитие транзитного потенциала. В этой связи модернизация однопутной инфраструктуры и внедрение современных систем ИРДП рассматриваются как приоритетные меры для обеспечения эффективности транспортного коридора.

Одним из ключевых индикаторов технологической зрелости железнодорожной инфраструктуры является уровень оснащённости системами интервального регулирования движения поездов (ИРДП). На железных дорогах Казахстана, по данным АО «Национальная компания «Қазақстан темір жолы», протяжённость участков, оборудованных такими системами, составляет 13 562 км. В структуре применяемых решений наибольший удельный вес занимает автоматическая блокировка (АБ), охватывающая 9 459 км, что составляет примерно 67,4 % всех участков с ИРДП. АБ обеспечивает автоматическое занятие и освобождение блок-участков без участия дежурных по станции, что существенно снижает влияние человеческого фактора и повышает пропускную способность по сравнению с устаревшими методами регулирования.

Полуавтоматическая блокировка (ПАБ) по-прежнему широко используется на малонаселённых и низконагруженных линиях, особенно в регионах с ограниченными ресурсами. Её общая протяжённость составляет 3 254 км (23,2 %), что всё ещё является существенной долей, учитывая ограниченную эффективность ПАБ в условиях возрастающих требований к транзиту, особенно в контексте развития международных коридоров. В современных условиях такая система требует либо модернизации (в том числе перевода на микропроцессорные технологии), либо поэтапного вытеснения более совершенными методами.

В то же время системы интервального регулирования на базе радиоканала (СИРДП-Е), включающие такие технологии как GSM-R, TETRA и перспективный FRMCS, только начинают внедряться. Их потенциал связан с возможностью сквозного управления движением поездов в реальном времени без необходимости деления на физические блок-участки [6]. Однако их распространённость пока невелика – 849 км, или около 6,0 % от всей протяжённости участков с ИРДП. Основные пилотные внедрения СИРДП зафиксированы на участках, входящих в состав Транскаспийского международного транспортного маршрута (ТМТМ), а также вблизи крупных узловых станций и на подходах к портам.

Таким образом, доминирование АБ, ограниченность применения ПАБ и точечное внедрение СИРДП определяют текущую конфигурацию систем интервального регулирования в Казахстане. Это соотношение, представленное на рисунке 3, является важным фактором при оценке пропускной способности, планировании модернизации и развитии транзитного потенциала страны.

Рисунок 3 – Пропорциональное соотношение между типами ИРДП на железных дорогах Казахстана

Автоматическая блокировка (АБ) представляет собой наиболее широко применяемую систему интервального регулирования движения поездов в Казахстане, охватывающую более 9 459 км железнодорожной сети (Рисунок 4). Принцип её действия заключается в автоматическом занятии и освобождении блок-участков без участия оперативного персонала, что позволяет существенно повысить пропускную способность и надёжность перевозочного процесса. В зависимости от технических решений, используемых для формирования и передачи сигнальной информации, в структуре АБ различают несколько разновидностей.

На территории Казахстана реализованы следующие виды автоматической блокировки:

– кодовая автоблокировка – наиболее распространённый тип, использующий импульсные электрические токи определённой частоты и кода, передаваемые по рельсовым цепям. Такая система обеспечивает высокую устойчивость к внешним помехам и позволяет интегрировать систему автоматического локомотивного сигнализации (АЛСН), что повышает безопасность движения. Общая протяжённость участков с кодовой АБ составляет 5 645 км.;

– импульсно-проводная автоблокировка – использует последовательность импульсов в низкочастотных рельсовых цепях. Применяется преимущественно на старых участках железной дороги, сохраняющих работоспособность без необходимости капитальной модернизации. Её доля составляет 2 535 км.;

– автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС) как самостоятельное средство организации интервального регулирования –используется на отдельных направлениях как автономное средство, обеспечивающее машинисту информацию о занятости впереди идущего участка через кабину локомотива. Такой подход

позволяет отказаться от внешней световой сигнализации. Общая протяжённость участков, где АЛС функционирует как самостоятельная система ИРДП, составляет 1 279 км.

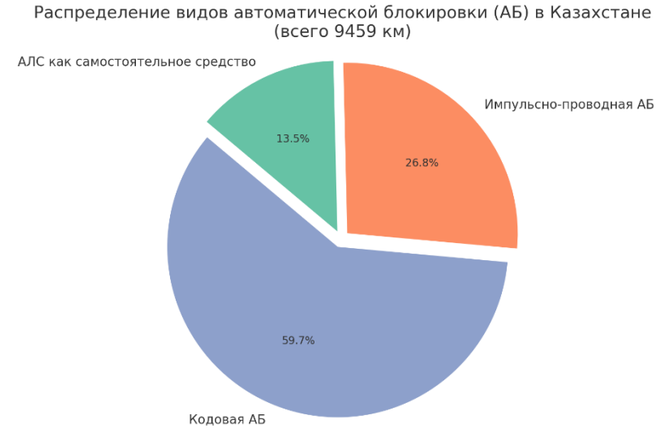


Рисунок 4 – Пропорциональное соотношение между видами систем автоблокировки

Таким образом, внутренняя структура автоматической блокировки в Казахстане включает несколько технологических решений, каждое из которых имеет свою сферу применения, обусловленную техническим состоянием инфраструктуры, требованиями к безопасности и уровнем интенсивности движения. Разнообразие форм АБ позволяет обеспечить гибкое регулирование движения как на высоконагруженных магистралях, так и на участках с ограниченными техническими возможностями [7, 8].

Если детализировать реализацию кодовой автоблокировки, то можно выделить два её основных технических исполнения – релейную и электронную. Именно кодовая автоблокировка является наиболее распространённой формой автоматической блокировки на железных дорогах Казахстана, охватывая протяжённость 5 645 км (Рисунок 5).

Релейная кодовая автоблокировка реализована на 5 236 км и построена на базе электромеханических реле, которые обрабатывают кодированные сигналы, передаваемые по рельсовым цепям. Такие системы отличаются высокой надёжностью и многолетней проверенной эксплуатацией, однако требуют значительных ресурсов на техническое обслуживание и модернизацию. Кроме того, они имеют ограниченные возможности по интеграции с современными цифровыми и телемеханическими решениями.

Электронная кодовая автоблокировка представлена на 409 км железнодорожной сети и включает такие типы систем, как КЭБ-1 и КЭБ-2. Эти решения основаны на микропроцессорной платформе и обеспечивают более высокую точность, быструю

диагностику, гибкость в настройке и возможность интеграции с цифровыми системами управления движением поездов. Электронные блокировки постепенно внедряются на участках с интенсивным движением и вблизи логистических узлов.

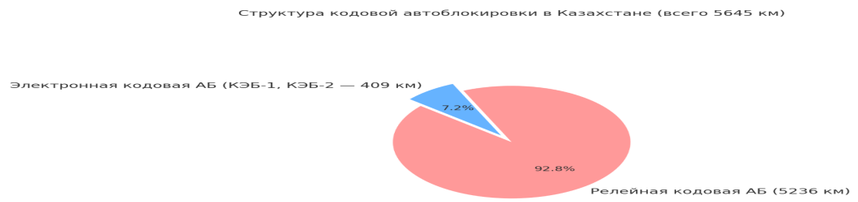


Рисунок 5 – Распределение видов кодовой автоблокировки

Таким образом, даже внутри одной технологии – кодовой автоблокировки – наблюдается технологическое расслоение, отражающее стратегический переход от аналоговых решений к цифровым, что особенно актуально в условиях повышения требований к пропускной способности и надёжности транзитных маршрутов, таких как Транскаспийский международный транспортный коридор (ТМТМ) [9, 10].

В отличие от чисто обзорного анализа, важным является количественное обоснование эффекта внедрения новых систем интервального регулирования. Для этого в работе использованы базовые зависимости расчёта пропускной способности участка железнодорожной линии, позволяющие оценить, насколько внедрение более совершенных технологий (от ПАБ к АБ и радиоблокировке) влияет на количество поездов, которое может быть пропущено в течение суток.

В классических подходах к оценке пропускной способности рассматривается период графика движения поездов на ограничивающем перегоне, обозначаемое как $T_р$, которое включает суммарное время движения пары поездов по ограничивающему перегону с учетом их разгонов и замедлений, предусмотренных схемой пропуска, а также станционные интервалы времени, предусмотренные схемой пропуска поездов, по примыкающим к ограничивающему перегону раздельным пунктам, а и б соответственно.

$$T_p = \sum t_x + \tau_a + \tau_b \,, \tag{1}$$

где, T_p – период движения поезда на ограничивающем переезде; $\sum t_x$ – общее время движения пары поездов по ограничивающему переезду с учетом их ускорения и замедления, предусмотренных схемой пропуска; τ_a τ_b – интервалы времени на станции, предусмотренные графиком движения поездов, в отдельных точках a и b, соответственно, прилегающих к перегону.

Пропускная способность однопутных железнодорожных участков , рассчитывается в парах поездов в сутки по формуле:

$$N = \frac{(1440 - t_{tech}) \cdot a_r}{T_p} = \frac{(1440 - t_{tech}) \cdot a_r}{\sum t_x + \tau_a + \tau_b}, \tag{2}$$

где 1440 – количество минут в одних сутках; t_{tech} – исключение для движения поездов из суточной продолжительности времени (24 часа), необходимого для технического обслуживания устройств и планового ремонта устройств (для однопутных участков железной дороги принимается 75 минут); a_r – коэффициент надежности (для однопутных электрифицированных железнодорожных линий – 0,93, а для неэлектрифицированных линий – 0,92).

Ориентировочные расчёты были выполнены с использованием стандартных технических параметров систем интервального регулирования движения поездов. Основные зависимости приведены выше, а итоговые значения пропускной способности для различных технологий представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты ориентировочных расчетов

Система	Межпоездной интервал	Пропускная способность,
Полуавтоматическая блокировка	15-17 минут	~ 42 поездов/сутки
Автоматическая блокировка	7-10 минут	~ 87 поездов/сутки
Радиоблокировка	3-5 минут	~ 108 поездов/сутки

Таким образом, таблица наглядно демонстрирует, что переход от ПАБ к АБ и далее к радиоблокировке обеспечивает кратное увеличение пропускной способности железнодорожных линий.

Результаты и обсуждения

Проведённый анализ структуры интервального регулирования движения поездов (ИРДП) в Казахстане выявил существенную техническую неоднородность на различных участках железнодорожной сети. Наибольшую распространённость имеет автоблокировка (АБ), представленная несколькими технологическими вариантами. В частности, кодовая АБ реализуется как на релейной, так и на электронной базе, что отражает постепенную модернизацию и переход к более продвинутым системам сигнализации. Импульсно-проводная система и АЛС как самостоятельное средство также занимают значимые доли и обеспечивают автоматическое управление поездопотоком без участия человека.

Тем не менее, полуавтоматическая блокировка (ПАБ) продолжает использоваться на ряде участков, включая направления с высоким транзитным значением. Это снижает общую эффективность движения, особенно на однопутных перегонах, где задержки, вызванные человеческим фактором и техническими ограничениями, могут вызывать нарушения графика и приводить к снижению пропускной способности. Такие участки фактически формируют «узкие места» на транзитных коридорах.

Наиболее перспективным направлением развития ИРДП остаются радиоканальные технологии, обеспечивающие сквозное управление движением поездов в реальном времени без необходимости физического деления на блок-участки. Несмотря на пока ограниченное распространение, они рассматриваются как ключевое решение для будущей цифровой трансформации железнодорожной отрасли Казахстана.

Особенно актуальным вопрос модернизации ИРДП становится в контексте развития Транскаспийского международного транспортного маршрута (ТМТМ), соединяющего Китай, Казахстан, акваторию Каспийского моря, Азербайджан, Грузию, Турцию и далее страны Европы. Повышение роли этого маршрута на фоне геополитических сдвигов требует не только наращивания пропускной способности, но и обеспечения устойчивой ритмичности перевозок.

Государственная политика также отражает понимание важности этих процессов. На уровне Президента Республики Казахстан было обозначено приоритетное направление – усиление потенциала ключевых магистралей, модернизация перегруженных участков и строительство новых линий Мойынты – Кызылжар. В частности, рассматриваются меры по расширению инфраструктуры и устранению ограничений на участке Алтынколь – Жетыген, обеспечивающих выход к портам Каспийского региона и границам с Китаем. Эти инициативы органично дополняют технический вектор перехода к более совершенным системам интервального регулирования и подчеркивают актуальность проводимых исследований.

Таким образом, развитие и обновление ИРДП являются необходимым условием для повышения транзитной привлекательности казахстанских железных дорог и интеграции в международные логистические цепочки.

Информация о финансировании

Статья выполнена в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP22685501 «Оценка влияния систем интервального регулирования движения поездов на пропускную способность железнодорожных линий»)

Выводы

Анализ показал, что системы интервального регулирования в Казахстане требуют комплексной модернизации. Преобладание полуавтоматической блокировки и однопутных участков на ключевых транзитных направлениях снижает пропускную способность и надёжность перевозок. Внедрение более совершенных видов автоблокировки и радиоканальных систем является приоритетным направлением.

С экономической точки зрения переход от полуавтоматической блокировки к более совершенным технологиям требует значительных инвестиций, однако ожидаемый эффект оправдывает данные затраты. Внедрение автоблокировки связано с умеренными капитальными расходами и обеспечивает сокращение интервала между поездами почти вдвое, что позволяет увеличить доходность перевозок. Радиоблокировка требует наиболее крупных вложений (создание

центров RBC, радиосети, модернизация подвижного состава), однако обеспечивает кратное повышение пропускной способности и сокращение эксплуатационных издержек за счет снижения задержек и более гибкой организации графика. При прогнозируемом росте транзитных потоков по направлению ТМТМ окупаемость инвестиций в радиоблокировку может составить 7-10 лет, после чего система приносит устойчивый экономический эффект. Таким образом, повышение пропускной способности следует рассматривать не только как технический, но и как стратегический экономический фактор, обеспечивающий рост конкурентоспособности национальной железнодорожной сети.

В перспективе необходима оценка эффективности модернизации с учётом реальных данных о трафике, внедрение цифровых моделей прогнозирования и разработка оптимальных сценариев развития инфраструктуры с ориентацией на международные коридоры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Сансызбай, Қ., Орунбеков, М., Шукаманов, Ж., Тасболатова, Л., Сагмединов, Д.** Общие тенденции развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики на сети железных дорог Казахстана. Вестник КазАТК. – 2022. – № 2. – С. 414–424.

2 **Бессоненко, С. А., Климова, Е. В., Осипов, Н. И.** Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов. Транспорт Урала. – 2023. – № 3, С. 35–45.

3 **Канарский, В. А., Епифанова, Е. П., Петрова, А. С.** Оценка надёжности блока микропроцессорной полуавтоматической блокировки и его программного обеспечения. // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – № 1. – С. 132–137.

4 **Боровцова, Л. А., Васильева, В. А., Котляров, В. Д.** Микропроцессорная автоблокировка с тональными рельсовыми цепями с централизованным размещением аппаратуры в шкафном варианте (АБТЦ-МШ) // В сборнике: Актуальные проблемы развития транспортного комплекса в условиях цифровой экономики. материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции. Нижний Новгород. – 2022. – С. 91–95.

5 **Modebadze, V.** Geopolitical function and purpose of the middle corridor: transcontinental trade-economic corridor between Europe and Asia // Works of the Georgian Technical University. – 2024. – № 3(533), – С. 295–307.

6 **Narouwa, M., Mendiboure, L., Badis, H., Maaloul, S., Molla, D., Berbineau, M., Langar, R.** Enabling Network Technologies For Flexible Railway Connectivity. IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 151532–151553.

7 Model Coordinate System of Interval Regulation Train Traffic. In Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Nature Singapore: Singapore. – 2022. – P. 459–467.

8 **Basile, D., Ter Beek, M.H., Ferrari, A., Legay, A.** Exploring the ERTMS/ETCS Full Moving Block Specification: An Experience with Formal Methods. Int J Softw Tools Technol Transfer. – 2022. – № 24. – P. 351–370.

9 **Palu, R., Hilmola, O.** Future Potential of Trans-Caspian Corridor: Review. Logistics. – 2023. – №7(39). – P. 1–13.

10 **Rentschler, J., Reinhardt, A., Elbert, R., Hummel, D.** The Trans-Caspian Corridor – Geopolitical implications and transport opportunities. Journal of Transport Geography. – 2025. – 125(2). – 104211.

REFERENCES

1 **Sansyzbai, K., Orunbekov, M., Shukamanov, Zh., Tasbolatova, L., Sagmedinov, D.** Obshchie tendencii razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki na seti zheleznyh dorog Kazahstana [General trends in the development of railway automation and telemechanics systems on the railway network of Kazakhstan]. Vestnik KazATK. – 2022. – № 2. – P. 414–424.

2 **Bessonenko, S. A., Klimova, E. V., Osipov, N. I.** Ocenka effektivnosti interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Assessment of the Effectiveness of Train Interval Control Systems]. Transport Urala. – 2023. – № 3. – P. 35–45.

3 **Kanarskij, V. A., Epifanova, E. P., Petrova, A. S.** Ocenka nadyozhnosti bloka mikroprocessornoj poluavtomaticheskoj blokirovki i ego programmnogo obespecheniya [Reliability Assessment of the Microprocessor-Based Semi-Automatic Blocking Unit and Its Software]. // Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. – 2020. – № 1. – P. 132–137.

4 **Borovcova, L. A., Vasil'eva, V. A., Kotlyarov, V. D.** Mikroprocessornaya avtoblokirovka s tonal'nymi rel'sovymi cepyami s centralizovannym razmeshcheniem apparatury v shkafnom variante (ABTC-MSh) [Microprocessor-Based Automatic Block Signaling with Audio-Frequency Track Circuits and Centralized Cabinet-Type Equipment Layout (ABTC-MSh)]. // V sbornike: Aktual'nye problemy razvitiya transportnogo kompleksa v usloviyah cifrovoj ekonomiki. materialy IV Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Nizhnij Novgorod. – 2022. – P. 91–95.

5 **Modebadze, V.** Geopolitical function and purpose of the middle corridor: transcontinental trade-economic corridor between Europe and Asia // Works of the Georgian Technical University. – 2024. – № 3(533), – C. 295–307.

6 **Narouwa, M., Mendiboure, L., Badis, H., Maaloul, S., Molla, D., Berbineau, M., Langar, R.** Enabling Network Technologies For Flexible Railway Connectivity. IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 151532–151553.

7 Model Coordinate System of Interval Regulation Train Traffic. In Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Nature Singapore: Singapore. – 2022. – P. 459–467.

8 **Basile, D., Ter Beek, M.H., Ferrari, A., Legay, A.** Exploring the ERTMS/ETCS Full Moving Block Specification: An Experience with Formal Methods. Int J Softw Tools Technol Transfer. – 2022. – № 24. – P. 351–370.

9 **Palu, R., Hilmola, O.** Future Potential of Trans-Caspian Corridor: Review. Logistics. – 2023. – №7(39). – P. 1–13.

10 **Rentschler, J., Reinhardt, A., Elbert, R., Hummel, D.** The Trans-Caspian Corridor – Geopolitical implications and transport opportunities. Journal of Transport Geography. – 2025. – 125(2). – 104211.

Поступило в редакцию 30.07.25.
Поступило с исправлениями 31.07.25.
Принято в печать 09.09.25.

Ж. Е. Шукаманов[1], Г. А. Сүлейменова[2]
[1]М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Қазақстан Республикасы, Тараз қ.;
[2]М. Тынышпаев атындағы ALT университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
30.07.25 ж. баспаға түсті.
31.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
08.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ТРАНЗИТТІК ӘЛЕУЕТІН ДАМЫТУҒА ИНТЕРВАЛДЫ РЕТТЕУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Транскаспий халықаралық көлік дәлізінің (ТХКД) маңыздылығының артуы жағдайында Қазақстан теміржол желісіндегі пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерін (ПҚИРЖ) жаңғырту өзекті мәселе болып отыр. Мақалада қазіргі уақытта қолданыстағы интервалды реттеу жүйелерінің түрлеріне кешенді талдау жасалды, олардың қатарына жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктаудың әртүрлі жүйелері (кодтық, импульсті-сымды және автоматты локомотивтік белгі беру – дербес құрал ретінде пайдаланылатын жүйелер), сондай-ақ радиоканал негізінде жұмыс істейтін келешегі зор ПҚИРЖ-Е жүйелері кіреді. Ресми статистика мен деректерді визуализациялау негізінде ТХКД-ге кіретін негізгі транзиттік бағыттарда ескі технологиялардың басым екені көрсетілген. Сонымен қатар мәселелі аймақтар анықталды, атап айтқанда бір жолды учаскелердің үлесі жоғары және жартылай автоматты блоктау жүйелері қолданылуда, бұл өз кезегінде өткізу қабілетін шектейді. Зерттеуде қозғалысты басқарудың цифрлық жүйелеріне және радиоканал негізіндегі ПҚИРЖ-Е жүйелеріне көшудің стратегиялық маңыздылығы ерекше атап өтілген. Сондай-ақ, теміржол инфрақұрылымын жаңғырту саласындағы мемлекеттік саясатқа, соның ішінде жаңа учаскелерді кеңейту және салу жөніндегі бастамаларға назар аударылған. Ұсынылған нәтижелер транзиттік ағындар үшін аса маңызды учаскелерді техникалық қайта жарақтандырудың басымдықтарын негіздеуге және саланың цифрлық трансформациясына арналған жол карталарын әзірлеуге пайдаланылуы мүмкін.

Кілттік сөздер: интервалды реттеу, жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау, радиоблоктау, Транскаспий маршруты, өткізу қабілеттілік.

***Zh. Shukamanov[1], G. Suleimenova[2]**
[1]M. H. Dulati Taraz University, Republic of Kazakhstan, Taraz
[2]ALT University named after M.Tynyshpaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 30.07.25.
Received in revised form 31.07.25.
Accepted for publication 09.09.25.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF TRAIN INTERVAL CONTROL SYSTEMS ON THE DEVELOPMENT OF KAZAKHSTAN'S TRANSIT POTENTIAL

Amid the growing importance of the Trans-Caspian International Transport Route (TITR), the modernization of train interval control systems (TICS) on Kazakhstan's railway network has become particularly relevant. This article presents a comprehensive analysis of existing TICS types, including semi-automatic blocking, various forms of automatic blocking (coded, impulse-wire, and automatic locomotive signaling as an independent system), as well as promising radio-based interval control systems. Based on official statistics and data visualizations, the study highlights the predominance of outdated technologies on key transit routes, including segments of the TITR. Several critical issues have been identified, such as the high proportion of single-track sections and the continued use of semi-automatic blocking, both of which limit line capacity. The study emphasizes the strategic importance of transitioning to digital traffic control and radio-based TICS. Special attention is given to national railway modernization policy, including initiatives to expand and construct new railway lines. The findings presented in the article provide justification for prioritizing the technical upgrade of segments critical to transit flows and may serve as a foundation for the development of digital transformation roadmaps for the railway sector.

Keywords: interval control, semi-automatic blocking, automatic blocking, radio-based blocking, Trans-Caspian route, throughput capacity.

СВЕДЕНИЯ О АВТОРАХ

Абишкенов Мақсат Жарылгасынович, PhD, аға оқытушы, «Технологиялық машиналар және көлік» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: abishkenov@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7995-7651

Абишкенов Максат Жарылгасынович, PhD, ст. преподаватель, кафедра «Технологические машины и транспорт», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: abishkenov@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7995-7651

Abishkenov Maksat, PhD, Senior Lecturer, Department of Technological Machines and Transport, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: abishkenov@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7995-7651

Абуова Рысбуби Жолдыбаевна, PhD, қауымд. профессор, Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0001-8208-7987

Абуова Рысбуби Жолдыбаевна, PhD, ассоц. профессор, Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Республика Казахстан, https://orcid.org/0000-0001-8208-7987

Abuova Rysbubi Zholdybayevna, PhD, Associate Professor, International Educational Corporation, Almaty, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0001-8208-7987

Адуов Мубарак Адуович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 001011, Қазақстан Республикасы, e-mail: aduov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2190-8582

Адуов Мубарак Адуович, доктор технических наук, профессор, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 001011, Республика Казахстан, e-mail: aduov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2190-8582

Aduov Mubarak Aduovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 001011, Republic of Kazakhstan, e-mail: aduov@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-2190-8582

Айкенбаева Назира Жомартовна, докторант, техника ғылымдарының магистрі, «Металлургия және материалтану» кафедрасының оқытушысы, Қарағанды индустриялық университеті. Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.aikenbayeva@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-4471-894X

Айкенбаева Назира Жомартовна, докторант, магистр технических наук, преподаватель кафедры «Металлургия и материаловедение», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: n.aikenbayeva@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-4471-894X

Aikenbayeva Nazira, Doctoral Student, Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of Metallurgy and Materials Science, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.aikenbayeva@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-4471-894X

Аймагамбетов Смагул Талгатович, «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» мамандығы бойынша докторант, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ, 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aismaghul@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-6011-5932

Аймагамбетов Смагул Талгатович, докторант по специальности «транспорт, транспортная техника и технологии», Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: aismaghul@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-6011-5932

Aimagambetov Smagul Talgatovich, Doctoral student in the specialty «Transport, transport equipment and technologies», Faculty of Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aismaghul@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-6011-5932

Айнабекова Сауле Серикбавна, PhD, Басқарма мүшесі – Ғылыми істер және халықаралық байланыстар жөніндегі проректор міндетін атқарушы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.aynabekova@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7033-2225

Айнабекова Сауле Серикбаевна, PhD, и.о. члена Правления - Проректора по научной работе и международным связям, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: s.aynabekova@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7033-2225

Ainabekova Saule, PhD, Acting Member of the Board – Vice-Rector for Research and International Relations, Karaganda Industrial University. Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.aynabekova@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7033-2225

Айтказина Аяжан Калелхановна, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: aaytkazina@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6305-4696

Айтказина Аяжан Калелхановна, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, ст.преподаватель, Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: aaytkazina@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6305-4696

Aitkazina Ayazhan, Senior Lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: aaytkazina@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6305-4696

Акпанбаев Ринат Серикович, PhD, қауымд. профессор, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0003-3566-4563

Акпанбаев Ринат Серикович, PhD, ассоц. профессор, Satbayev University, г. Алматы, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0003-3566-4563

Akpanbayev Rinat Serikovich, PhD, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0003-3566-4563

Алипова Алима Нурлановна, LogCentre координаторы, Қазақ-Неміс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: alipova@dku.kz, https://orcid.org/0009-0005-5172-4687

Алипова Алима Нурлановна, координатор Logcentre Казахстанско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: alipova@dku.kz, https://orcid.org/0009-0005-5172-4687

Alipova Alima Nurlanovna, Coordinator of LogCentre, Kazakh-German University, Almaty 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: alipova@dku.kz, https://orcid.org/0009-0005-5172-4687

Алмагамбетов Марал Сарсенбаевич, Зертхана бастығы, техника ғылымдарының кандидаты ЖШС «ҒЗИО ERG», Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Maral.Almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0005-5501-1385

Алмагамбетов Марал Сарсенбаевич, Начальник лаборатории, кандидат технических наук ТОО «НИИЦ ERG», г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: Maral.Almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0005-5501-1385

Almagambetov Maral Sarsenbayevich, Head of the Laboratory, Candidate of Technical Sciences, LTD «SERC ERG», Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Maral.Almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0005-5501-1385

Альтаева Жанар Жаксыбаевна, т.ғ.к., доцент, қауымд. профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, атындағы ҚазҰТЗУ, Сәтбаев университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: zhanar1009@mail.ru, 0000-0003-1027-9159

Альтаева Жанар Жаксыбаевна, к.т.н., доцент, ассоц.профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени КазНИТУ имени К. И. Сатпаева, Satbayev University, e-mail: zhanar1009@mail.ru, 0000-0003-1027-9159

Altayeva Zhanar, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University K. I. Satbayev KazNRTU, Satbayev University, e-mail: zhanar1009@mail.ru, 0000-0003-1027-9159

Альфонз Антони, PhD, Будапешт Метрополитан университеті, г. Будапешт, 1112, Венгрия, e-mail: aantoni@metropolitan.hu, https://orcid.org/0000-0002-5476-9144

Альфонз Антони, PhD, Будапешт Метрополитан университет, Будапешт, 1112, Венгрия, e-mail: aantoni@metropolitan.hu, https://orcid.org/0000-0002-5476-9144

Alfonz Antoni, PhD, Budapest Metropolitan University, Budapest, 1112, Hungary, e-mail: aantoni@metropolitan.hu, https://orcid.org/0000-0002-5476-9144

Амангалиев Ерлан Зейінгалиұлы, «Аспап жасау» мамандығы бойынша докторант, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2842-2702

Амангалиев Ерлан Зингалеевич, докторант по специальности «Приборостроение», Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2842-2702

Amangaliyev Yerlan, Doctoral student in «Instrumentation», Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2842-2702

Апшикур Байтак, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bapshikur@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2103-9513

Апшикур Байтак, кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан e-mail: bapshikur@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2103-9513

Apshikur Baitak, Candidate of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan e-mail: bapshikur@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2103-9513

Асангалиев Елибек Атрауович, ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, профессор, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: elibek60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9007-3689

Асангалиев Елибек Атрауович, кандитат сельско-хозяйственных наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: elibek60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9007-3689

Asangaliev Elibek Atrauovich, Candidate of Agricultural Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: elibek60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9007-3689

Атахан Мұратхан Мұхтарханұлы, магистр технических наук, инженер, Ж. Әбишев атындағы ХМИ, 100009, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8652-2955

Атахан Мұратхан Мухтарханулы, техника ғылымдарының магистрі, инженер, ХМИ имени Ж. Абишева, 100009, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8652-2955

Atakhan Muratkhan Mukhtarkhanuly, Master of Engineering Sciences, Engineer, J. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, 100009, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8652-2955

Аубакирова Малика Жанбулатовна, «Сала бойынша стандарттау, сертификаттау және метрология» білім беру бағдарламасы бойынша магистрант, Инженерия Факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: malika.kanatova.03@bk.ru

Аубакирова Малика Жанбулатовна, магистрант по образовательной программе «Стандартизация, сертификация и метрология (по отраслям)», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: malika.kanatova.03@bk.ru

Aubakirova Malika Zhanbulatovna, Magistrate in the educational programme «Standardization, Certification and Metrology (by branches)», Faculty of Engineering, Toraygyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: malika.kanatova.03@bk.ru

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, техника ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкері, «Металлургия» мамандығы, «Феррокорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасы, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, кандидат технических наук, специальность «Металлургия», старший научник сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

Akhmetov Amankeldy Serikbaevich, Candidate of Technical Sciences in «Metallurgy», Senior Researcher at the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

Ахметжанова Аида Бахтияровна, техника ғылымдарының магистрі, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Инженерлі- экологиялық факультеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: jnkt@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-9945-042X

Ахметжанова Аида Бахтияровна, магистр технических наук, Кокшетауский Университет имени А. Мырзахметова, Инженерно-экологический факультет, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: jnkt@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-9945-042X

Akhmetzhanova Aida Bakhtiyarovna, Master of Technical Sciences, Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov, Faculty of Environmental Engineering, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: jnkt@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-9945-042X

Ашкеев Жасулан Аманжолович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, доцент, «Технологиялық машиналар және көлік» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.ashkeyev@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8992-3984

Ашкеев Жасулан Аманжолович, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, доцент кафедры «Технологические машины и транспорт», Карагандинский индустриальный университет. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: zh.ashkeyev@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8992-3984

Ashkeev Zhasulan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technological Machines and Transport, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.ashkeyev@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8992-3984

Аяганова Әлия Жумабайқызы, техника ғылымдарының кандидаты, доценті, «Маркетинг және логистика» кафедрасы, Қаржы, логистика және цифрлық технологиялар факультеті, Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayaganova.alia@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0002-7127-2321

Аяганова Алия Жумабаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Маркетинг и логистика», Факультет финансов, логистики и цифровых технологий, Карагандинский университет Казпотребсоюза, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: ayaganova.alia@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0002-7127-2321

Ayaganova Aliya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Marketing and Logistics, Faculty of Finance, Logistics and Digital Technologies, Karaganda University of Kazpotrebsoyuz, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: ayaganova.alia@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0002-7127-2321

Әлімжанов Мұрат Дуанбайұлы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, механика кафедрасы, Механика-математика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: murat2151@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

Алимжанов Мурат Дуанбаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, Механико-математический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: murat2151@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

Alimzhanov Murat, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Faculty of Mechanics and Mathematics, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: murat2151@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

Байбатша Ақерке Кентайқызы, докторант, Сәтбаев университетінің «Машина жасау» кафедрасы, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: akosyabaibatsha@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-6701-6625

Байбатша Ақерке Кентайқызы, докторант, кафедра «Машиностроение», университет имени Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: akosyabaibatsha@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-6701-6625

Baibatsha Akerke Kentaikyzy, PhD student, Department of «Mechanical Engineering», Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: akosyabaibatsha@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-6701-6625

Баймолданова Лазат Сарқытбекқызы, PhD, қауымд.профессор, Жаратылыстану ғылымдары және IT Жоғары мектебінің физика және технологиялар кафедрасы, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242XX

Баймолданова Лазат Сарқытбекқызы, PhD, ассоц. профессор, кафедра физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242XX

Baimoldanova Lazat Sarqytbekkyzy, PhD, Associate Professor, Department of Physics and Technologies, School of IT and Natural Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242XX

Байсеитова Еркеназ Аглановна, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

Байсеитова Еркеназ Аглановна, докторант по специальности «Металлургия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

Bayseitova Erkenaz Aglanovna, Doctoral student in the specialty «Metallurgy», Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

Бакиров Алтынсары Газизович, PhD, қауымд. профессор, Металлургия кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: altynsary@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-3742-3467

Бакиров Алтынсары Газизович, PhD, ассоц. профессор, кафедра Металлургия, Торайгыров университе», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: altynsary@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-3742-3467

Bakirov Altynsary Gazizovich, PhD, Associate Professor, Department of «Metallurgy», Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: altynsary@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-3742-3467

Балабекова Қырмызы Гинаятқызы, PhD, доцент, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/ORCID 0000-0002-8242-6675

Балабекова Кырмызы Гинаятовна, PhD, доцент, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/ORCID 0000-0002-8242-6675

Balabekova Kirmyzy Ginayatovna, PhD, Associate Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/ORCID 0000-0002-8242-6675

Балгабеков Толеу Кунжолович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ, 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tdi_kstu@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-6468-0944

Балгабеков Толеу Кунжолович, кандидат технических наук, доцент, технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: tdi_kstu@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-6468-0944

Balgabekov Toleu Kunzholovich, Candidate of Technical Sciences, docent, Faculty of Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: tdi_kstu@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-6468-0944

Балтабай Дәурен Қуанышбекұлы, оқытушы, механика кафедрасы, Механика-математика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: baltabai_dk_1@enu.kz, https://orcid.org/0009-0001-5068-3351

Балтабай Дәурен Қуанышбекұлы, преподаватель, кафедра механики, Механико-математический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: baltabai_dk_1@enu.kz, https://orcid.org/0009-0001-5068-3351

Baltabay Dauren, Lecturer of the Department of Mechanics, Faculty of Mechanics and Mathematics, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: baltabai_dk_1@enu.kz, https://orcid.org/0009-0001-5068-3351

Бахытұлы Наурызбек, PhD, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0003-3087-0616

Бахытұлы Наурызбек, PhD, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0003-3087-0616

Bakhytuly Nauryzbek, PhD, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0003-3087-0616

Бекетов Тасбулат Сарсенбаевич, «Көлік қызметтері» мамандығы бойынша докторанты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: t.beketov1985@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-5084-6966

Бекетов Тасбулат Сарсенбаевич, докторант по специальности «Транспортные услуги», Казахский национальный технический исследовательский университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: t.beketov1985@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-5084-6966

Beketov Tasbulat Sarsenbayevich, Doctoral student in the specialty «Transport Services», Kazakh National Technical Research University named after K. I. Satbayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: t.beketov1985@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-5084-6966

Бекимбаева Гульнара Серккалиевна, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: bekimbayevag@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7751-5393

Бекимбаева Гульнара Серккалиевна, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: bekimbayevag@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7751-5393

Bekimbaeva Gulnara Serkkalievna, Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: bekimbayevag@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7751-5393

Бектасова Гүлсым Сафуановна, философия ғылымдарының кандидаты, профессор, Жоғары IT және жаратылыстану ғылымдары мектебінің физика және технологиялар кафедрасы, Сарсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070001, Қазақстан Республикасы, e-mail: bektasovags@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6746-4964

Бектасова Гульсым Сафуановна, кандидат философских наук, профессор, Кафедра физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070001, Республика Казахстан, e-mail: bektasovags@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6746-4964

Bektasova Gulsum Safuanovna, Candidate of Philosophical Sciences, Professor, Department of Physics and Technologies, School of IT and Natural Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070001, Republic of Kazakhstan, e-mail: bektasovags@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6746-4964

Бембенек Михал, Машина жасау және робототехника факультеті, AGH Краков университеті, Краков, Польша, e-mail: bembenek@agh.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Бембенек Михал, Факультет машиностроения и робототехники, AGH университет в Кракове, Краков, Польша, e-mail: bembenek@agh.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Bembenek Michal, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, AGH University of Krakow, Krakow, Poland, e-mail: bembenek@agh.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Болатов Нұржан Қажымуратұлы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор м.а., Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurzhan_b_80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Булатов Нуржан Кажмуратович, кандидат технических наук, и.о. ассоц.профессора, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: nurzhan_b_80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Bulatov Nurzhan Kazhmuratovich, Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor, Faculty of Engineering, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurzhan_b_80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Болатқызы Салтанат, Экономика ғылымдарының кандидаты, доцент, Логистика кафедрасы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: saltab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3725-6627

Болатқызы Салтанат, кандидат экономических наук, ассоц. профессор, кафедра «Логистика», Satbayev University, 050000, Республика Казахстан, г. Алматы, e-mail: saltab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3725-6627

Bolatkyzy Saltanat, Candidate Economics, Associate Professor, Department of Logistics Satbayev University, 050000, Kazakhstan, Almaty, e-mail: saltab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3725-6627

Болатова Айнаш Болатқызы, техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bolatova_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8488-8155

Болатова Айнаш Болатовна, кандидат технических наук, ст.преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: bolatova_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8488-8155

Bolatova Aynash Bolatovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bolatova_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8488-8155

Бульдяев Иван Владимирович, «Бустер ПРО» ЖШС инженері, Новосибирск қ., 633010, Ресей Федерациясы, e-mail: Buldyayev_ivan1978@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0842-1331

Бульдяев Иван Владимирович, инженер ООО «Бустер ПРО», г. Новосибирск, 633010, Российская Федерация, e-mail: Buldyayev_ivan1978@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0842-1331

Buldyayev Ivan Vladimirovich, Engineer, Booster Pro LLC, Novosibirsk, Russian Federation, 633010, e-mail: Buldyayev_ivan1978@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0842-1331

Бурумбаев Азамат Галимжанович, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Қарағанды индустриялық университеті, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5276-2259

Бурумбаев Азамат Галимжанович, докторант Карагандинского индустриального университета по специальности – «Металлургия», младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5276-2259

Burumbayev Azamat, Doctoral student of Karaganda Industrial University in the specialty – «Metallurgy», Junior researcher at the laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5276-2259

Буршукова Гулзия Адилбековна, PhD, қауымд. профессор, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulziya.burshukova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9200-2780

Буршукова Гулзия Адилбековна, PhD, ассоц. профессор, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: gulziya.burshukova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2222-22222

Burshukova Gulziya Adilbekovna, PhD, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulziya.burshukova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9200-2780

Быков Петр Олегович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Быков Петр Олегович, кандидат технических наук, профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: Bykov_petr@mail.ru,https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Bykov Petr Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Джундибаев Маулен Қайрекенович, Инженер технолог, техника ғылымдарының магистрі, ЖШС «ҒЗИО ERG», Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Maulen.Jundibayev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Джундибаев Маулен Қайрекенович, Инженер технолог, магистр технических наук, ТОО «НИИЦ ERG», г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: Maulen.Jundibayev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Jundibayev Maulen Kairekenovich, Engineer technologist, master og technical sciences, LTD «SERC ERG», Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Maulen.Jundibayev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Досмухамедов Нурлан Калиевич, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurdos@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-1210-4363

Досмухамедов Нурлан Калиевич, кандидат технических наук, профессор, кафедра Металлургия и обогащение полезных ископаемых, профессор, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: nurdos@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-1210-4363

Dosmukhamedov Nurlan Kalievich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Metallurgy and Mineral Processing, Professor, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurdos@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-1210-4363

Дудкин Михаил Васильевич, техника ғылымдарының докторы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070016, Қазақстан Республикасы, e-mail: MDudkin@ektu.kz, 0000-0001-5732-0724

Дудкин Михаил Васильевич, доктор технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070016, Республика Казахстан, e-mail: MDudkin@ektu.kz, 0000-0001-5732-0724

Dudkin Mikhail, Doctor of technical science, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical university, Ust-Kamenogorsk, 070016, Republic of Kazakhstan, e-mail: MDudkin@ektu.kz, 0000-0001-5732-0724

Дюсебаев Ильяс, PhD, Бас инженер, «Алматы Электрқалқан зауыты» ЖШС, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8514-8300

Дюсебаев Ильяс, PhD, Главный инженер, ТОО «Алматинский завод Электрощит», г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8514-8300

Dyussebayev Ilyas, PhD, Chief Engineer, LLP «Almaty Electroschit Plant», Almaty, 050061, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kaakhstan, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8514-8300

Евлампиева Елена, биология ғылымдары кандидаты, Ғылыми редакциялық бөлімінің бастығы, Shakarim University, Семей қ., F17P8K4, Қазақстан Республикасы, e-mail: elena_semei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1953-3686

Евлампиева Елена, кандидат биологических наук, Руководитель Научно-редакционного отдела, Shakarim University, Семей к., F17P8K4, Республика Казахстан, e-mail: elena_semei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1953-3686

Yevlampiyeva Yelena, Candidate in biological sciences, Head of the Scientific Editorial Department, Shakarim University, Semei F17P8K4, Republic of Kazakhstan, e-mail: elena_semei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1953-3686

Елриза Есжан, PhD, инженерия ғылымдары магистрі, Сәтпаев университеті, инженерлік бейінді лабораториясы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4523-1211

Елриза Есжан, PhD, магистр инженерных наук, Сатпаев университет, Лаборатория инженерного профиля, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4523-1211

Yelriza Yeszhan, PhD, MSc in Engineering, Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: yelriza.yeszhan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4523-1211

Жаксыбекова Асыл Кайржановна, «Металлургиялық инженерия» мамандығы бойынша докторнат, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: assyla.zhaksybekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6168-4999

Жаксыбекова Асыл Кайржановна, докторант специальности «металлургическая инженерия», Факультет машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: assyla.zhaksybekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6168-4999

Zhaksybekova Asyl Kairzhanovna, Doctoral student in the specialty «Metallurgical Engineering», Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic Of Kazakhstan, e-mail: assyla.zhaksybekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6168-4999

Жолдасбай Ержан Есенбайұлы, PhD, доцент, Тау-кен, металлургия және жаратылыстану кафедрасы, Ө. А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті, Қазақстан Республикасы, Жезқазған қ., 100600, e-mail: zhte@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9925-4435

Жолдасбай Ержан Есенбайулы, PhD, доцент, кафедра Горное дело, металлургия и естествознания, Жезказганский университет имени О. А. Байконурова, Республика Казахстан, г. Жезказган, 100600, e-mail: zhte@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9925-4435

Zholdasbay Yerzhan Yesenbayuly, PhD, Associate Professor, Department of Mining, Metallurgy and Natural Sciences, Zhezkazgan University named after O. A. Baikonurov, Republic of Kazakhstan, Zhezkazgan, 100600, e-mail: zhte@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9925-4435

Жолжаксина Аяулым Даулетхановна, аға оқытушы, «Биоинженерлік жүйе» кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayau_dau@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9392-6444

Жолжаксина Аяулым Даулетхановна, ст.преподаватель, кафедра «Биоинженерные сети», университет Шакарима, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: ayau_dau@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9392-6444

Zholzhaksina Ayaulym, Senior Lecturer, Department of Bioengineering Networks, Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: ayau_dau@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9392-6444

Жумагалиев Ерлан Уланович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, Қ. Жұбанов атындағы АӨУ, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жумагалиев Ерлан Уланович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, АРУ имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Zhumagaliyev Yerlan Ulanovich, Candidate of technical sciences, Associate Professor, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жунісов Абылай Қайыртасұлы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Металлургия кафедрасының меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Жунусов Аблай Каиртасович, кандидат технических наук, профессор, Заведующий кафедрой металлургии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Zhunusov Ablay Kairtasovich, Candidate of Technical Science, professor, Head of the Department of Metallurgy, Professor Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Жунісова Айгул Қайыргелдықызы, докторант, Металлургия кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Жунусова Айгуль Каиргельдиновна, докторант, Кафедра «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Zhunussova Aygul Kairgeldinovna, Doctoral student, Department of Metallurgy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Зигангиров Сергей Анатольевич, докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: zigangirov1972@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-6271-5404

Зигангиров Сергей Анатольевич, докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров Университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: zigangirov1972@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-6271-5404

Зигангиров Сергей Анатольевич, Doctoral student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: zigangirov1972@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-6271-5404

Ибраев Саят Муратулы, т. ғ. д., профессор, Академик У. А. Жолдасбеков атындағы Механика және техника ғылымдары институтының бас ғылыми қызметкері, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0002-6265-5745

Ибраев Саят Муратулы, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, https://orcid.org/0000-0002-6265-5745

Ibraev Sayat Muratuly, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Mechanics and Engineering Science named after Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0002-6265-5745

Избаирова Алия Сериковна, т.ғ.к., қауымд. профессор, доцент, Сәтбаев университет, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.izbairova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1727-7498

Избаирова Алия Сериковна, к.т.н., ассоц.профессор, доцент, Satbayev University, Школа транспортной инженерии и логистики имени, М. Тынышпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.izbairova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1727-7498

Izbairova Aliya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Satbayev University, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.izbairova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1727-7498

Исагулова Диана Аристотелевна, PhD, қауымд.профессор, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: isagulovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

Исагулова Диана Аристотелевна, PhD, ассоц.профессор, Факультет машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: isagulovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

Issagulova Diana Aristotelevna, PhD, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: isagulovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

Искаков Ренат Хакимулы, Оқытушы(ассистент), Торайғыров университеті, Павлодар қ. 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: iskakov-renat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0095-1275

Искаков Ренат Хакимулы, преподаватель (ассисент), Торайгыров университет, г. Павлодар 140000, Республика Казахстан, e-mail: iskakov-renat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0095-1275

Iskakov Renat Hakimuly, Lecturer (assistant), Toraihgyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: iskakov-renat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0095-1275

Ичева Юлианна Борисовна, т.ғ.к., доцент, Тау-кен, металлургия және жаратылыстану кафедрасы, Ө. А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті, Жезқазған қ., 100600, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0001-5914-9772

Ичева Юлианна Борисовна, к.т.н., доцент, кафедра Горное дело, металлургия и естествознания, Жезказганский университет имени О. А. Байконурова, Республика Казахстан, г. Жезказган, 100600, https://orcid.org/0000-0001-5914-9772

Icheva Yulianna Borisovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mining, Metallurgy and Natural Sciences, Zhezkazgan University named after O. A. Baikonurov, Republic of Kazakhstan, Zhezkazgan, 100600, https://orcid.org/0000-0001-5914-9772

Какимов Мухтарбек Муханович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасының меңгерушісі, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

Какимов Мухтарбек Муханович, кандидат технических наук, профессор, Зав. кафедрой «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств» Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 140000, Республика Казахстан, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

Kakimov Mukhtarbek, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of «Food Technology and Processing Products», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

Карбаев Нурлан Кажкенович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ, 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: https://orcid.org/0009-0000-7111-5719

Карбаев Нурлан Кажкенович, кандидат технических наук, доцент, технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0009-0000-7111-5719

Karbaev Nurlan Kazhenovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Faculty of Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0009-0000-7111-5719

Касенов Асылбек Жумабекович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, 080000, Тараз қ., Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, e-mail: kassenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Касенов Асылбек Жумабекович, кандидат технических наук, профессор, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, г. Тараз, 080000, Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, e-mail: kassenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001- 9552-1439

Kassenov Assylbek Zhumabekovich, Candidate of Technical Sciences, Faculty of Engineering, Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, 080000, Kazakh National University of Water Management and Irrigation, e-mail: kassenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Квон Светлана Сергеевна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Машинажасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Квон Светлана Сергеевна, кандидат технических наук, профессор, Факультет машиностроение, Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Kvon Svetlana Sergeevna, Candidate of technical sciences, Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Кегенбеков Жандос Кадырханович, декан, Қазақ-Неміс университетінің Инжиниринг және ақпараттық технологиялар факультеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kegenbekov@dku.kz, https://orcid.org/0000-0001-8175-7440

Кегенбеков Жандос Кадырханович, декан, факультета инжиниринга и информационных технологий Казахстнаско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: kegenbekov@dku.kz, https://orcid.org/0000-0001-8175-7440

Kegenbekov Zhandos Kadyrkhanovich, Dean of the Faculty of Engineering and Information Tech№logies, Kazakh-German University, Almaty 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kegenbekov@dku.kz, https://orcid.org/0000-0001-8175-7440

Кенжебекова Анар Ерболатқызы, магистр, аға оқытушы, Металлургия кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: kenzhebekova_psu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

Кенжебекова Анар Ерболатовна, магистр, ст. преподаватель, Кафедра «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: kenzhebekova_psu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

Kenzhebekova Anar, master. Senior teacher., Department of «Metallurgy», Torayghirov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kenzhebekova_psu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

Ким Алина Игоревна, PhD, қауымд.профессор, «МИРАС» университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., 160012, e-mail: alinakim3107@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-9332-4279

Ким Алина Игоревна, PhD, ассоц.профессор, университет «Мирас», Шымкент, 160012, Республика Казахстан, e-mail: alinakim3107@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9332-4279

Kim Alina Igorevna, PhD, Associate Professor, Miras University, Shymkent, 160012, Republic of Kazakhstan, e-mail: alinakim3107@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-9332-4279

Киселёва Ольга Геннадьевна, т.ғ.к., қауымд. профессор, Сәтбаев университет, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: kisaolya.77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1569-7731

Киселёва Ольга Геннадьевна, к.т.н., ассоц. профессор, Satbayev University, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: kisaolya.77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1569-7731

Kisselyova Olga, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Satbayev University, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: kisaolya.77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1569-7731

Ковалев Павел Валерьевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Петр Великий атындағы Санкт-Петербург политехникалық университеті, Санкт-Петербург қ., 195251, Ресей Федерациясы, e-mail: @kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Ковалев Павел Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерациясы, e-mail: @kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Kovalev Pavel Valer'evich, PhD, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: @kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Ковалева Татьяна Викторовна, PhD, «Металлургия» мамандығы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

Ковалева Татьяна Викторовна, PhD, по специальности «Металлургия», Карагандинский технический университет имени абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

Kovaleva Tatyana Viktorovna, PhD in Metallurgy, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

Кокаева Гульнара Айтикеновна, қауымд. профессор, «Технологиялық машиналар және жабдықтар» кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

Кокаева Гульнара Айтикеновна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, кафедра «Технологические машины и оборудование», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 140000, Республика Казахстан, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

Kokayeva Gulnara, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technological Machines and Equipment, «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

Конгуева Анар Женисовна, Қазақ-Неміс университетінің ғылыми қызметкері, Қазақ-Неміс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: konguyeva@ect.kz, https://orcid.org/0009-0005-6338-1028

Конгуева Анар Женисовна, Научный сотрудник Казахстнаско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: konguyeva@ect.kz, https://orcid.org/0009-0005-6338-1028

Konguyeva Anar Zhenisovna, Researcher Kazakh-German University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan e-mail: konguyeva@ect.kz, https://orcid.org/0009-0005-6338-1028

Кочегина Елена Вячеславовна, басшы оқытушы, Академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., 100024, Қазақстан Республикасы, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7329-4095

Кочегина Елена Вячеславовна, ст.преподаватель, Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетов, 100024, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7329-4095

Kochegina Elena Vyacheslavovna, Senior Lecturer, Karaganda Buketov University, 100024, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7329-4095

Куандыков Алмаз Болатович, PhD, қауымд. профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: azeka200892@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-6075-1603

Куандыков Алмаз Болатович, PhD, ассоц.профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: azeka200892@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-6075-1603

Kuandykov Almaz Bolatovich, PhD, Associate Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: azeka200892@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-6075-1603

Куленова Наталья Анатольевна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: 3007kulenova53@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7063-4899

Куленова Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск , 070004, Республика Казахстан, e-mail: 3007kulenova53@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7063-4899

Kulenova Natalya Anatolievna, Candidate of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: 3007kulenova53@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7063-4899

Куликов Виталий Юрьевич, профессор, Нанотехнология және металлургия кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Куликов Виталий Юрьевич, профессор, кафедра Нанотехнологии и металлургии, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Kulikov Vitaly Yurievich, Professor, Department of NTM, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Кулумбаев Нурболат Калиевич, докторант, Торайғыров университеті инженерлік факультеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Kulumbaev.nurbulat@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Кулумбаев Нурболат Калиевич, докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: Kulumbaev.nurbulat@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Kulumbaev Nurbolat Kalievich, Doctoral student, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kulumbaev.nurbulat@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Қажмуратова Айгерім Кенесовна, экономика ғылымдар кандидаты, аға оқытушы, «Бизнес технологиялары» кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kazhmuratova.A@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2119-4831

Кажмуратова Айгерим Кенесовна, кандидат экономических наук, ст. преподаватель, кафедра «Бизнес технологий», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: Kazhmuratova.A@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2119-4831

Kazhmuratova Aigerim Kenesovna, Candidate of economical sciences, Senior lecturer at the department of Business Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kazhmuratova.A@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2119-4831

Қалибек Жадыра, докторант, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: jadyrakalibekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8322-1894

Қалибек Жадыра, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан e-mail: jadyrakalibekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8322-1894

Kalibek Zhadyra, PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan e-mail: jadyrakalibekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8322-1894

Қалиев Әділбек Бекболатұлы, техника ғылымдарының кандидаты, механика кафедрасы, меңгерушісі, Механика-математика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: adilbekk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

Калиев Адильбек Бекбулатович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой механики, Механико-математический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: adilbekk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

Kaliyev Adilbek, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanics, Faculty of Mechanics and Mathematics, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: adilbekk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

Қалқабаева Айжан Ерболатовна, «Көлік қызметтері» мамандығы бойынша докторант, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» бағыты, Сәтпаев Университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: D@stud.satbayev.university

Калкабаева Айжан Ерболатовна, докторант по специальности «Транспортные услуги», Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, Направление «Логистика», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: D@stud.satbayev.university

Kalkabayeva Aizhan Yerbolatovna, Doctoral student in «Transport services», School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev Logistics direction, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: D@stud.satbayev.university

Қасымова Баян Құлмуханбетқызы, инженер, Ж. Әбишев атындағы ХМИ, 100009, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2549-5268

Касымова Баян Кульмуханбетовна, инженер, ХМИ имени Ж. Абишева, 100009, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2549-5268

Kasymova Bayan Kulmukhanbetovna, Engineer, J. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, 100009, Karaganda, Republic of Kazakhstan. e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2549-5268

Қойшина Гүлзада Мыңғышқызы, PhD, қауымд. профессор, Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulzada.koishina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0592-3843

Койшина Гулзада Мынгышкызы, PhD, ассоц. профессор, кафедра Металлургия и обогащение полезных ископаемых, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: gulzada.koishina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0592-3843

Koishina Gulzada Myngyshkyzy, PhD, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan,, gulzada.e-mail: koishina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0592-3843

Қорабай Ризабек Бақтиярұлы, докторант, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: rizabek1998@mail.ru

Корабай Ризабек Бахтиярулы, докторант, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: rizabek1998@mail.ru

Korabai Rizabek Bakhtiyaruly, PhD, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: rizabek1998@mail.ru

Қыдыр Асқарұлы, PhD, доцент, Сәтпаев университеті, Инженерлік Бейінді Лаборатория, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.askaruly@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8998-0409

Кыдыр Аскарулы, PhD, доцент, Сатпаев университет, Лаборатория Инженерного Профиля, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: k.askaruly@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8998-0409

Kydyr Askaruly, PhD, Associate Professor, Satbayev University, Laboratory of Engineering Profile, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.askaruly@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8998-0409

Лукиных Валерий Федорович, экономика ғылымдарының докторы, профессор, Гуманитарлық аграрлық университеті, Красноярск қ., 660004, Ресей Федерациясы, e-mail: somcl@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2000-9278

Лукиных Валерий Федорович, доктор экономических наук, профессор, Красноярского Гуманитарного аграрного университета, Красноярск, 660004, Российская Федерациясы, e-mail: somcl@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2000-9278

Lukinykh Valery Fedorovich, Doctor of Economics, Professor, Krasnoyarsk Humanitarian Agrarian University, Krasnoyarsk, 660004, Russian Federation, e-mail: somcl@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2000-9278

Лутай Сергей Сергеевич, ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sslutai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2238-9083

Лутай Сергей Сергеевич, магистр сельско-хозяйственных наук, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: sslutai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2238-9083

Lutai Sergey Sergeevich, Master of Agricultural Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sslutai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2238-9083

Магавин Сабит Шамильевич, т.ғ.к., доцент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: magavin_sabit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0920-1442

Магавин Сабит Шамильевич, кандидат технических наук, доцент, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: magavin_sabit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0920-1442

Magavin Sabit Shamilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: magavin_sabit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0920-1442

Мақашев Ардақ Сұлушашұлы, аға ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев атындағы ХМИ, 100009, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7087-3937

Макашев Ардак Сулушашович, ст.научный сотрудник, ХМИ имени Ж. Абишева, 100009, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7087-3937

Makashov Ardak Sulushashovich, Senior Research Scientist, J. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, 100009, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7087-3937

Манапов Қайсар Бауыржанұлы, «Логистика (сала бойынша)» мамандығы бойынша магистрант, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kaisarmanapov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9459-8753

Манапов Қайсар Бауыржанұлы, магистрант по специальности «Логистика (по отраслям)», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: kaisarmanapov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9459-8753

Manapov Kaisar Baurzhanuly, Master's degree in Logistics (by Industry), Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kaisarmanapov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9459-8753

Маркова Светлана Юрьевна, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: markova_s_1962@mail.ru, https://orcid.org/0000-0004-7062-4999

Маркова Светлана Юрьевна, ст.преподаватель, «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: markova_s_1962@mail.ru, https://orcid.org/0000-0004-7062-4999

Markova Svetlana Yuryevna, Senior Lecturer, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: markova_s_1962@mail.ru, https://orcid.org/0000-0004-7062-4999

Махамбетов Ерболат Нысаналыұлы, PhD, «Металлургия» мамандығы, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Махамбетов Ерболат Нысаналыұлы, PhD, по специальности – «Металлургия», заведующий лабораторией «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Makhambetov Yerbolat, PhD in the specialty – «Metallurgy», Head of the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Махкамов Хамид Хайруллаевич, PhD, профессор, Машинажасау және құрылыс факультеті, Нортумбрия университеті, Ньюкасл қ., NE11AD, Ұлыбритания, e-mail: khamid.mahkamov@northumbria.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4028-7654

Махкамов Хамид Хайруллаевич, PhD, профессор, Факультет Машиностроение и строительство, университет Нортумбрии, г. Ньюкасл, NE11AD, Великобритания, e-mail: khamid.mahkamov@northumbria.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4028-7654

Mahkamov Khamid Khairullaevich, PhD, Professor, Faculty of Mechanical and Construction Engineering, Northumbria University, Newcastle, NE11AD, Great Britain, e-mail: khamid.mahkamov@northumbria.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4028-7654

Меркибаев Ерик Серикович, PhD, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0003-3869-6835

Меркибаев Ерик Серикович, PhD, Satbayev University, г. Алматы, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0003-3869-6835

Merkibayev Erik Serikovich, PhD, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0003-3869-6835

Момынкулов Зейнель Зейнуллаулы, оқытушы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: mrjohnnyunited@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-6196-1395

Момынкулов Зейнель Зейнуллаулы, преподаватель, Международный университет информационных технологий, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: mrjohnnyunited@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-6196-1395

Momynkulov Zeinel, Lecturer, International IT University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: mrjohnnyunited@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-6196-1395

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Mukhanov Ruslan, PhD, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Мурсалыкова Майгуль Тауржановна, PhD, постдокторант, «Технологиялық жабдықтар» кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Мурсалыкова Майгуль Тауржановна, PhD, постдокторант, кафедра Технологическое оборудование, университет Шакарима, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Mursalykova Maigul, PhD, Postdoctoral Department of «Food Technology and Processing Products», Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Мусина Жанара Керейовна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия Факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: mussina_zhanara@mail.ru

Мусина Жанара Керейовна, к.т.н, профессор, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: mussina_zhanara@mail.ru

Musina Zhanara Kereyovna, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: mussina_zhanara@mail.ru

Мусина Лейла Рафаиловна, «Машина жасау» білім беру бағдарламасы бойынша техника ғылымдарының магистрі, Инженерия Факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: lulu081299@mail.ru

Мусина Лейла Рафаиловна, Магистр технических наук по образовательной программе «Машиностроение», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: lulu081299@mail.ru

Musina Leila Rafailovna, Master of Technical Sciences in the educational programme «Mechanical Engineering», Faculty of Engineering, Toraygyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: lulu081299@mail.ru

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, қауымд.профессоры, Ғылыми қызметкер, «Машина жасау» кафедрасы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013,ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, ассоц.профессор, Научный сотрудник, кафедра «Машиностроение», Сатпаев университет, г. Алматы, 050013, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Mustafa Azamat, PhD,Associate Professor, Researcher, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kaakhstan, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Муханова Гульмира Самудиновна, т.ғ.к., профессор, доцент, Сәтбаев университет, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.mukhanova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4985-4018

Муханова Гульмира Самудиновна, к.т.н., профессор, доцент, Satbayev University, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: g.mukhanova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4985-4018

Mukhanova Gulmira, Candidate of Technical Sciences, Satbayev University, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.mukhanova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4985-4018

Мұхтар Айдархан Ахуанұлы, техника ғылымының кандидаты, қауымд.профессор, Кен байыту зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбишев атындағы ХМИ, 100009, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9412-3922

Мухтар Айдархан Ахуанулы, к.т.н, ассоц. профессор, Зав.лаб. Обогащения руд, ХМИ имени Ж. Абишева, 100009, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9412-3922

Muhtar Aidarkhan Akhuanuly, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Ore Beneficiation Laboratory, J. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, 100009, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: bkosimova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9412-3922

Мырзахмет Балғали, «Механика және металлөңдеу» мамандығы бойынша докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: balgali_96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7311-4776

Мырзахмет Балғали, докторант по специальности «Механика и метллообработка», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: balgali_96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7311-4776

Myrzakhmet Balgali, Doctoral student in the specialty «Mechanics and metalworking», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: balgali_96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7311-4776

Молдаханов Бекболат Аскерханоаич, PhD, аға ғылыми қызметкер, «Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Молдаханов Бекболат Аскерханович, PhD, ст.научный сотрудник, ТОО «Европлюс Восток», г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Moldakhanov Bekbolat Askerkhanovich, PhD, Senior Researcher, «Europlus Vostok» LLP, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Нукушева Сауле Абайдильдиновна, техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 001011, Қазақстан Республикасы, e-mail: nukusheva60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-0619-6943

Нукушева Сауле Абайдильдиновна, кандидат технических наук, ст.преподаватель, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 001011, Республика Казахстан, e-mail: nukusheva60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-0619-6943

Nukusheva Saule Abaydildinovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Faculty of Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 001011, Republic of Kazakhstan, e-mail: nukusheva60@mail.ru, http://orcid.org/0000-0001-0619-6943

Нуралина Айнур Куанышевна, 8D11301-«Көлік қызметтері» мамандығы бойынша докторант, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: nuralina85@list.ru, https://orcid.org/0009-0002-1318-2942

Нуралина Айнур Куанышевна, докторант по специальности 8D11301-«Транспортные услуги», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: nuralina85@list.ru, https://orcid.org/0009-0002-1318-2942

Nuralina Ainur, Doctoral student in the specialty 8D11301-«Transport services», K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: nuralina85@list.ru, https://orcid.org/0009-0002-1318-2942

Нурсаинов Ильяс Нурланұлы, PhD, Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту кафедрасының докторанты, Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050000, e-mail: murat.kmb@mail.ru

Нурсаинов Ильяс Нурланулы, PhD, докторант кафедры Металлургия и обогащение полезных ископаемых, Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, e-mail: murat.kmb@mail.ru

Nursainov Ilyas Nurlanuly, PhD, Doctoral student of the Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty, 050000, e-mail: murat.kmb@mail.ru

Нұғман Ерік Зейнелұлы, PhD, қауымд.профессоры, Сәтбаев университетінің «Машина жасау» кафедрасының меңгерушісі, Ғылыми қызметкер, Алматы қ., 050013, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Нұғман Ерік Зейнелұлы, PhD, ассоц. профессор, Заведующий кафедрой «Машиностроение», Научный сотрудник, Сатпаев университет, г.Алматы,050013,ТОО«RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Nugman Yerik, PhD, Head of Department Mechanical Engineering and Associate Professor, Researcher, Satbayev University, Almaty, 050013, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Окишев Константин Юрьевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, доцент, «Металдарды термоөңдеу және физикасы» кафедрасы, Орал федералды университеті, Екатеринбург қ., Ресей Федерациясы, e-mail: k.okishev@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-6331-3050

Окишев Константин Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор, кафедра «Термообработки и физики металлов» Уральский федеральный университет г. Екатеринбург, Российская Федерациясы, e-mail: k.okishev@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-6331-3050

Okishev Konstantin Yuryevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Heat Treatment and Physics of Metals, Ural Federal University Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: k.okishev@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-6331-3050

Олжаев Олжас Муратулы, аға оқытушы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0009-0001-9930-8990

Олжаев Олжас Муратулы, ст.преподаватель, Международный университет информационных технологий, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0009-0001-9930-8990

Olzhayev Olzhas, Senior lecturer, International IT University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0009-0001-9930-8990

Оразалиев Берикбай Тлеукабылович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0009-0000-8525-236X

Оразалиев Берикбай Тлеукабылович, кандидат технических наук, доцент, технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0009-0000-8525-236X

Orazaliev Berikbai Tleukabylovich, Candidate of Technical Sciences, docent, Faculty of Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0009-0000-8525-236X

Оразымбетова Акмарал Шыныбеккызы, аға оқытушы, Сәтбаев университет, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.orazymbetova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1701-8659

Оразымбетова Акмарал Шыныбеккызы, ст.преподаватель, Satbayev University, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, г. Алматы 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.orazymbetova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1701-8659

Orazymbetova Akmaral, Satbayev University, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.orazymbetova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1701-8659

Onuralp Yucel, PhD, профессор, «Металлургия» мамандығы, Istambul Technical University Стамбул қ., 34000–34999, Турция, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Onuralp Yucel, PhD, профессор, Istambul Technical University, специальность «Металлургия», г. Стамбул, Турция, 34000–34999, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Onuralp Yucel, PhD, Professor, Istambul Technical University, Specialty «Metallurgy», Istanbul, 34000-34999, Turkey, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Погребняк Александр Дмитриевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, наноэлектроника және беттерді модификациялау кафедрасы, Сумы мемлекеттік университеті, Сумы қ., 40002, Украина, e-mail: a.d.pogrebnjak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9218-6492

Погребняк Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры наноэлектроники и модификации поверхности, Сумский государственный университет, г. Сумы, 40002, Украина, e-mail: a.d.pogrebnjak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9218-6492

Pogrebnyak Alexander Dmitrievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Nanoelectronics and Surface Modification, Sumy State University, Sumy, 40002, Ukraine, e-mail: a.d.pogrebnjak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9218-6492

Рашид Амрусс, Шуайб Дуккали университеті, Энергетика саласындағы ғылыми-инженерлік зертхана Эль-Джадида қ., Марокко e-mail: amrousse.r@ucd.ac.ma, https://orcid.org/0000-0002-2905-602X

Рашид Амрусс, университет Шуайба Дуккали, Научно-инженерная лаборатория энергетики, г. Эль-Джадида Марокко, e-mail: amrousse.r@ucd.ac.ma, https://orcid.org/0000-0002-2905-602X

Rachid Amrousse, Chouaib Doukkali University, Science Engineering Laboratory for Energy, El Jadida, Morocco, e-mail: amrousse.r@ucd.ac.ma, https://orcid.org/0000-0002-2905-602X

Рұсланов Бекнұр Русланұлы, «Механика – қолданбалы математика» білім беру бағдарламасы бойынша магистрант, Механика-математика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ruslanovbeknur@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0000-3778-6885

Рұсланов Бекнұр Русланұлы, Магистрант по образовательной программе «Механика – прикладная математика», Механико-математический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: ruslanovbeknur@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0000-3778-6885

Ruslanov Beknur, Master's student in the educational program «Mechanics – Applied Mathematics», Faculty of Mechanics and Mathematics, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ruslanovbeknur@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0000-3778-6885

Сагитов Алмат Ардакович, PhD, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: almat1990@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

Сагитов Алмат Ардакович, PhD, ст.преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: almat1990@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

Sagitov Almat Ardakovich, PhD, Senior lecturer, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: almat1990@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

Садық Жәдігер Орысбайұлы, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының инженері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ.,100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: sadzhad03@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-8557-1532

Садық Жәдігер Орысбайұлы, инженер лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: sadzhad03@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-8557-1532

Sadyk Zhadiger, Engineer at the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: sadzhad03@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-8557-1532

Сакенова Римма Ерболатқызы, PhD, қауымд. профессор, Жоғары IT және жаратылыстану ғылымдары мектебінің физика және технологиялар кафедрасы, Сарсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Sakenovarim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6095-0129

Сакенова Римма Ерболатқызы, PhD, ассоц. профессор кафедры физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: Sakenovarim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6095-0129

Sakenova Rimma Yerbolatkyzy, PhD, Associate Professor, Department of Physics and Technologies, School of IT and Natural Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Sakenovarim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6095-0129

Саменов Галымжан Қайыржанұлы, техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sgk_08@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0006-0509-5864

Саменов Галымжан Кайыржанович, кандидат технических наук, ст. преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: sgk_08@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0006-0509-5864

Samenov Galymzhan Kayyrzhanovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sgk_08@mail.ru, https://orcid.org / 0009-0006-0509-5864

Сапинов Руслан Викторович, PhD, қауымд. профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Сапинов Руслан Викторович, PhD, ассоц. профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Sapinov Ruslan Viktorovich, PhD, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Сейтхан Азат, PhD, профессор, Сәтпаев Университеті, Инженерлік Бейінді Лаборатория, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: seytkhan.azat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9705-7438

Сейтхан Азат, PhD, профессор, Сатпаев университет, Лаборатория инженерного профиля, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: seytkhan.azat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9705-7438

Seitkhan Azat, PhD, Professor Satbayev University, Laboratory of Engineering Profile, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: seytkhan.azat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9705-7438

Суйіндіков Мерхат Мәдениұлы, т.ғ.к., профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: suyundikovm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1352-5821

Суюндиков Мерхат Мадениевич, к.т.н., профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: suyundikovm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1352-5821

Suyundikov Merkhat Madeniyevich, Candidate of Technical Sciences, professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: suyundikovm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1352-5821

Сүлейменова Гүлфариза Абатбекқызы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, М. Тынышбаев атындағы ALT университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sma-1980@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7099-8441

Сүлейменова Гүлфариза Абатбекқызы, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизация и управление», ALT университет имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: sma-1980@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7099-8441

Gulfariza Abatbekkyzy, Suleimenova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control, ALT University named M. Tynyshpaev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sma-1980@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7099-8441

Тавшанов Ильгар Сулейманович, техника ғылымдарының магистрі, оқытушы, «Технологиялық машиналар және көлік» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті. Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: i.tavshanov@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-9427-9748

Тавшанов Ильгар Сулейманович, магистр технических наук, преподаватель кафедры «Технологические машины и транспорт», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: i.tavshanov@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-9427-9748

Tavshanov Ilgar, Master of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Technological Machines and Transport, Karaganda Industrial University. Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: i.tavshanov@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-9427-9748

Толеубаев Ренат Асылбекұлы, докторант, магистр, «Металлургия» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: tyulyubaev_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Тюлюбаев Ренат Асылбекович, магистр, докторант кафедры «Металлургия», Торайгыров университет, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: tyulyubaev_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Tyulyubaev Renat Asylbekovich, Master, doctoral student of the Department of Metallurgy, Torayghirov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: tyulyubaev_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Тулегенова Шолпан Ныгметовна, аға оқытушы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті Нанотехнология және металлургия кафедрасы, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: sholpan.tulegenova.65@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0750-1233

Тулегенова Шолпан Ныгметовна, ст. преподаватель, кафедра Нанотехнологии и металлургии, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: sholpan.tulegenova.65@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0750-1233

Tulegenova Sholpan Nygmetovna, Senior lecturer of the Department of NTM, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: sholpan.tulegenova.65@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0750-1233

Тулепова Молдір Абілсеитқызы, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Машинажасау факультеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: moldir_a_nur@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1560-0161

Тулепова Молдир Абилсеиткызы, докторант по специальности «Металлургия», Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова, Факультет машиностроение, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: moldir_a_nur@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1560-0161

Tulepova Moldir Abilseitkyzy, Doctoral student in «Metallurgy», Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: moldir_a_nur@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1560-0161

Тулешов Амандык Куатович, т.ғ.д., профессор, Академик У. А. Жолдасбеков атындағы Механика және техника ғылымдары институтының бас ғылыми қызметкері, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0001-9775-3049

Тулешов Амандык Куатович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, https://orcid.org/0000-0001-9775-3049

Tuleshov Amandyk Kuatovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Mechanics and Engineering Science named after Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0001-9775-3049

Турсунов Нодиржон Каюмжонович, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Материалтану және машина жасау» кафедрасы, Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Ташкент қ., Өзбекстан Республикасы, e-mail: u_nadir@mail.ru

Турсунов Нодиржон Каюмжонович, д.т.н., профессор, Кафедра «Материаловедение и машиностроение» Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: u_nadir@mail.ru

Tursunov Nodirjon Kayumjonovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Materials Science and Mechanical Engineering Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan, e-mail: u_nadir@mail.ru

Турсынова Ажар Тойлыбайқызы, PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің математикалық компьютерлік модельдеу кафедрасының ассистенті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0002-1918-065X

Турсынова Ажар Тойлыбайқызы, PhD, ассистент профессор кафедры «Математическое компьютерное моделирование» Международный университет информационных технологий, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0000-0002-1918-065X

Tursynova Azhar Toylybaykyzy, PhD, Assistant Professor, Department of Mathematical Computer Modeling, International University of Information Technologies, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0002-1918-065X

Тымбаева Жазира Муратбековна, экономика ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» бағыты, Сәтпаев Университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: z.tymbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7705-9874

Тымбаева Жазира Муратбековна, кандидат экономических наук, ассоц.профессор, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, Направление «Логистика», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: z.tymbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7705-9874

Tymbayeva Zhazira Muratbekovna, Candidate of Economic Sciences, associate Professor, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Logistics direction, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: z.tymbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7705-9874

Увалиева Әсем Болатқызы, қауымд.профессор, техника ғылымдарының кандидаты, «Көлік логистикасы және Экономика» кафедрасы, Л. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.uvaliyeva@almau.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5609-2563

Увалиева Асем Болатовна, ассоц.профессор, кандидат технических наук, Казахский автодорожный институт имени Л. Гончарова, Кафедра «Транспортная логистика и Экономика», г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: a.uvaliyeva@almau.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5609-2563

Uvaliyeva Assem Bolatovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, L. Goncharov Kazakh Automobile and Road Academy, Department «Transport logistics and Economics», Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.uvaliyeva@almau.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5609-2563

Умбетова Аяулы Кенжебулатовна, жаратылыстану ғылымдар магистрі, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Инженерлі-экологиялық факультеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: umbr16@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6407-8216

Умбетова Аяулы Кенжебулатовна, магистр естественных наук, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова, Инженерно-экологический факультет, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: umbr16@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6407-8216

Umbetova Ayauly Kenzhebulatovna, Master of Natural Sciences, Faculty of Environmental Engineering, Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: umbr16@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6407-8216

Утеулов Канат Тулекбергенович, ауылшаруашылық ғылымдарының магистрі, оқытушы, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 001011, Қазақстан Республикасы, e-mail: kanat-uteulov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8906-9204

Утеулов Канат Тулекбергенович, магистр сельскохозяйственных наук, преподаватель, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 001011, Республика Казахстан, e-mail: kanat-uteulov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8906-9204

Uteuov Kanat Tulepbergenovich, Master of Agricultural Sciences, Lecturer, Faculty of Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Astana, 001011, Republic of Kazakhstan, e-mail: kanat-uteulov@mail.ru, http://orcid.org/0000-0001-8906-9204

Халитов Тимур Викторович, Инженер технолог, ЖШС «FЗИО ERG», Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Timur.Khalitov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0006-1819-4415

Халитов Тимур Викторович, Инженер технолог, ТОО «НИИЦ ERG», г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: Timur.Khalitov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0006-1819-4415

Khalitov Timur Viktorovich, Engineer technologist, LTD «SERC ERG», Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Timur.Khalitov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0006-1819-4415

Харченко Светлана Петровна, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Инновациялық Еуразия университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0009-0005-1791-345X

Харченко Светлана Петровна, магистр технических наук, ст.преподаватель, Инновационный Евразийский Университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0009-0005-1791-345X

Kharchenko Svetlana Petrovna, Master of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Innovative University of Eurasia, 140000, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, https://orcid.org/0009-0005-1791-345X

Харченко Светлана Петровна, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Инновациялық Еуразия университеті, 140000, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., https://orcid.org/0009-0005-1791-345X

Харченко Светлана Петровна, магистр технических наук, ст.преподаватель, Инновационный Евразийский Университет, 140000, Республика Казахстан, г. Павлодар, https://orcid.org/0009-0005-1791-345X

Kharchenko Svetlana Petrovna, Master of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Innovative University of Eurasia, 140000, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, https://orcid.org/0009-0005-1791-345X

Чакеева Қарлығаш Сайлаубаевна, техникалық ғылымдар кандидаты, қауымд.профессор, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» бағыты, Сәтпаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.chakeyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1473-0744

Чакеева Карлыгаш Сайлаубаевна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, Направление «Логистика», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: k.chakeyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1473-0744

Chakeeva Karlygash Saylaubayevna, Candidate of technical sciences, associate Professor, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev Logistics direction, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.chakeyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1473-0744

Шабанов Ербол Жақсылықұлы, PhD, қауымд.профессор, Қ. Жұбанов атындағы АӨУ, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yshabanov@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6902-1211

Шабанов Ербол Жақсылықұлы, PhD, ассоц. профессор АРУ, имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: yshabanov@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6902-1211

Shabanov Yerbol Zhaksylykuly, PhD, Associate professor, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: yshabanov@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6902-1211

Шадхин Юрий Исаевич, қауымд.профессор, Г. Ж. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0009-0009-2743-9092

Шадхин Юрий Исаевич, ассоц. профессор, Алматинский университет энергетики и телекоммуникаций имени Г. Ж. Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0009-0009-2743-9092

Shadkhin Yuri, Associate professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. D. Daukeev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0009-0009-2743-9092

Шеров Айбек Карибекович, «Машинажасау» мамандығы бойынша PhD, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sherov_ak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Шеров Айбек Карибекович, PhD по специальности «Машиностроение», Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: sherov_ak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Sherov Aibek Karibekovich, PhD in Mechanical Engineering, Faculty of Technology, S.Seifullin Kazakh agrotechnical research university, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sherov_ak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Шеров Карибек Тагаевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

Шеров Карибек Тагаевич, доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8007-1690

Sherov Karibek, Doctor of Technical Sciences, professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8007-1690

Шошай Жансерик, постдокторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы

Шошай Жансерик, постдокторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан

Shoshay Zhanserik, Postdoctoral researcher, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, 070000, Ust-Kamenogorsk, 140008, Republic of Kazakhstan

Шукаманов Жанибек Ерикович, аға оқытушы, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасы, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: shukamanov@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3017-7133

Шукаманов Жанибек Ерикович, ст.преподаватель, кафедра «Автоматизация и телекоммуникация», Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: shukamanov@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3017-7133

Shukamanov Zhanibek Yerikovich, Senior Lecturer, Department of Automation and Telecommunications, Taraz University named M. H. Dulati, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: shukamanov@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3017-7133

Яковлев Владимир Сергеевич, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, халықаралық инженерлік мектебі, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Яковлев Владимир Сергеевич, ст.преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, международной школы инженерии, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Yakovlev Vladimir Sergeevich, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Senior Lecturer, International School of Engineering, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Янюшкин Александр Сергеевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Машина жасау факультеті, И. Н. Ульянов атындағы Чуваш мемлекеттік университеті, Чебоксары қ., 428015, Чуваш Республикасы, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

Янюшкин Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Факультет машиностроения, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, 428015, Чувашская Республика, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

Yanushkin Alexander Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor. Faculty of Mechanical Engineering. I. N. Ulyanov, Chuvash State University, Cheboksary, 428015, Chuvash Republic, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

***В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.**

***Количество соавторов одной статьи не более 5.**

***Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 %.**

***Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.**

***Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.**

***Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

***Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.**

*** Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз.**

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц печатного текста.** *Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).*

Структура научной статьи включает название, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение,

заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. *ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Фамилия, имя, отчество** (полностью) автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках *(жирным шрифтом, по центру)*;

4 **Ученая степень, ученое звание;**

5 **Аффилиация** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

6 **E-mail;**

7 **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность *(не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий)*;

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (*рекомендуемый объем аннотации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец)*;

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования *(оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.)*. Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке *(см. образец)*;

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- Введение / Кіріспе / Introduction *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** *(при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

- **Выводы / Қорытынды / Conclusion** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников / Пайдаланған деректер тізімі / References** *(жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре)* включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 *(см. образец)*.

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. Объем не менее 10 не более чем 20 наименований (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом*.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

11 **Иллюстрации, перечень рисунков** и подрисуночные надписи к ним представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

12 **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)
В электронном варианте приводятся полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются):

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

Информация для авторов

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления.

Периодичность издания журналов – четыре раза в год (ежеквартально)

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимостьпубликации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.

Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на почту: nitk.tou.edu.kz. Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,
НАО «Торайгыров университет»,
Издательство «Toraighyrov University», каб. 137.
Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).
E-mai1: **nitk.tou.edu.kz.**

Наши реквизиты:

НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	Приложение kaspi.kz Платежи – Образование –Оплата за ВУЗы – Заполняете все графы (в графе Факультет укажите «За публикацию в научном журнале, название журнала и серии»)
АО «Jýsan Bank» ИИК KZ57998FTB00 00003310 БИК TSESKZK A Кбе 16 Код 16 КНП 861	АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxxxx

С. К. Антикеева
Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомых компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.

2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХК ИППК ПК, 2001. – 152 с.

2 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.

4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университеті, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : suschnost, effectivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod к ecologicheskomu obrazovaniu i vospitaniu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.

4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.

5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p.

6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.

7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – T. 2 – P. 11–20.

8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKиPRO, 2005. – 230 p.

9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov к rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300-Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.

10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraigyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

С. К. Антикеева
Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ ҚҰЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзыреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзыреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзыреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзыреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзыреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзыреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теориялық модель, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeyeva
Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented

pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.

Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология» НАО «Торайгыров университет», Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

Публикационная этика научных журналов «Вестник Торайгыров университета», «Краеведение», «Наука и техника Казахстана»

Редакционная коллегия журналов «Вестник Торайгыров университет», «Краеведение» и «Наука и техника Казахстана» в своей работе придерживается международных стандартов по этике научных публикаций и учитывает информационные сайты ведущих международных журналов.

Редакционная коллегия журнала, а также лица, участвующие в издательском процессе в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (использование недостоверных сведений, изготовление данных, плагиат и др.), обеспечения общественного признания научных достижений обязаны соблюдать этические нормы и стандарты, принятые международным сообществом и предпринимать все разумные меры для предотвращения таких нарушений.

Редакционная коллегия ни в коем случае не поощряет неправомерное поведение (плагиат, манипуляция, фальсификация) и приложит все силы для предотвращения наступления подобных случаев. В случае, если редакционной коллегии станет известно о любых неправомерных действиях в отношении опубликованной статьи в журнале или в случае отрицательного результата экспертизы редколлегий статья отклоняется от публикации.

Редакционная коллегия не должна раскрывать информацию о принятых к опубликованию рукописей третьим лицам, не являющимся рецензентами, потенциальными рецензентами, членами редакционной коллегии, работниками типографии. Неопубликованные данные, полученные из рукописей, не должны использоваться в личных исследовательских целях без письменного разрешения автора.

Ответственность экспертов (рецензентов)

Рецензенты должны давать объективные суждения и указывать на соответствующие опубликованные работы, которые еще не цитируются. К рецензируемым статьям следует обращаться конфиденциально. Рецензенты будут выбраны таким образом, чтобы не было конфликта интересов в отношении исследования, авторов и / или спонсоров исследования.

Ответственность авторов

Ответственность за содержание работы несет автор. Авторы обязаны вносить исправления, пояснения, опровержения и извинения, если такие имеются.

Автор не должен представлять статью, идентичную ранее опубликованной в другом журнале.В частности, не принимаются переводы на английский либо немецкий язык статей, уже опубликованных на другом языке.

В случае обнаружения в рукописи статьи существенных ошибок автор должен сообщить об этом редактору раздела до момента подписи в печать оригинал-макета

номера журнала. В противном случае автор должен за свой счет исправить все критические замечания.

Направляя статью в журнал, автор осознаёт указанную степень персональной ответственности, что отражается в письменном обращении в редакционную коллегию Журнала.

Теруге 01.12.25 ж. жіберілді. Басуға 30.12.25 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
328 Mb RAM
Шартты баспа табағы 30,96 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4463

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz
nitk.tou.edu.kz