



**С. Торайғыров**  
атындағы

**ПМУ-дің 50 жылдық**  
**мерейтойына**  
арналады

# ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ МЕН ТЕХНИКАСЫ

С. ТОРАЙҒЫРОВ АТЫНДАҒЫ ПАВЛОДАР МЕМЛЕКЕТТІК  
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

Адрес редакции:  
140008, г. Павлодар,  
ул. Ломова, 64.  
Тел.: (7182) 67-36-69  
(7182) 45-38-60  
Факс: (7182) 45-11-23  
E-mail: publish@psu.kz

## МАЗМҰНЫ

<b>А.В. Богомолов, Р.И. Сержанов, П.О. Быков</b> Үздіксіз құю дайындамаларды пішіндеу алюминий қорытпаларында үлгілеу орындалған.....	7
<b>А.В. Богомолов, П.О. Быков, Р.И. Сержанов</b> Үздіксіз құю дайындамаларды пішіндеу үрдісінің физикалық үлгілеу орындалған.....	11
<b>И.В. Брейдо, Л.И. Дайч</b> Астатикалық реттеуішті тұрақты тоқтың төртквadrantтық электр жететінің менгеру жүйесінің зерттеуі.....	16
<b>И.В. Брейдо, Н.И. Карасев, А.А. Калинин</b> Гидродинамикалық жылыту тиімді параметрлерін таңдау.....	21
<b>И.В. Брейдо, О.А. Ющенко</b> Үздіксіз ыстық мырыштауды сызықтың тік жинақтағышының электромеханикалық жүйесінің өңдеуі.....	28
<b>С.К. Елмуратов</b> Үлестірілген және жұмылған жүктеменің әрекеті арқасындағы ортотропты пластиналардың динамикасы.....	35
<b>О.Т. Ибраева, И.К. Ибраев, М.М. Сүйіндіков</b> 1400 суық илемді тұғырдың майқұрамды қалдықтарын регенерациялау.....	39
<b>О.Т. Ибраева, М.М. Сүйіндіков</b> Өнеркәсіптің металлургиялық және тау-кен салаларындағы қорлар мәселесі және оларды шешу жолдары.....	44
<b>Ж.Ж. Камзин, Р.В. Пак, И.К. Ибраев, М.М. Сүйіндіков</b> Электродит-глиноземді балқымада глиноземнің ерігіштігі мақаласына.....	51

Арын Е.М., д.э.н., профессор (главный редактор);  
Утегулов Б.Б., д.т.н., профессор (зам. гл. редактора);  
Ельмуратова А.Ф., к.т.н., доцент (отв. секретарь);

**Члены редакционной коллегии:**  
Бороденко В.А., д.т.н., доцент;  
Глазырин А.И., д.т.н., профессор;  
Даукеев Г.Ж., к.т.н., доцент;  
Ельмуратов С.К., д.т.н., профессор;  
Ергожин Е.Е., д.х.н., профессор;  
Захаров И.В., д.т.н., доцент;  
Каракаев А.К., д.т.н., профессор;  
Кислов А.П. к.т.н., доцент;  
Клецель М.Я. д.т.н., профессор;  
Кудерин М.К. д.т.н., доцент;  
Мансуров З.А., д.х.н., профессор;  
Мурзагулова К.Б., д.х.н., профессор;  
Новожилов А.Н., д.т.н., профессор;  
Рустемова Г.Р., д.м.н., доцент;  
Сапаров К.Т., к.г.н., доцент;  
Сулеев Д.К., д.т.н., профессор;  
Украинец В.Н., д.т.н., доцент;  
Айтжанова Д.Н.(тех. редактор).

<b>А.Л. Қасенов, С. Д. Тоқаев, Т.М. Жақупов</b> Дисперстік материалдың үстінен дымкылды өшіруді зерттеу.....	56
<b>А.Л. Қасенов, С.Д. Тоқаев, Т.М. Жақупов</b> Ауылшаруашылық мәдениеттерінің кептіру амалы және оны жүзеге асыру қондырғысы.....	61
<b>В.А. Козионов</b> Ірі көлемді топырақтың компрессиондық тығыздығының математикалық моделі.....	64
<b>В.А. Козионов, О.В. Тарасова</b> Ірі қиыршықты құрамы бар балшықты топырақтағы қалыптың соңғы элементтік талдауы .....	70
<b>С.Х. Қойбағаров, Д.Т. Жайлаубаев</b> Дисперсті ортада ағу кезіндегі жылумасса алмасу.....	76
<b>В.С. Копырин, Б.Б. Утегулов, С.С. Исеиов</b> Алгоритмдардың өңдеуі құрылғы жұмыстары екі қозғалтқышты жылдамдықты автоматты басқарулары асинхрондық электр жетегінде.....	80
<b>М.К. Кудерин, В.А. Козионов, Б.А. Нуркин</b> Бетон беріктігін заманауи бұзбай бақылау әдістерін кешенді қолданудың тәжірибесі. ....	89
<b>В.И. Петуров</b> Чита қ. 6, 10 кВ тарату электрлік тораптар элементтерінің бұзылыстарының спектралды талдау.....	95
<b>В.И. Петуров</b> Ресей электрэнергетикасының дамуын қамтамасыз ету қаділік және білімдік қиыншылықтары.....	97
<b>В.В. Рындин</b> Қозғалыс және заттың ағымдарының қарқындылығын сипаттайтын шамалардың терминдері мен белгілерін жүйелеу.....	99
<b>Г.Г. Таткеева, Б.А. Жаутиков</b> Өнеркәсіптік метанды табу үшін үлгі .....	110
<b>А.К. Түрсүнбаева, А.Д. Маусымбаева</b> Термодинамика ұсақталған кендерді 3 металдарды үймелік сілтіден айыру.....	115
<b>С.В. Тютрина</b> Энергетиканың кәсіпорындардың ағынды және айналмалы сулардағы органикасиликаттық косымшыларға ықпал ету физико-химикалық әдістердің әсері.....	127
<b>Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов, А.Б. Уахитова, Б.М. Бегентаев</b> АҚ “Майкаинзолото” ”Күрделі” шахтада кернеуі 1000 В дейін электр тарапта электр қауіпсіздігі деңгейі жоғарылауымен шаралардың өңдеуі.....	130
<b>Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов, А.Б. Уахитова, Б.М. Бегентаев</b> АҚ “Майкаинзолото” ”Күрделі” шахтада кернеуі 1000 В дейін тарапта негізгі параметрлерінің және жерге бір фазалы тұйықталу токтың мағыналары.....	137
Біздің авторлар.....	141
Авторлар үшін ереже.....	143

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>А.В. Богомолов, Р.И. Сержанов, П.О. Быков</b> Моделирование сдвигового обжатия непрерывнолитых заготовок на алюминиевых деформируемых сплавах.....	7
<b>А.В. Богомолов, П.О. Быков, Р.И. Сержанов</b> Физическое моделирование сдвигового обжатия непрерывнолитых заготовок.....	11
<b>И.В. Брейдо, Л.И. Дайч</b> Разработка системы управления четырехквadrантным электроприводом постоянного тока с астатическим регулятором.....	16
<b>И.В. Брейдо, Н.И. Карасев, А.А. Калинин</b> Выбор оптимальных параметров гидродинамических нагревателей.....	21
<b>И.В. Брейдо, О.А. Ющенко</b> Разработка электромеханической системы вертикального накопителя линии непрерывного горячего цинкования.....	28
<b>С.К. Ельмуратов</b> Динамика ортотропных пластин при действии распределенных и сосредоточенных нагрузок.....	35
<b>О.Т. Ибраева, И.К. Ибраев, М.М. Суюндиков</b> Регенерация маслосодержащих отходов шестиклетьевого стана холодной прокатки 1400.....	39
<b>О.Т. Ибраева, М.М. Суюндиков</b> Проблема ресурсов в горно-металлургическом комплексе.....	44
<b>Ж.Ж. Камзин, Р.В. Пак, И.К. Ибраев, М.М. Суюндиков</b> Растворимость глинозема в электролит-глиноземном расплаве.....	51
<b>А.Л. Касенов, С.Д. Токаев, Т.М. Жакупов</b> Изучение удаления влаги из слоя дисперсных материалов.....	56
<b>А.Л. Касенов, С.Д. Токаев, Т.М. Жакупов</b> Способ сушки сельскохозяйственных культур и установка для его осуществления.....	61
<b>В.А. Козионов</b> Математическое моделирование компрессионной сжимаемости валунно-глыбовых грунтов с заполнителем .....	64
<b>В.А. Козионов, О.В. Тарасова</b> Конечноэлементный анализ осадок фундаментов на глинистых грунтах с крупнообломочными включениями .....	70
<b>С.Х. Койбагаров, Д.Т. Жайлаубаев</b> Тепломассообмен в неоднородном слое капиллярно – пористого материала.....	76

<b>В.С. Копырин, Б.Б. Утегулов, С.С. Исенов</b>	
Разработка алгоритмов работы устройства автоматического управления скорости в двухдвигательном асинхронном электроприводе.....	80
<b>М.К. Кудерин, В.А. Козионов, Б.А. Нуркин</b>	
Опыт комплексного использования современных неразрушающих методов контроля прочности бетонов.....	89
<b>В.И. Петуров</b>	
Спектральный анализ повреждаемости элементов распределительных электрических сетей 6, 10 кВ г. Читы.....	95
<b>В.И. Петуров</b>	
Проблемы кадрового и образовательного обеспечения развития электроэнергетики России.....	97
<b>В.В. Рындин</b>	
Систематизация терминов и обозначений величин, характеризующих интенсивность потоков вещества и движения (энергии) .....	99
<b>Г.Г. Таткеева, Б.А. Жаутиков</b>	
Модель для промышленной добычи метана.....	110
<b>А.К. Турсунбаева, А.Д. Маусымбаева</b>	
Термодинамика дробления руды при кучном выщелачивании металлов 3.....	115
<b>С.В. Тютрица</b>	
Влияние физико-химических методов воздействия на органосиликатные примеси в сточных и оборотных водах предприятий энергетики.....	127
<b>Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов, А.Б. Уахитова, Б.М. Бегентаев</b>	
Разработка мероприятий по повышению уровня электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В шахты «Капитальная» АО «Майкаинзолото».....	130
<b>Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов, А.Б. Уахитова, Б.М. Бегентаев</b>	
Числовые значения параметров изоляции и тока замыкания на землю в электрической сети напряжением до 1000 В шахты «Капитальная» АО «Майкаинзолото».....	137
Наши авторы.....	141
Правила для авторов.....	143

## CONTENT

<b><i>P.O.Bykov, A.V. Bogomolov, R.I.Serghanov</i></b>	
Modeling of the shift reduction continuously cast stocking up on alu-minum deformed alloy.....	7
<b><i>P.O.Bykov, A.V. Bogomolov, R.I.Serghanov</i></b>	
Modeling of the shift reduction continuously cast stocking up on alu-minum deformed alloy .....	11
<b><i>I.V. Breido, L.I. Daych</i></b>	
System engineering of management by four square electric drive of the direct current with the astatic regulator.....	16
<b><i>I.V. Breido, N.I. Karasev, A.A. Kalinin</i></b>	
Choice of optimal parameters hydrodynamic heater.....	21
<b><i>I.V.Breido, O.A.Yushchenko</i></b>	
Development of the electromechanics system of vertical store of line of the con-tinuous hot zinc-plating.....	28
<b><i>S.K. Yelmuratov</i></b>	
Dynamics of orthotropic plates during the action of the distributed and concentrated loadings.....	35
<b><i>O.T. Ibrayeva, I.K.Ibrayev, M.M.Suyundikov</i></b>	
Regeneration of the oil separator of 1400 sixcrate cold rolling mill.....	39
<b><i>O.T. Ibrayeva, M.M. Suyundikov</i></b>	
Resource problemes in the metallurgy and mining industries and solutions.....	44
<b><i>Zh.Zh. Kamzin, R.B. Pack, I.K. Ibraev, M.M. Suyundikov</i></b>	
Solubility alumina in electrolyte-alumina melting.....	51
<b><i>A.L. Kasenov S.D. Tokaev, T.M.Zhakupov</i></b>	
Studying of removal of a moisture from a layer of disperse materials.....	56
<b><i>A.L. Kasenov S.D. Tokaev, T.M. Жақынов</i></b>	
The way of drying agricultural culture and installation for its realization.....	61
<b><i>V.A. Kozionov</i></b>	
Mathematic modeling of compressibility for float stone and blocky grounds with fillers.....	64
<b><i>V.A. Kozionov, O.V. Tarasova</i></b>	
Finite element analysis of foundation settlement on clay soils with large frag-mental usions.....	70
<b><i>S. H. Koibagarov, D. T. Zhaylaubaev</i></b>	
Heat at currents in capillary environments.....	76

<b><i>B.C. Kopyrin, B.B. Utegulov, S.S. Issenov</i></b>	
Development algorithm work device autocontrol to velocities in double-motor anisochronous electric drive.....	80
<b><i>M.K. Kuderin, B.A. Kozionov, B.A. Nurkin</i></b>	
Complex use experience of modern non-destructive methods of concrete strength control.....	89
<b><i>V.I. Peturov</i></b>	
Spectral analysis of the damages element distributing electric networks 6, 10 kV Chita.....	95
<b><i>V.I. Peturov</i></b>	
Problems trained and educational ensuring the development of energy to Russia.....	97
<b><i>V.V. Ryndin</i></b>	
Systematization of the terms and labels of magnitudes, describing intensity of streams of substance and motion (energy).....	99
<b><i>G.G. Tatkeeva, B.A. Zhautikova</i></b>	
Model for industrial mining the methane.....	110
<b><i>A.K. Tursynbayeva, A.D. Mausymbaeva</i></b>	
Thermodynamics of ore crushing at heap leaching of 3 metals.....	115
<b><i>S.V. Tytyrina</i></b>	
Influence physico-chemical methods of the influence on organic silicate admixture in drainage and circulating water enterprise energy.....	127
<b><i>B.B. Utegulov, A.B. Utegulov, A.B. Uahitova, B.M. Begentayev</i></b>	
Action development on raising a level electrical safety in networks by voltage before 1000 V mines «Capital» SC «Майкаинзолото».....	130
<b><i>B.B. Utegulov, A.B. Utegulov, A.B. Uahitova, B.M. Begentayev</i></b>	
Action development on raising a level electrical safety in networks by voltage before 1000 V mines «Capital» SC «Майкаинзолото».....	137
Our authors.....	141
Rules for authors.....	143

А.В. Богомолов, Р.И. Сержанов,  
П.О. Быков

УДК 669.412

*Павлодарский государственный университет  
им. С.Торайгырова*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВОГО ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВАХ

*Бұл мақалада өстік ақаулар мен құрылымның біртектілігі бойынша сапаны арттыру мақсатымен, дамындамаларды үздіксіз құю машинасының екінші ретті суыту аймағында жасалатын үздіксіз құйылған дайындаманы ауытқымалы қысудың мүмкіншілігін зерттеу нәтижелері ұсылған.*

*In article results of modeling shift reduction continuously cast stocking up are presented in zone of the secondary cooling the machine unceasing litho stocking up with chain of increasing to homogeneity of the structure on aluminum deformed alloy.*

Теоретический анализ показал возможность более интенсивного залечивания осевых усадочных дефектов в процессе «мягкого» обжатия в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ при меньших степенях и усилиях обжатия за счет использования сдвиговых деформаций [1,2].

Предложено устройство для моделирования сдвигового «мягкого» обжатия заготовок с жидкой сердцевиной при производстве непрерывнолитой заготовки, на которое получено положительное решение на выдачу инновационного патента РК [3]. Разработанная лабораторная установка для сдвигового обжатия непрерывнолитых заготовок в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ внедрена в учебный процесс ПГУ им. С. Торайгырова.

В лабораторных условиях проведены эксперименты по моделированию сдвигового обжатия непрерывнолитых заготовок с использованием алюминиевых деформируемых сплавов следующего химического состава: 0,3%Si, 0,4%Cu, 2,0%Mg, 0,25%Zn, 0,04%Pb, 0,7%Fe, 1,5%Mn, 0,1%Cr, 0,08%Ti, 0,02%Sn, остальное Al. Из сплава изготавливали модельные слитки сечением 17×17 мм. В модельных слитках в осевой части просверливались отверстия диаметром 2 мм, которые моделировали осевую пористость. Модельные слитки перед обжатием нагревали до температуры 420 °С.

Обжатие осуществляли на лабораторной установке для обжатия заготовок в цилиндрических и конических валках. Обжатие модельного слитка осуществлялось в два прохода. При этом сдвиговое обжатие в первый проход осуществляли по несколько иной схеме, а именно с получением при первом проходе геометрической формы модельного слитка в виде усеченного конуса и дальнейшем восстановлением геометрии слитка во втором проходе.

Результаты измерения представлены в таблице 1 (площадь поперечного сечения модельного слитка до обжатия равна 289 мм<sup>2</sup>, отверстия – 3,14 мм<sup>2</sup>).

Обработку результатов экспериментов проводили аналогично экспериментам на свинцовых образцах.

Было получено уравнение регрессии в виде линейной зависимости типа

$$y = k_1x_1 + k_2x_2 + b \quad (1)$$

где  $b$  – свободный член уравнения;

$k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты переменных  $x_1$  и  $x_2$ ;

$x_1$  и  $x_2$  – переменные уравнения.

Принимая угол сдвига за  $x_1$  и коэффициент вытяжки за  $x_2$  получили уравнение регрессии для определения коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка и коэффициента вытяжки ( $\mu$ ) модельного слитка.

$$\psi = 3,02 - 0,19\alpha - 1,71\mu \quad (2)$$

Далее был определен коэффициент корреляции  $R_2 = 0,96$ , что показывает хорошую сходимость результатов. Расчетный критерий Фишера  $F_p = 0,97$ , что меньше  $F_{табл}$ . Таким образом, модель адекватна.

Аналогично были построены графики зависимости коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка для различных коэффициентов вытяжки ( $\mu$ ). Графики, уравнения регрессии, коэффициенты корреляции показаны на рисунках 1,2.

Таблица 1

Результаты обжатия модельных слитков из алюминиевых деформируемых сплавов

Условия эксперимента		Размеры модельного слитка после обжатия, мм	Поперечное сечение после обжатия, мм <sup>2</sup>		Коэффициент вытяжки модельного слитка	Коэффициент закрытия отверстия
величина обжатия, мм	угол сдвига по каждой стороне слитка, град		модельный слиток	отверстие		
2	0	17x15	255,0	3,00	1,13	1,08
2	0	17x15	255,0	3,10	1,13	1,12
2	0	17x15	255,0	3,20	1,13	1,15
2	0	17x15	255,0	3,12	1,13	1,13
2	0	17x15	255,0	3,08	1,13	1,11
4	0	17x13	221,0	1,82	1,31	0,76
4	0	17x13	221,0	1,80	1,31	0,75
4	0	17x13	221,0	1,76	1,31	0,73
4	0	17x13	221,0	1,86	1,31	0,77
4	0	17x13	221,0	1,82	1,31	0,76
2	2	17x15	255,0	1,82	1,13	0,66

2	2	17x15	255,0	1,86	1,13	0,67
2	2	17x15	255,0	1,78	1,13	0,64
4	2	17x13	221,0	1,08	1,31	0,45
4	2	17x13	221,0	1,20	1,31	0,50
4	2	17x13	221,0	1,10	1,31	0,46

В результате выполнения экспериментов по моделированию обжатия непрерывнолитых заготовок в процессе непрерывного литья по различным схемам обжатия, с целью улучшения качества осевой зоны непрерывнолитых заготовок на алюминиевых деформируемых сплавах выявлено, что степень залечивания осевых усадочных дефектов при сдвиговом обжатии выше, чем при линейном обжатии.

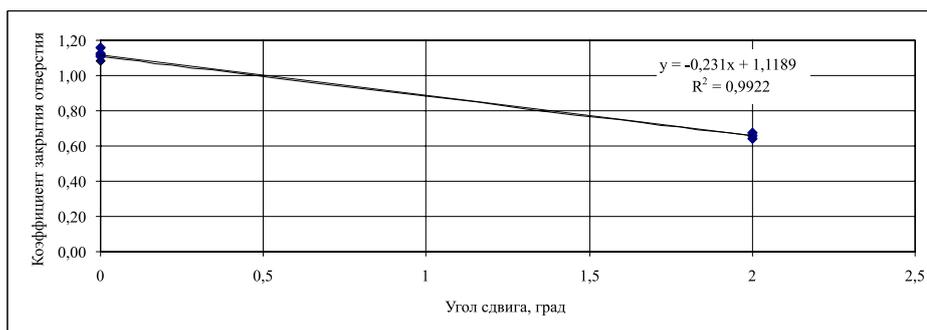


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка из алюминиевых деформируемых сплавов при  $\theta = 1,13$  (критерий Фишера  $F = 0,99$ )

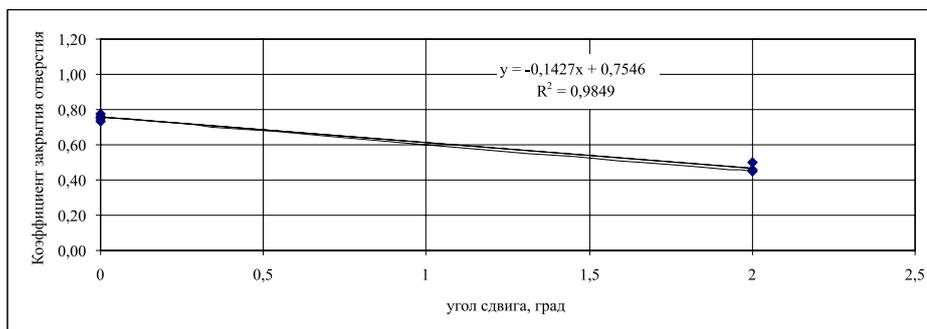


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка из алюминиевых деформируемых сплавов при  $\theta = 1,31$  (критерий Фишера  $F = 0,98$ )

На следующем этапе исследований была поставлена задача определения максимально возможной степени обжатия модельного слитка в конце периода затвердевания при сдвиговой схеме обжатия без появления трещин.

Исследование макроструктуры модельных слитков показало:

1. В осевой части слитка обжатого по сдвиговой схеме деформации отсутствует осевая рыхлость.

2. Усадочная раковина в слитке обжатом по сдвиговой схеме деформации распространяется на меньшую глубину чем в слитке без обжатия.

3. Внутренние трещины в осевой зоне слитка отсутствуют при степени деформации до 5% и малых углах сдвига (не более  $15 - 18^\circ$ ). При степени деформации свыше 5% и углах сдвига около  $18^\circ$  периодически наблюдается развитие трещин выходящих на поверхность слитка, что можно объяснить потерей пластичности сплава.

Выводы: 1. В результате регрессионного анализа получены зависимости для определения коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка и коэффициента вытяжки ( $\epsilon$ ) модельного слитка.

2. На основании результатов физического моделирования на алюминиевых деформируемых сплавах установлено, что использование сдвигового обжатия непрерывнолитых заготовок с жидкой сердцевиной с целью снижения осевой усадочной пористости возможно при малых степенях обжатия (до 5%) и малых углах сдвига (до  $18^\circ$ ). С дальнейшим ростом обжатия и увеличением углов сдвига возрастает опасность развития трещин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Инновационный патент на изобретение №21195 «Способ и устройство для получения заготовок на машине непрерывного литья заготовок». / Быков П.О., Канаев А.Т., Сержанов Р.И., Богомолов А.В., Тусупбекова М.Ж., Кусманова Д.Р. заявл 21.04.2008 ; опубл 15.05.2009, бюл №5. – 3 с. : ил.

2. Быков П.О., Никитин Г.М. Способ повышения качества и эффективности производства стальных непрерывных слитков. Материалы международной научной конференции «Первые Ержановские чтения» - Павлодар: ПГУ им. С.Торайгырова, 2004. – Т.1. – с. 308 – 311.

3. Заключение о выдаче инновационного патента на изобретение. Заявка № 2009/1232.1 «Устройство для моделирования процесса прокатки при производстве непрерывно-литой заготовки». / Сержанов Р.И., Быков П.О., Богомолов А.В.

А.В. Богомолов, П.О. Быков,

УДК 669.412

Р.И. Сержанов

*Павлодарский государственный университет  
им. С.Торайгырова*

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВОГО ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

*Бұл мақалада өстік ақаулар мен құрылымның біртектілігі бойынша сапаны арттыру мақсатымен, дамындамаларды үздіксіз құю машинасының екінші ретті суыту аймағында жасалатын үздіксіз құйылған дайындаманы ауытқымалы қысудың мүмкіншілігін зерттеу нәтижелері ұсылған.*

*In article Results of physical modeling by shift reduction continuously cast stocking up are presented in zone of the secondary cooling the machine unceasing litho stocking up with chain of increasing her quality on axial defect and homogeneity of the structure*

Известно, что обжатие непрерывнолитых заготовок в конечный период затвердевания залечивает осевую пористость и способствует повышению однородности структуры [1-3]. При этом критической величиной обжатия является 3%, после чего в слитке развиваются трещины. Повысить эффективность обжатия можно за счет реализации сдвиговой схемы обжатия непрерывнолитого слитка в конце периода затвердевания, которая должна обеспечить более интенсивное залечивание осевой пористости и более высокие степени обжатия без появления трещин.

Для обоснования предлагаемого способа сдвигового обжатия непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения в области окончания жидкой лунки необходимо экспериментально определить:

- степень залечивания осевой пористости при различных схемах обжатия;
- максимальную степень обжатия до появления трещин в слитке в конце периода затвердевания при различных схемах обжатия.

Процесс сдвигового обжатия непрерывнолитых заготовок в конце периода затвердевания моделировали в ряде экспериментов. В них сравнивали степень залечивания осевой пористости при различных схемах обжатия, а также максимальную степень обжатия до появления трещин в слитке в конце периода затвердевания.

Для моделирования сдвигового обжатия использовался сплав на основе свинца с висмутом (Pb – Bi). Сплавы свинца широко используются для моделирования деформации стали при температурах деформации [4].

Из модельного сплава изготавливались слитки сечением 17х17 мм. В модельных слитках в осевой части просверливались отверстия диаметром 2 мм, которые моделировали осевую пористость (рисунок 1). Геометрические размеры модельного слитка и осевой усадочной раковины выбирали в масштабе 1:10 к реальному стальному непрерывно-

литому слитку 150×150 мм и максимальному диаметру усадочной раковины (диаметр 20 мм), выявленной в процессе анализа качества непрерывнолитых заготовок ПФ ТОО «Кастинг».

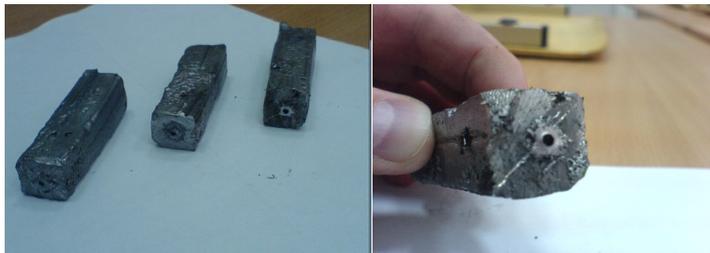


Рисунок 1 – Модельные слитки из свинцового сплава

Обжатие модельного слитка в цилиндрических валках осуществлялось в два прохода. Обжатие модельного слитка в конических валках осуществлялось также в два прохода. В первый проход слиток обжимался со сдвигом и получением поперечного сечения модельного слитка в виде параллелограмма, в процессе второго прохода модельному слитку восстанавливали геометрию.

Размеры модельного слитка после обжатия измерялись штангенциркулем, отверстия с помощью микроскопа МПБ-2 (увеличение ×24) с ценой деления 0,05 мм.

Поведение искусственного дефекта описывалось с помощью коэффициента закрытия отверстия  $\psi$ , представляющего собой произведение коэффициента вытяжки на отношение площадей поперечного сечения отверстия до и после деформации, т.е.

$$\psi = \frac{F'_{oms}}{F^0_{oms}} \mu \quad (1)$$

где  $F^0_{oms}$  и  $F'_{oms}$  – площадь отверстия до и после суммарного обжатия;  
 $\mu$  – коэффициент вытяжки.

Коэффициент  $\psi$  показывает соотношение между уменьшением площадей поперечных сечений дефекта и заготовки, при  $\psi > 1$  площадь сечения дефекта уменьшается менее интенсивно по сравнению с площадью сечения заготовки и устранение несплошностей недостижимо. Полному залечиванию соответствует  $\psi = 0$ .

Коэффициент вытяжки определялся по формуле

$$\mu = \frac{F^0_{cl}}{F'_{cl}} \quad (2)$$

где  $F^0_{cl}$  и  $F'_{cl}$  – площадь модельного слитка до и после суммарного обжатия.

Далее по полученным значениям высчитывали площадь и подсчитывали коэффициент вытяжки модельного слитка и коэффициент закрытия отверстия.

Результаты обжатия модельных слитков в цилиндрических и конических валках представлены в таблице 1 (площадь поперечного сечения модельного слитка до обжатия равна 289 мм<sup>2</sup>, отверстия – 3,14 мм<sup>2</sup>).

Результаты обжатия модельных слитков из свинцовых сплавов

Условия эксперимента		Размеры модельного слитка после обжатия, мм	Поперечное сечение после обжатия, мм <sup>2</sup>		Коэффициент вытяжки модельного слитка	Коэффициент закрытия отверстия
величина обжатия, мм	угол сдвига, град		модельный слиток	отверстие		
1	0	17x16	272,0	2,36	1,06	0,80
1	0	17x16	272,0	2,31	1,06	0,78
1	0	17x16	272,0	2,60	1,06	0,88
1	0	17x16	272,0	2,45	1,06	0,83
1	0	17x16	272,0	2,50	1,06	0,85
2	0	17x15	255,0	1,72	1,13	0,62
2	0	17x15	255,0	1,64	1,13	0,59
2	0	17x15	255,0	1,78	1,13	0,64
2	0	17x15	255,0	1,81	1,13	0,65
2	0	17x15	255,0	1,86	1,13	0,67
3	0	17,5x14	245,0	1,20	1,18	0,45
3	0	17,5x14	245,0	1,40	1,18	0,53
3	0	17,5x14	245,0	1,58	1,18	0,59
3	0	17,5x14	245,0	0,90	1,18	0,34
3	0	17,5x14	245,0	0,98	1,18	0,37
4	0	18x13	234,0	0,00	1,24	0,00
4	0	18x13	234,0	0,00	1,24	0,00
4	0	18x13	234,0	0,00	1,24	0,00
4	0	18x13	234,0	0,00	1,24	0,00
4	0	18x13	234,0	0,00	1,24	0,00
1	3	17x16	272,0	2,20	1,06	0,74
1	3	17x16	272,0	2,18	1,06	0,74
1	3	17x16	272,0	2,00	1,06	0,68
2	3	17x15	255,0	1,62	1,13	0,58
2	3	17x15	255,0	1,64	1,13	0,59
2	3	17x15	255,0	1,50	1,13	0,54
3	3	17,5x14	245,0	0,94	1,18	0,35
3	3	17,5x14	245,0	0,80	1,18	0,30
3	3	17,5x14	245,0	0,92	1,18	0,35
1	7	17x16	272,0	1,82	1,06	0,62
1	7	17x16	272,0	1,80	1,06	0,61
1	7	17x16	272,0	1,78	1,06	0,60
2	7	17x15	255,0	1,48	1,13	0,53
2	7	17x15	255,0	1,34	1,13	0,48
2	7	17x15	255,0	1,40	1,13	0,51
3	7	17,5x14	245,0	0,38	1,18	0,14
3	7	17,5x14	245,0	0,44	1,18	0,17
3	7	17,5x14	245,0	0,52	1,18	0,20

1	10	17x16	272,0	1,76	1,06	0,60
1	10	17x16	272,0	1,86	1,06	0,63
1	10	17x16	272,0	1,82	1,06	0,62
2	10	17x15	255,0	1,32	1,13	0,48
2	10	17x15	255,0	1,22	1,13	0,44
2	10	17x15	255,0	1,26	1,13	0,45
3	10	17,5x14	245,0	0,10	1,18	0,04
3	10	17,5x14	245,0	0,12	1,18	0,05
3	10	17,5x14	245,0	0,16	1,18	0,06
1	30	17x16	272,0	0,28	1,06	0,09
1	30	17x16	272,0	0,40	1,06	0,14
1	30	17x16	272,0	0,38	1,06	0,13
2	30	17x15	255,0	0,00	1,13	0,00
2	30	17x15	255,0	0,00	1,13	0,00
2	30	17x15	255,0	0,00	1,13	0,00

Из табличных данных видно, что полное закрытие отверстия диаметром 2 мм ( $\psi = 0$ ), моделирующего усадочную пористость, при отсутствии сдвигового обжатия достигается при коэффициенте вытяжки  $\theta = 1,24$ . При использовании сдвигового обжатия полное закрытие отверстия достигается при меньшем коэффициенте вытяжки (при  $\alpha = 300$ ,  $\mu = 1,13$ ).

Для обработки результатов моделирования использовали регрессионный анализ в пакете прикладных программ для обработки статистических данных Microsoft Office Excel 2007. Было получено уравнение регрессии в виде линейной зависимости типа

$$Y = k_1x_1 + k_2x_2 + b \quad (3)$$

где  $b$  – свободный член уравнения;

$k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты переменных  $x_1$  и  $x_2$ ;

$x_1$  и  $x_2$  – переменные уравнения.

Принимая угол сдвига за  $x_1$  и коэффициент вытяжки за  $x_2$  получили уравнение регрессии для определения коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка и коэффициента вытяжки ( $\mu$ ) модельного слитка.

$$\psi = 5,26 - 0,02\alpha - 4,15\mu \quad (4)$$

Был определен коэффициент корреляции, который имеет значение  $R^2 = 0,89$ , что показывает хорошую сходимость результатов.

Далее была проверена адекватность модели, рассчитан критерий Фишера и сверен с табличными данными. Расчетный критерий Фишера  $F_p = 0,53$ , что меньше  $F_{табл}$  [5]. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности предложенной модели.

Также для различных коэффициентов вытяжки ( $\mu$ ) были построены графики зависимости коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка и получены уравнения регрессии, коэффициенты корреляции (рисунок 2).

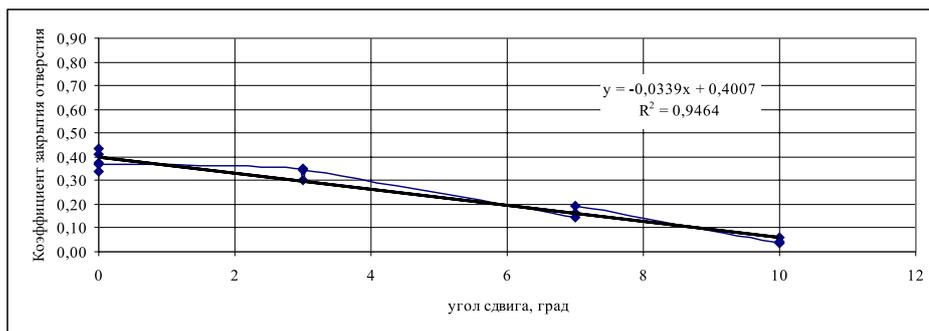


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка из свинцовых сплавов при  $\mu = 1,18$  (критерий Фишера  $F = 0,91$ )

Выводы: 1. В результате выполнения экспериментов по моделированию обжатия непрерывнолитых заготовок в процессе непрерывного литья по различным схемам обжатия, с целью улучшения качества осевой зоны непрерывнолитых заготовок на свинцовых сплавах выявлено, что степень залечивания осевых усадочных дефектов при сдвиговом обжатии выше, чем при линейном обжатии.

2. Получены зависимости для определения коэффициента закрытия отверстия ( $\psi$ ) от величины угла сдвига ( $\alpha$ ) модельного слитка и коэффициента вытяжки ( $\mu$ ) модельного слитка. Обработка достоверности результатов измерений и вычислений уравнения регрессии по критерию Фишера свидетельствует об адекватности предложенной модели.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов А.В., Быков П.О., Канаев А.Т., Сержанов Р.И. Улучшение структуры осевой зоны непрерывнолитых заготовок. – Материалы I Международной Казахстанско-Российско-Японской научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» ВКГТУ – Interactive Corp. – МИСиС (24-25 июня 2008г.) / Под ред. Проф. Г.М. Мутанова. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2008. – 764 с.

2. Меандров Л.В., Воронцов В.К., Погоржельский В.И. Совершенствование условий деформации непрерывнолитых слябов с целью улучшения качества проката.// Сталь, 1982, №3. – с. 43 – 45.

3. Инновационный патент на изобретение №21195 «Способ и устройство для получения заготовок на машине непрерывного литья заготовок». / Быков П.О., Канаев А.Т., Сержанов Р.И., Богомолов А.В., Тусупбекова М.Ж., Кусманова Д.Р. заявл. 21.04.2008 ; опубл. 15.05.2009, бюл. №5. – 3 с. : ил.

4. Найзабеков А.Б., Ашкеев Ж.А., Лежнев С.Н. Роль сдвиговых деформаций в закрытии внутренних дефектов.// Изв. Вузов. Черная металлургия, 1999 №10, с.20 – 22.

5. Шамельханова Н.А. Основы планирования эксперимента. – Алматы : КазНТУ, 2002. – 182 с.

И.В. Брейдо, Л.И. Дайч

УДК 62-83.621.679

*Карагандинский государственный  
технический университет*

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕТЫРЕХКВАДРАНТНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С АСТАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

*Бұл мақаланың қарауында төртквadrанттық тұрақты тоқтың дағды бойынша меңгеру ететін анықсыз логикалы негізінің реттеуіші электр жетегінің ерекшелігі.*

*In article features of construction of system of automatic control four square by the electric drive of a direct current with a regulator on the basis of indistinct logic are considered.*

Четырехквadrантный электропривод постоянного тока с тиристорным преобразователем обладает сложными динамическими характеристиками, связанными с нелинейными свойствами тиристорного преобразователя и необходимостью изменением направления тока в цепях якоря или возбуждения при переходе между двигательными и генераторными режимами. Также на динамику оказывает влияние наличие нелинейностей в двигателях постоянного тока и изменение его передаточной функции (объекта управления) при переходе из двигательных режимов в генераторные и обратно. Для обеспечения высоких показателей качества переходных процессов возможно применение адаптивных систем управления, изменяющих свою структуру или параметры при изменении рабочих режимов. Но синтез таких систем, характеризующихся нелинейными характеристиками отдельных звеньев и изменением их коэффициентов передачи, представляет определенные трудности.

Все это, с учетом изменяющихся электромагнитной и электромеханической инерционностей, делает необходимым применение «интеллектуальных» систем управления. В последнее время получили большое распространение нечеткие системы управления, позволяющие при минимальных данных об объекте регулирования и изменяющихся параметрах системы получить приемлемый вид переходных процессов. Нечеткие системы управления занимают промежуточное положение между классическими системами и искусственными нейронными системами. Однако, избыточность вариантов при построении нечетких систем и отсутствие разработанных методик построения регуляторов не позволяет широко использовать данный метод в четырехквadrантном электроприводе.

Динамика перехода между режимами в четырехквadrантном электроприводе с тиристорным преобразователем исследована также недостаточно. Как правило, анализируются отдельно двигательные и генераторные режимы (для тиристорных преобразователей).

В данной работе сформулированы требования к нечеткому регулятору для четырехквadrантного электропривода постоянного тока, разработаны методика и предложены принципы его построения.

Разрабатываемая система управления 4-х квадрантным электроприводом постоянного тока должна обеспечить:

- максимальное быстродействие;
- минимальное перерегулирование;
- нулевую ошибку регулирования частоты вращения;
- ограничение предельного тока двигателя;
- переход между режимами при изменении знака и величины момента на валу двигателя в пределах 4х квадрантов.

Предлагаемые в литературе системы управления с нечеткими регуляторами [1], [2], как правило, построены на основе типовой структуры замкнутой системы по отклонению, что позволяет получить астатическое регулирование только для систем с постоянным задающим воздействием. В качестве примеров рассматриваются систем стабилизации различных параметров – температуры [3], освещенности [4] и т.д. В этом случае отсутствует компенсация изменяющейся части ошибки по задающему воздействию. Для систем регулирования выходной координаты такой подход не позволяет получить нулевую ошибку при различных значениях задающего воздействия. Реализовать астатическую систему с нечетким регулятором можно различными способами, например, включив последовательно с нечетким регулятором пропорционально-интегральное звено.

Предложена астатическая система нечеткого регулирования, основанная на том, что основное управляющее воздействие формируется пропорционально заданным правилам, а пропорционально сигналу рассогласования формируется корректирующая часть сигнала управления по своим логическим правилам.

Такой подход позволяет получить как астатическую систему, так, при необходимости, и систему с статизмом любой величины и знака. Структура системы приведена на рисунке 1.

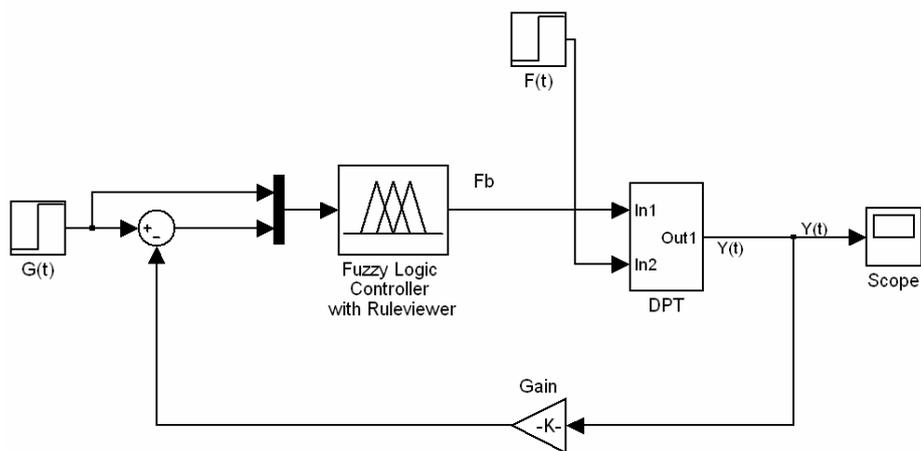


Рисунок 1 – Структурная схема с астатическим регулированием

С учетом требования работы в 4-х квадрантах нечеткий регулятор должен формировать и сигнал перехода между двигательными и генераторными режимами.

На рисунке 2 приведена структурная схема системы управления двигателем постоянного тока (ДПТ) с учетом всех вышеизложенных требований.

В многочисленных источниках по теории нечетких множеств [1], [2] хорошо представлены история развития и общие принципы. При попытке создания рабочих систем управления возникает ряд сложностей. В связи с большим разнообразием параметров, учитываемых при построении нечетких регуляторов: количества входных и выходных лингвистических переменных (контролируемых и управляющих параметров), количества термножеств для каждой из входных и выходных лингвистических переменных, вида функций принадлежности, соотношения между функциями принадлежности в каждом конкретном термножестве, возможности различных баз правил для одного процесса, возникает необходимость формирования рекомендаций по последовательности создания нечетких регуляторов для определенных областей применения.

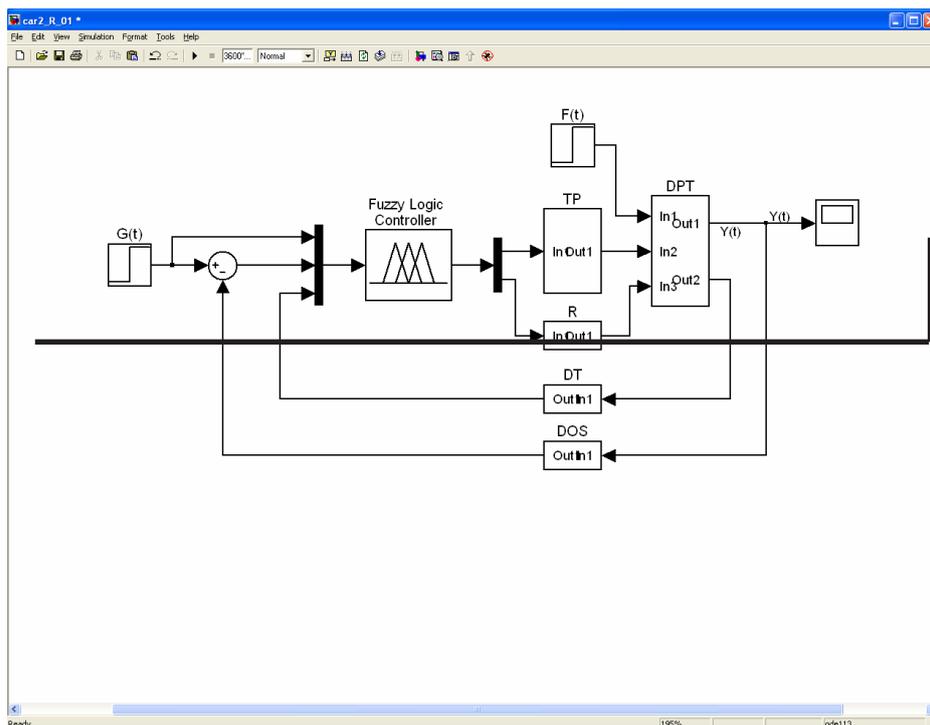


Рисунок 2 – Структурная схема разработанной системы управления ДПТ

Вначале для разрабатываемой системы управления, исходя из требований к заданному процессу, задаемся необходимым количеством лингвистических переменных (входных и выходных параметров). Для каждой лингвистической переменной создается термножество с определенным количеством функций принадлежности, их видом и взаимным расположением. Как правило, количество термов и соответствующих им функций принадлежности нечетное [2], [3], [4]. Минимальное количество функций принадлежности, имеющее практический интерес - 3. Для произвольного параметра это: параметр в норме, параметр меньше нормы, параметр больше нормы. При таком количестве термов (функций принадлежности) регулирование протекает с большими колебательностью, перерегулированием и скоростью изменения управляющего воздействия. При выборе пяти

функций принадлежности переходной процесс получается с меньшей колебательностью и перерегулированием. На динамику процесса регулирования существенное влияние оказывает соотношение между функциями принадлежности. Увеличение диапазона функций принадлежности от центрального термина к боковым позволяет при высоком быстродействии получить минимальное перерегулирование и колебательность, но при этом увеличивается скорость нарастания сигнала управления при больших отклонениях выходной величины от заданной. Дальнейшее увеличение количества термов в термножестве приводит к неоправданному увеличению базы правил и потере преимуществ нечетких регуляторов.

По результатам выполненного анализа сформулированы следующие требования к нечеткой системе управления:

1. В качестве контролируемых параметров выбираем сигналы управления, ошибки регулирования, скорости изменения ошибки, тока двигателя, текущего направления вращения.

2. Для сигнала управления и основного контролируемого параметра – частоты вращения выбираем по пять функций принадлежности соответствующих термножеств.

3. Для сигналов ошибки регулирования и скорости изменения ошибки достаточно выбрать по три функции принадлежности.

4. Для сигнала тока двигателя и сигнала текущего направления вращения выбираем по одной S-образной [3] функции принадлежности.

Следует отметить, что на динамику переходного процесса независимо от структуры нечеткого регулятора и выбранных термножеств существенное влияние оказывает разработанная база правил.

Моделирование системы проводилось в пакете расширения Fuzzy Logic Toolbox входящего в MATLAB.

Создание базы правил необходимо проводить последовательно, начиная с модели одноконтурной системы для сигнала частоты вращения. Затем проверяется работоспособность системы во всем диапазоне изменения задающего и возмущающего воздействий. Первичная проверка правильности созданной базы правил проводится в отладочном окне редактора FIS, входящего в пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox. Изменение значения входной координаты в выбранном диапазоне и анализ изменения выходной координаты позволяет оценить адекватность разработанной модели и работоспособности нечеткого регулятора. Для оценки адекватности модели применяется метод экспертных оценок. При удовлетворительном характере переходного процесса дополняем базу правил условиями для сигнала задающего воздействия, затем для сигнала тока двигателя. Оценка адекватности модели проводится аналогично модели одноконтурной системы.

Аналогично проводим создание базы правил для следующей выходной переменной, формирующей команду на переход в генераторные режимы.

После создания базы правил для всех переменных необходимо провести итоговое моделирование системы управления в особых режимах работы 4-х квадрантного электропривода и по переходным характеристикам оценить качество регулирования и соответствие работы системы заданным требованиям.

К особым режимам работы можно отнести работу системы при значениях частоты вращения 20% и 80% от номинального значения. В каждом из режимов оцениваем реакцию системы на 50% и 100% - ее изменение момента отдельно в сторону увеличения и уменьшения. Аналогично анализируем реакцию системы на ступенчатое изменение задающего воздействия.

Таким образом, в результате проведенных исследований и выполненной работы предложена структура нечеткой системы управления, предложены методы построения базы логических правил нечеткого регулятора и разработаны рекомендации оценки работоспособности систем управления с регуляторами данного типа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. Учебное пособие. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2005. – 200 с.
2. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВПетербург, 2005. – 736 с.: ил.
3. Круглов В.В., Дли М.И Компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. – М.: Физматлит, 2002.
4. Гостев В.И.Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. - К.: Радиоаматор, 2008. – 972 с.

**И.В. Брейдо, Н.И. Карасев,  
А.А. Калинин**

**УДК 621.3.036.663**

*Карагандинский государственный  
технический университет*

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ**

*Мақалада электрэнергиясын жылуэнергиясына түрлендіретін құбырлы реактормен гидродинамикалық жылыту тиімді параметрлерін анықтау жұмысына сипаттама берілген.*

*The article describes the work to define the optimal parameters of hydrodynamic heaters with tubular reactors that convert electrical energy into heat.*

Гидродинамические нагреватели (ГДН) принцип действия которых основан на извлечении внутренней энергии из жидкой среды в процессе активации с помощью механического воздействия зарекомендовали себя эффективными источниками теплоэнергии. Это перспективное направление развития нетрадиционной энергетики.

Конструктивные узлы ГДН должны обеспечивать вихревое движение рабочей жидкости в трубном реакторе, формирование непрерывного кавитационного процесса в объеме трубного реактора, циркуляцию рабочей жидкости в замкнутом теплоэнергетизирующем контуре, что в совокупности и ведет к выделению из рабочей жидкости внутренней энергии в форме тепла.

В то же время не в полной мере исследованы процессы преобразования электрической энергии в механическую, с последующим преобразованием механической в тепловую и отсутствуют исследования устанавливающие взаимосвязи теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии с конструктивно-эксплуатационными параметрами ГДН с реактором трубного типа.

Также не разработаны методы проектирования реактора ГДН и не определены методы установления оптимальных параметров ГДН, обеспечивающих максимум теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии.

Для решения указанных проблем выполнен комплекс работ, включающий:

- разработку и изготовление установки для изучения энергетических характеристик ГДН жидких сред;
- создание автоматизированной системы научных исследований ГДН (АСНИ-ГДН);
- разработку методов проведения экспериментов;
- выполнение экспериментальных исследований;
- определение оптимальных параметров ГДН;
- разработку методики проектирования реактора ГДН.

Работы проводились на испытательном стенде СГДН-05 [1]. Стенд создан для исследования энергетических характеристик экспериментальной серии гидродинамичес-

кого нагревателя, что позволило выполнять весь комплекс задач планирования, сбора и обработки измерений электрических, гидродинамических и теплофизических процессов на испытуемых образцах ГДН. Основные геометрические параметры экспериментальной серии ГДН приведены в таблице 1.

Была разработана информационная система АСНИ-ГДН для измерения и регистрации переменных состояния объектов гидродинамического стенда и управления режимом работы циркуляционного насоса в реальном времени. Информационно-измерительная среда стенда обеспечивает сбор, нормализацию и передачу данных о текущих значениях всех физических величин в информационную сеть для обмена с функциональными блоками управления, регулирования и моделирования, используемых для изучения механизма действия вихревых теплогенераторов с трубным реактором [2].

Таблица 1

Основные геометрические параметры экспериментальной серии ГДН

Номер экземпляра	Длина трубного реактора, мм	Внутренний диаметр реактора, мм	Диаметр выходного сечения конфузора, мм	Диаметр тормозного дросселя кавитатора, мм
1	714	51	18	41,82
2	1200	100	30	82
3	1500	150	48	105
4	714	100	30	82
5	1200	150	48	105
6	1500	51	18	41.82
7	714	150	48	105
8	1200	51	18	41.82
9	1500	100	30	82

Переменные состояния процесса вихревого движения рабочей жидкости, измеряемые в дискретные промежутки реального времени и накапливаемые в базе данных автоматизированной системы АСНИ-ГДН:

- 1) температура рабочей жидкости на входе в спиральный подвод,
- 2) температура рабочей жидкости на выходе кавитатора,
- 3) давление рабочей жидкости на входе в спиральный подвод,
- 4) давление рабочей жидкости на выходе из кавитатора,
- 5) мощность, потребляемая электродвигателем циркуляционного насоса из сети,
- 6) время работы циркуляционного насоса,
- 7) средняя температура рабочей жидкости в аккумулирующей емкости.

Главной целевой функцией при исследовании физического механизма действия ГДН является теплопроизводительность. При этом цель экспериментального исследования сводится к получению таких значений параметров конструктивных компонентов ГДН, которые обеспечат максимальную теплопроизводительность при фиксированном типе циркуляционного насоса и мощности его электропривода.

Для косвенного измерения теплопроизводительности ГДН в *i*-ом эксперименте использовалось выражение [3]:

$$Q_i = k G c_p \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_i, \quad (1)$$

где  $Q_i$  – теплопроизводительность ГДН, кВт;

$k = 0.001163$  - коэффициент преобразования размерности теплового потока из ккал/ч в кВт;

$G$  – масса рабочей жидкости в объеме циркуляционного контура, кг;  
 $c_p$  – удельная теплоемкость рабочей жидкости, ккал/кг $^{\circ}$ С. Принимаем расчетную температуру рабочей жидкости  $t=70^{\circ}$ С. Тогда расчетное значение удельной теплоемкости принимаем равным  $c_p = 1$  ккал/кг $^{\circ}$ С;

$(\frac{\partial t}{\partial \tau})_i$  – темп нагрева рабочей жидкости в реакторе ГДН в  $i$ -ом эксперименте:

$$(\frac{\partial t}{\partial \tau})_i = (t_{кци} - t_{нци}) / (\tau_{ки} - \tau_{ни}), \text{ } ^{\circ}\text{C/ч} \quad (2)$$

где  $t_{кци}$ ,  $t_{нци}$  – соответственно, средняя температура рабочей жидкости в циркуляционном контуре в конце и начале интервала измерения в  $i$ -ом эксперименте,  $^{\circ}$ С;

$\tau_{ки}$ ,  $\tau_{ни}$  – интервал работы циркуляционного насоса, в  $i$ -ом эксперименте на текущей строке матрицы планирования, ч.

В качестве варьируемых факторов или независимых переменных были выбраны следующие измеряемые свойства ГДН:

- 1) X1 – длина трубного реактора ( $L$ ),
- 2) X2 – внутренний диаметр трубного реактора ( $d$ ),
- 3) X3 – давление рабочей жидкости на входе спирального подвода ( $P$ ),
- 4) X4 – время работы циркуляционного насоса ( $t$ ).

Для решения таких задач эффективным является применение методов планирования экспериментов, опирающихся на объединение детерминированного и вероятностного подходов на основе латинских квадратов и многофакторных уравнений Протодьяконова-Тедера. Экспериментальное исследование процессов механоактивации в ГДН с трубным реактором сопряжено с изготовлением физических образцов генераторов, оснащенных соответствующим набором измерительных датчиков, а поэтому минимизация затрат на экспериментальные исследования имеет существенное значение. Исходя из этого требования, выбран такой план исследований, разрешающая способность которого обеспечивается при минимальном числе экспериментов.

Каждая строка этого плана представляет конкретные условия эксперимента. В эту же строку записывается и результат. Из результатов формируются выборки для трехточечных частных зависимостей теплопроизводительности от каждого из факторов:  $q_1(X_1)$ ,  $q_2(X_2)$ ,  $q_3(X_3)$ ,  $q_4(X_4)$ . Так как нулевому значению частных зависимостей по физическим соображениям может соответствовать нулевое значение обобщающей многофакторной зависимости, то ее следует формировать как произведение частных зависимостей  $q_i(X_i)$  в виде:

$$Q_g = \frac{\prod_{i=1}^k q_i(X_i)}{q_{cp}^{k-1}}, \quad (3)$$

где  $Q_g$  – многофакторная функция Протодьяконова;

$q_i(X_i)$  – частные функции одного аргумента для каждого из изучаемых факторов;

$k$  – число частных функций (факторов);

$q_{cp}$  – среднее значение всех учитываемых результатов эксперимента, по которому выполняется нормирование частных функций.

Для представления теплопроизводительности ГДН в форме целевой П-функции  $Q_i(L, d, P, t)$  выбраны следующие четыре частные функции теплопроизводительности одного аргумента:

$q_1(L)$  – зависимость теплопроизводительности от длины трубного реактора;

$q_2(d)$  – зависимость теплопроизводительности от внутреннего диаметра реактора;

$q_3(P)$  – зависимость теплопроизводительности от давления на входе спирального подвода;

$q_4(t)$  – зависимость теплопроизводительности от времени работы насоса.

Для проверки адекватности любых зависимостей использован коэффициент нелинейной множественной корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (q_{zi} - q_{ti})^2}{(n-k-1) \sum_{i=1}^n (q_{zi} - q_{cp})^2}}, \quad (4)$$

где n – число описываемых точек (для принятого плана эксперимента n=3); k – число действующих факторов: для частных аппроксимирующих функций k=1, а для обобщающей функции k=4);  $q_{zi}$  – экспериментальное значение результата, в нашем случае теплопроизводительности;  $q_{ti}$  – теоретическое (расчетное) значение результата;  $q_s$  – среднее экспериментальное значение.

Теоретические расчеты проводились в среде информационно-графической системы ГИД-99w на том же наборе факторов, что и в экспериментальных исследованиях ГДН.

Значимость коэффициента корреляции и вместе с ним и проверяемой аппроксимирующей функции для 95% уровня достоверности определяется неравенством:

$$t_r = \frac{R\sqrt{n-k-1}}{1-R^2} > 2, \quad (5)$$

Адекватность частных функций теплопроизводительности выполнена с помощью коэффициента R нелинейной множественной корреляции по критерию значимости tR (5) с 95 % уровнем достоверности. Результаты оценок адекватности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка значимости частных функций теплопроизводительности  $q_i$

$q_i$	R	Значимость по R	tR (tR > 2)	Значимость по tR > 2
q1(L)	0.729919874	Значима	1.562271727	Не значима
q2(d)	1	Значима	$\infty$	Значима
q3(P)	0.999999876	Значима	4018579.401	Значима
q4(t)	0.999999998	Значима	210614020.5	Значима

Результирующая аппроксимирующая функция теплопроизводительности ГДН с реактором трубного типа сформированная по структуре многофакторной функции Протодеяконова получила следующее выражение:

$$Q_{т}(L, P, t) = (5E - 06L^2 - 0,0114L + 12,035)(-0,0002d^2 + 0,0304d + 4,9627) * (-67,94P^2 + 87,376P - 21,631)(-2,7269t^2 + 6,8838t + 2,1474)/5,883^3, \quad (6)$$

При этом функция оказалась значимой (R=0,9974779: tR =197,99783 >>2), что позволяет использовать ее в физически целесообразном диапазоне параметров (L,d,P,t). В таблице 3 приведены экспериментальные и расчетные значения теплопроизводительности ГДН, полученные по (6) и используемые для расчета критерия значимости.

Таблица 3

Экспериментальные  $Q_{э}$  и теоретические значения теплопроизводительности ГДН, предсказанные функцией  $Q_{т}(L,d,P,t)$

№ экс-та	L, мм	d, мм	P, мПа	t, ч	$Q_{э}$ , кВт	$Q_{т}$ , кВт	Относительная погрешность, %
1	714	51	0,70	1	7,310141	7,4634451	2,054066
2	1200	100	0,60	1	6,544449	6,5416125	0,043361
3	1500	150	0,50	1	5,0583	4,8784451	3,686726
4	714	100	0,50	1.5	6,316543	6,1068676	3,433436

5	1200	150	0,70	1.5	5,728096	5,4203673	5,677267
6	1500	51	0,60	1.5	6,968031	7,3099952	4,678036
7	714	150	0,60	2	5,495523	5,0436845	8,9585
8	1200	51	0,50	2	3,840409	4,1524173	7,513896
9	1500	100	0,70	2	5,686121	5,6987936	0,222373
среднее значение, $x_{\text{ср}}$					5,883	5,846	
максимальное значение, $x_{\text{max}}$					7,310	7,463	
минимальное значение, $x_{\text{min}}$					3,840	4,152	
размах вариации, $R=x_{\text{max}}-x_{\text{min}}$					3,469	3,311	
среднее линейное отклонение, $a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i - \bar{x} $					0,8015	0,8972	
среднеквадратическое отклонение, $\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$					0,9436	0,9981	
коэффициент корреляции					0,969676319		

Численное исследование на экстремум функции (6) методом полного перебора пространства параметров (L,d,P,t) с малым шагом изменения, позволило установить оптимальные значения варьируемых факторов и экстремальное значение теплопроизводительности ГДН, приведенные в таблице 4.

Таблица 4

Экстремальные значения параметров теплопроизводительности

Qэ, кВт	Lэ, мм	dэ, мм	Pэ, мПа	tэ, ч
8,118142	714	76	0,65	1,25

Полученное экстремальное значение теплопроизводительности экспериментальной серии составило 8.118 кВт или 6980.22 ккал/ч. При этом тепловые потери через тепловую изоляцию циркуляционного контура составили 204.319 ккал/ч. Тогда полная теплопроизводительность ГДН с учетом тепловых потерь через изоляцию циркуляционного контура составила 7184.542 ккал/ч.

По аналогичной методике была получена результирующая аппроксимирующая функция коэффициента преобразования энергии. Коэффициент преобразования энергии представляет энергетическую эффективность ГДН и определяется из выражения:

$$K_{пэ} = Q_i / P_i * \eta_i, \quad (7)$$

где  $Q_i$ ,  $P_i$ ,  $\eta_i$  - соответственно, теплопроизводительность (тепловая мощность) ГДН, мощность, потребляемая насосным агрегатом и к.п.д. насосного агрегата в режиме i-го параллельного эксперимента на текущей строке матрицы планирования; коэффициент полезного действия установленного на стенде ГДН насосного агрегата мощностью 7.5 кВт равен в номинальном режиме работы (при максимальном КПД)  $\eta = 0.63$ .

$$K_{пэ}(L, d, P, t) = (-2E - 07L^2 + 0,0004L + 1,0773) * (3E - 06d^2 - 0,0033d + 1,5368) * (-5,6123P^2 + 6,9644P - 0,8747) * (-0,3069t^2 + 0,8619t + 0,6949) / 1,246144^3, \quad (8)$$

В таблице 5 приведены экспериментальные и расчетные значения коэффициента преобразования энергии, полученные по (8) и используемые для расчета критерия значимости.

Экстремальные значения параметров ГДН для функции коэффициента преобразования приведены в таблице 6.

Таблица 5

Экспериментальные  $K_{пэ}$  и теоретические  $K_{пт}$  значения коэффициента преобразования энергии, предсказанные функцией  $K_{пт}(L,d,P,t)$

№ экс-та	L, мм	d, мм	P, МПа	t, ч	$K_{пэ}$	$K_{пт}$	Относительная погрешность, %
1	714	51	0,70	1	1,390567	1,401561	0,784411
2	1200	100	0,60	1	1,298502	1,30147	0,22805
3	1500	150	0,50	1	1,06076	1,059132	0,153711
4	714	100	0,50	1,5	1,255804	1,259171	0,267398
5	1200	150	0,70	1,5	1,190674	1,180203	0,88722
6	1500	51	0,60	1,5	1,445389	1,453367	0,548932
7	714	150	0,60	2	1,106787	1,105063	0,156009
8	1200	51	0,50	2	1,296845	1,295095	0,135125
9	1500	100	0,70	2	1,169965	1,168225	0,148944
среднее значение, $x_{ср}$					1,246	1,247	
максимальное значение, $x_{max}$					1,445	1,453	
минимальное значение, $x_{min}$					1,061	1,059	
размах вариации, $R=x_{max}-x_{min}$					0,385	0,394	
среднее линейное отклонение, $a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i - \bar{x} $					0,1014	0,1057	
среднеквадратическое отклонение, $\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$					0,1134	0,1175	
коэффициент корреляции					0,999422927		

Таблица 6

Экстремальные значения параметров коэффициента преобразования энергии

$K_{пэ}$	$L_э$ , мм	$d_э$ , мм	$P_э$ , МПа	$t_э$ , ч
1,5158547	1000	51	0,6	1,4

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- разработана конструктивная и технологическая схема ГДН и опытный стенд для изучения энергетических характеристик ГДН жидких сред с автоматизированной системой научных исследований ГДН;
- создана система автоматического управления электрооборудованием стенда для выявления закономерности преобразования электрической энергии в механическую, с последующим преобразованием в тепловую;
- проведены, основанные на методах планирования многофакторного эксперимента, исследования в различных режимах работы ГДН;
- исследованы процессы преобразования электрической энергии в механическую, а механическую в тепловую с получением коэффициента преобразования энергии  $K_{пэ}$  в диапазоне от 1,061 до 1,445;
- определены методы установления оптимальных параметров ГДН, обеспечивающих максимум теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии, на основе многофакторного эксперимента;

- найдены математические зависимости, устанавливающие взаимосвязи теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии с конструктивно-эксплуатационными параметрами ГДН с реактором трубного типа;
- разработана методика проектирования реактора ГДН.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин А.А. Автоматизированный стенд для исследования энергетических характеристик гидродинамических нагревателей с трубным ротором // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 5-ой международ. науч.-практич. конф. (г. Алматы 21-22 сентября 2006 г.). - Алматы, 2006. - С.138-141.
2. Калинин А.А. Архитектура автоматизированной системы научных исследований энергетических характеристик ГДН с трубным ротором // Научные труды международ. симпозиума «Информационные и системные технологии в промышленности, образовании и науке» (21-22 сентября 2006 г.)/ Министерство образования и науки Республики Казахстан, Международная академия информатизации, КарГТУ. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2006. - С.110-112.
3. Карасев Н.И., Калинин А.А. Вероятностно-детерминированный подход при планировании экспериментов для изучения явлений механоактивации вихревого движения жидких сред // Materiały czwartej Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji “Nauka: teoria i praktyka -2007”. Tom 10. Techniczne nauki. Fizyczna kultura i sport.: Przemysł. Nauka i studia - 96 str. С.16-26.

И.В. Брейдо, О.А. Ющенко

УДК 621.311

Карагандинский государственный  
индустриальный университет

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЛИНИИ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ

*Бапта үздіксіз ыстық мырыштауды сызықтың тік жинақтағышының электромеханикалық жүйесінің оңдеу ерекшеліктері қаралады. Имитациялық пішіндеудің нәтижелері тура келеді.*

*The features of development of the electromechanics system of vertical store of line of the continuous hot zinc-plating are examined in the article. Results over of imitation design are brought.*

Линия непрерывного горячего цинкования (ЛНГЦ) является сложной электро-механической системой, надежность и качество функционирования которой зависит от физико-механических свойств обрабатываемой полосы металла и режимов работы взаимосвязанного через полосу многодвигательного электропривода.

При остановке головной части линии, во время сварки концов полосы при замене рулона, средняя технологическая часть агрегата продолжает движение на рабочей скорости, за счет выбора полосы из входного вертикального накопителя. При этом возникают динамические процессы, приводящие к возникновению продольных колебаний в обрабатываемой полосе. В результате, в обрабатываемой полосе возникают, так называемые, «складки» во время обработки в печи термохимической обработки (ТХО) под действием высокой температуры, что ведет к браку. Это подтверждено экспериментами по определению динамических свойств обрабатываемой на ЛНГЦ полосы металла [1].

Таким образом, существующая электромеханическая система входного накопителя не обеспечивает демпфирования продольных колебаний.

Для обеспечения точности поддержания натяжения в полосе в динамических режимах работы накопителя в [2] предложена компенсация динамического момента электропривода каретки накопителя, который определяется величиной ускорения электропривода и его суммарного приведенного момента инерции.

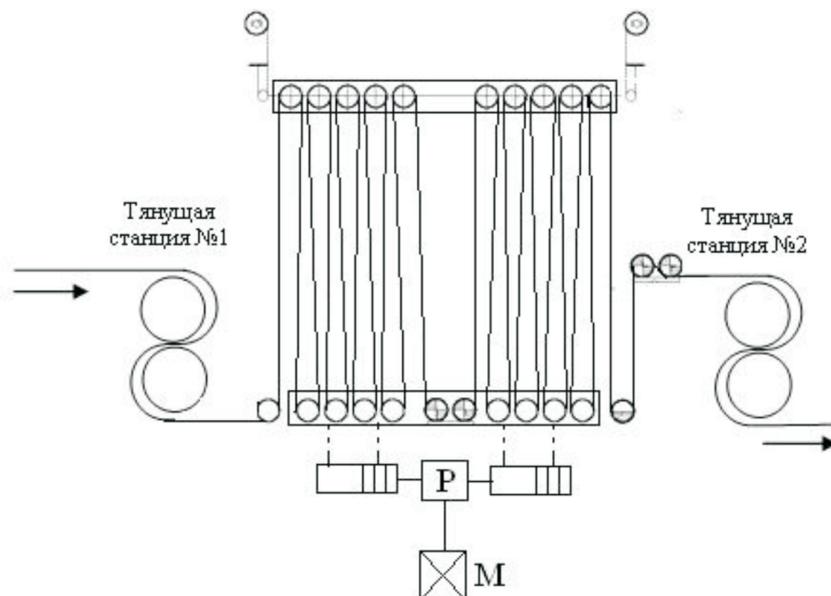


Рисунок 1 – Кинематическая схема входного вертикального накопителя

Проанализируем структуру электромеханической системы накопителя полосы, рассмотренного в рекомендациях [2].

Необходимый запас полосы в накопителе создается путем увеличения длины пути каретки. Роликовая каретка перемещается за счет тросового шкивного блока, приводящегося барабаном с редуктором. Двигатель лебедки обеспечивает требуемое натяжение полосы в накопителе. Входной вертикальный накопитель в ЛНГЦ расположен между первой и второй тянущими станциями.

Передвижение каретки накопителя осуществляется при помощи канатного барабана (лебедки), который приводится во вращение асинхронным электродвигателем с частотным управлением, работающим с системой автоматического регулирования натяжения полосы косвенного действия. Режим работы двигателя накопителя – двигательный (нагон полосы) или генераторный (выбор полосы).

Усилие натяжения в полосе в накопителе при неизменной длине полосы может быть описано уравнением:

$$F = \left[ \frac{M_{\text{рол1}}}{J_1 p} - \omega_2 (1 + \varepsilon) \right] \cdot \frac{Cl}{\omega_{01} r_p} \cdot \frac{1}{T_{II} p + 1} \quad (1)$$

где  $M_{\text{рол1}}$  – вращающий момент верхнего эквивалентного ролика накопителя, Н·м;

$J_1$  – момент инерции верхнего эквивалентного ролика накопителя, Н·м;

$\omega_2$  – угловая скорость нижнего эквивалентного ролика накопителя, рад/с;

$\varepsilon$  – относительное удлинение полосы;

$C$  – коэффициент жесткости полосы на участке натяжения, Н·м;

$l_0$  – эквивалентная максимальная длина полосы в накопителе, м;

$r_p$  – радиус эквивалентного отклоняющего ролика, м;

$\omega_{01}$  – начальное значение угловой скорости, рад/с;

$T_{II} = l / \omega_{01} r$  – постоянная времени полосы, с;

$p$  – оператор дифференцирования, с<sup>-1</sup>

Структурная схема математической модели усилия натяжения в полосе между роликками входного накопителя, при неизменной длине полосы представлена на рисунке 2

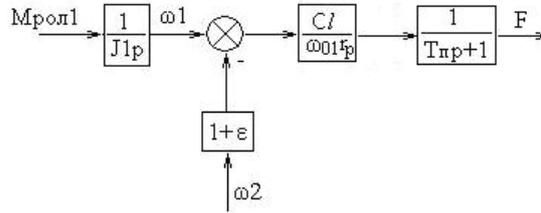


Рисунок 2 – Структурная схема математической модели усилия натяжения в полосе во входном накопителе

В электроприводе каретки вертикального накопителя имеется канатная связь между приводным барабаном и кареткой. Наличие упругой связи через канат существенно влияет на характер протекания переходных процессов в электроприводе каретки. В процессе выбора (нагона) полосы из накопителя ускорение каретки с обводными роликками и полосы в накопителе не может быть обеспечено из-за наличия канатной связи. Ускорение этих элементов в этом случае производится электроприводами механизмов средней технологической части линии. Из вышеизложенного следует, что электропривод каретки накопителя является электроприводом с переменным моментом инерции.

Величина приведенного момента инерции при «выборе» полосы определяется выражением

$$J_{np1} = J_{\partial} + J_{\bar{\sigma}} + J_p, \quad (2)$$

где  $J_{\partial}$ ,  $J_{\bar{\sigma}}$ ,  $J_p$  – моменты инерции двигателя, барабана лебедки, редуктора соответственно, кг·м<sup>2</sup>.

Во время «нагона» полосы в накопитель величина момента инерции будет равна

$$J_{np2} = J_{\partial} + J_{\bar{\sigma}} + J_p + J_k + J_n,$$

где  $J_k$  – приведенный момент инерции каретки, включая моменты инерции обводных роликов, кг·м<sup>2</sup>;

$J_n$  – момент инерции полосы, находящейся в накопителе, определяемый объемом этой полосы, кг·м<sup>2</sup>.

Динамический момент, приведенный к валу двигателя каретки, определяется выражением

$$M_{дин} = J_{np} \frac{i}{r_{\bar{\sigma}}} \frac{d(V_{вх} - V_{вых})}{dt},$$

где  $J_{np}$  – приведенный момент инерции электропривода каретки накопителя, кг·м<sup>2</sup>;

$i$  – передаточное число редуктора;

$r_{\bar{\sigma}}$  – радиус барабана каретки, м;

$V_{вх}$ ,  $V_{вых}$  – линейные скорости полосы на входе и выходе накопителя, задаваемые первой и второй тянущими станциями, м/с.

Усилие натяжения в полосе при выборе полосы из накопителя описывается уравнением:

$$F = \left[ \frac{M_{\text{пол1}}}{J_1 p} - \omega_2 (1 + \varepsilon) \right] \frac{C \Delta l}{\omega_{01} r} \cdot \frac{1}{\omega_{01} r_p p + 1} = \left[ \frac{M_{\text{пол1}}}{J_1 p} - \omega_2 (1 + \varepsilon) \right] \frac{C \Delta l}{\omega_{01} r_p} \cdot \frac{1}{T_{II} p + 1}$$

где  $\Delta l$  - длина полосы в накопителе в процессе выбора полосы, м;

$$\Delta l = l_0 - \left\{ \left[ \left( F_3 - F \cdot K_{\text{дн}} + \frac{d(V_{\text{вх}} - V_{\text{вых}})}{dt} \left( 1 + \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д}} p + 1} (1 + K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{т}} \cdot K_{\text{к}}) \right) \right) \right] \times \right. \\ \left. \times W_{\text{РН}} \cdot K_{\text{чп}} - \frac{\pi p_0 n}{60} \right] \frac{K_i}{T_i p + 1} \cdot K_{\text{М}} \Psi + F \cdot K_{\text{пр}} \left. \right\} \frac{1}{J_{\text{мп1}} p} \cdot \frac{\pi r_0}{30 i p},$$

где  $l_0$  - максимальная длина полосы в накопителе, м;

$F_3$  - заданное значение усилия натяжения в полосе, Н;

$F$  - фактическое значение усилия натяжения полосы в накопителе, Н;

$K_{\text{дн}}$  - коэффициент передачи датчика натяжения;

$W_{\text{РН}}$  - передаточная функция регулятора натяжения,

$K_{\text{чп}}$  - коэффициент передачи частотного преобразователя;

$p_0$  - число пар полюсов электродвигателя каретки накопителя;

$\omega$  - угловая скорость двигателя каретки накопителя, рад/с;

$K_i$  - коэффициент передачи цепи статора двигателя,

$T_i$  - постоянная времени цепи статора двигателя, с;

$K_{\text{М}}$  - магнитная конструктивная постоянная двигателя, Н/м(А·Вб);

$\Psi$  - основное потокосцепление, Вб;

$K_{\text{пр}}$  - коэффициент приведения, учитывает приведение к одному валу соседних взаимодействующих масс;

$R_0$  - радиус барабана каретки накопителя, м;

$i$  - передаточное число редуктора;

$K_{\text{д}}$  - коэффициент передачи дискриминатора знака сигнала;

$T_{\text{д}}$  - постоянная времени дискриминатора знака сигнала, с;

$K_{\text{ш}}$  - коэффициент датчика ширины полосы;

$K_{\text{т}}$  - коэффициент датчика толщины полосы;

$K_{\text{к}}$  - коэффициент датчика положения каретки.

Так как  $T_3 \ll T_{\text{М}}$ , то принимаем  $T_3 \approx 0$ , то есть пренебрегаем влиянием электромагнитной постоянной.

Структурная схема электропривода каретки накопителя с узлом компенсации динамического момента представлена на рисунке 3.

Узел, выделенный пунктиром, обеспечивает определение величины момента инерции для точной компенсации динамического момента электропривода каретки входного накопителя.

Узел компенсации динамического момента работает следующим образом. Во время остановки головной части агрегата начинается движение каретки входного накопителя. Если при этом происходит изменение скорости полосы на входе и выходе накопителя с разными темпами, то на выходе дифференцирующего устройства появляется сигнал пропорциональный алгебраической разности ускорений полосы на входе и выходе петлевого устройства.

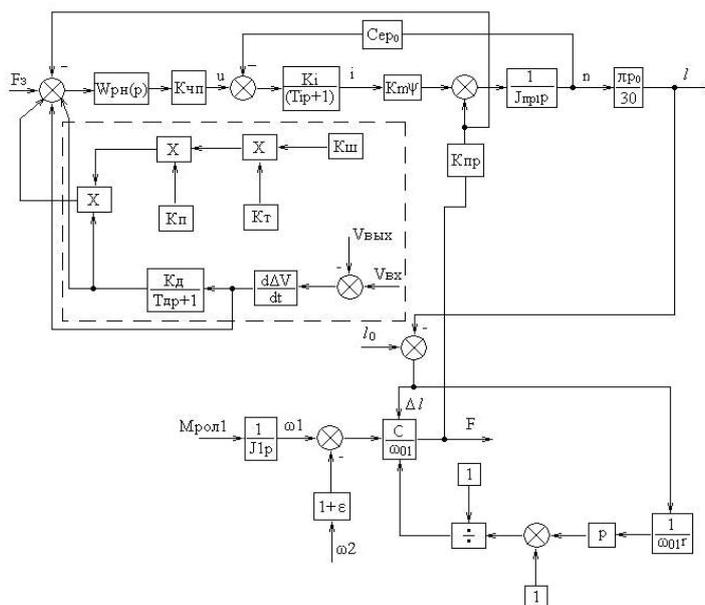


Рисунок 3 – Структурная схема электропривода каретки вертикального накопителя с узлом компенсации динамического момента

В режиме «выбора» («нагона») полосы происходит ускорение (замедление) электропривода тележки, при этом сигнал с выхода дифференцирующего устройства не проходит через дискриминатор знака сигнала, а поступает только на первый вход системы автоматического регулирования натяжения (САРН), образуя задание на динамический момент электропривода, определяемый моментом инерции по выражению (2). Если происходит ускорение и замедление электропривода в противоположных направлениях, то сигнал с выхода дифференцирующего устройства поступает на первый вход и на второй вход САРН и первый блок умножения через дискриминатор знака сигнала. Сигнал на втором входе САРН формирует задание на динамический момент электропривода, образуемый величиной постоянной составляющей момента инерции  $J_k$ . Сигнал выхода первого блока умножения, пропорциональный величине ускорения и массы полосы в накопителе, поступает на третий вход в САРН и образует задание на динамический момент электропривода, соответствующий величине переменной составляющей момента инерции  $J_p$ , зависящей от массы полосы в накопителе.

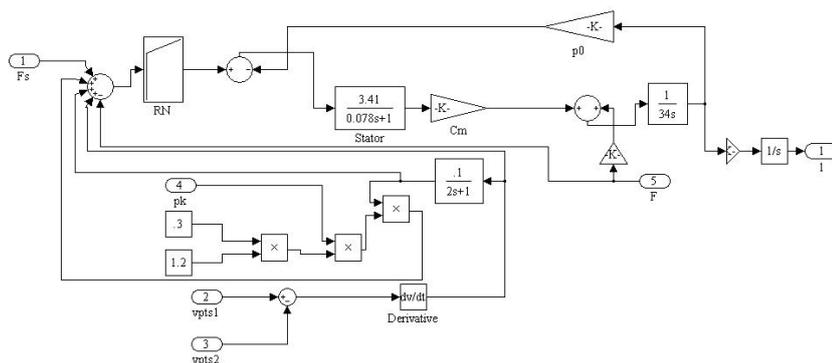


Рисунок 4 – Имитационная модель электропривода каретки входного накопителя

Имитационная модель электропривода каретки входного накопителя ЛНГЦ, реализованная в пакете Simulink системы MATLAB 7 [3] представлена на рисунке 5.

Входными воздействиями в модели являются: задание по натяжению полосы  $F_s$ , сигнал датчика положения каретки  $pk$ , сигналы скоростей полосы в первой и второй тянущих станциях  $v_{pts1}$ ,  $v_{pts2}$ . Выходным воздействием является величина пути  $I$ , проходимого кареткой при выборе (нагоне) полосы.

Анализ результатов имитационного моделирования электромеханической системы входного вертикального накопителя показал, что введение в модель узла компенсации динамического момента не обеспечивает подавления колебаний натяжения в полосе, так как форсирование процессов в полосе из-за наличия упругих связей приводит к возникновению дополнительных динамических моментов.

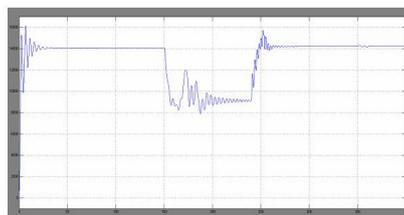


Рисунок 5 – Осциллограмма усилия натяжения во входном накопителе

Как показывает структур аналогичных технологических линий, для компенсации динамического момента желательно введение дополнительного независимого устройства натяжения.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ющенко О.А. Экспериментальные исследования натяжения в электромеханической системе печи термохимической обработки //Труды университета, вып. №4. - Караганда: изд-во КарГТУ, 2008. - С.77-79.
2. Лимонов Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. – Х.: - Изд-во «ФОРТ», 2009. – 272 с.
3. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.:

Павлодарский государственный  
университет им. С.Торайгырова

## ДИНАМИКА ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ДЕЙСТВИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И СОСРЕДОТОЧЕННЫХ НАГРУЗОК

*Мақалада динамикалық күштер әсері нәтижесіндегі пластиналар есебі қарастырылады. Есептеу ЭЕМ пайдалану арқылы соңғы айырма әдісі бойынша жүргізіледі.*

*Calculation of plates on dynamic effects is considered in the article. The calculation is carried out with the help of final differences method using ECM.*

Рассматривается прямоугольная ортотропная пластина при действии произвольно расположенных возмущающих нагрузок и сосредоточенных масс. Учитываются упругое основание пластины, шарнирное опирание или защемление по контуру и свободный край. Динамическая нагрузка и сосредоточенные массы могут быть приложены весьма произвольно. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний тонких пластин имеет вид [1]:

$$D_1 W_{,xxxx} + 2D_3 W_{,xxyy} + D_2 W_{,yyyy} + \frac{q}{g} W_{,tt} + KW = F \quad (1)$$

Здесь поперечная нагрузка задается в виде:

$$F = R(A \cos \Theta t + B \sin \Theta t) - \frac{P}{g} W_{,tt} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) принято:

$D_1, D_2, D_3$  – цилиндрические жесткости;  $W$  – прогиб пластин;  $q$  – интенсивность нагрузки на единицу площади;  $K$  – коэффициент упругости грунта;  $\Theta$  – частота возмущающей силы;  $R$  – амплитудное значение возмущающей силы;  $\frac{P}{g}$  – интенсивность массы.

Решение уравнения (1) ищем в виде

$$W(x, y, t) = W(x, y)(A \cos \Theta t + B \sin \Theta t) \quad (3)$$

с учетом (2) и (3) дифференциальное уравнение (1) примет вид

$$\eta_1 W_{,xxxx} + 2W_{,xxyy} + \eta_2 W_{,yyyy} - \frac{q}{gD_3} \Theta^2 W - \frac{P}{gD_3} \Theta^2 W t + \frac{K}{D_3} W = \frac{R}{D_3} \quad (4)$$

В (4) приняты обозначения для соотношений цилиндрических жесткостей

$$\eta_1 = \frac{D_1}{D_3}, \quad \eta_2 = \frac{D_2}{D_3} \quad (5)$$

Для решения дифференциального уравнения (4) применим метод конечных разностей [2,3].

$$\left[ \varphi_1 + \left( \frac{K}{D_3} - \frac{q}{gD_3} \Theta^2 W - \frac{P}{gD_3} \Theta^2 W \right) \lambda_1^2 \lambda_2^2 \right] W_i + \varphi_2 (W_k + W_l) + \varphi_3 (W_m + W_n) + \varphi_4 (W_q + W_p + W_0 + W_r) + \varphi_5 (W_s + W_t) + \varphi_6 (W_u + W_v) = \frac{R \lambda_1^2 \lambda_2^2}{D_3} \quad (6)$$

где коэффициенты при прогибах определяются выражениями

$$\varphi_1 = \frac{6\eta_1}{\mu^2} + 8 + 6\eta_2 \mu^2, \quad \varphi_3 = -4\eta_2 \mu^2 - 4, \quad \varphi_4 = 2, \quad (7)$$

$$\varphi_3 = -4\eta_2 \mu^2 - 4, \quad \varphi_4 = 2, \quad \varphi_5 = \frac{\eta_1}{\mu^2}, \quad \varphi_6 = \eta_2 \mu^2$$

Для прямоугольных пластин  $m = a/b$  – соотношение сторон.

Таблица 1  
 Результаты расчета пластины на вынужденные колебания

№ задачи	Схема пластины	К	P0 102 кг	R0 102 кг	Поло- жение массы P0	Прогитбы в отмеченных точках					
						W1	W2	W3	W4	W5	W6
1		0.0	2.0	3	0.00354	0.00660	0.00838	0.00660	0.00354	0.0	
2		0.0	2.0	3	0.00401	0.00698	0.00895	0.00698	0.00401	0.0	
3		10.0	2.0	3	0.00583	0.01091	0.01350	0.01350	0.01091	0.0	
4		0.5	10.0	2.0	3	0.00254	0.00507	0.00676	0.00507	0.00254	0.0
5		0.5	10.0	2.0	3	0.00076	0.00225	0.00357	0.00225	0.00076	0.0
6		10.0	2.0	1	0.00131	0.00131	0.00101	0.00089	0.00081	0.00105	
7		10.0	2.0	2	0.00169	0.00446	0.00415	0.00375	0.000387	0.00573	
8		10.0	2.0	3	0.00138	0.00406	0.00604	0.00484	0.00411	0.00502	
9		10.0	2.0	4	0.00112	0.00332	0.00463	0.00674	0.00721	0.01031	
10		10.0	2.0	5	0.00072	0.00240	0.00335	0.00699	0.01355	0.02319	
11	10.0	2.0	6	0.00001	0.00044	0.00075	0.00374	0.00101	0.02677		

осредоточенные массы и возмущающие силы определяются выражениями

$$P_0 = P\lambda_1\lambda_2, \quad R_0 = R\lambda_1\lambda_2 \quad (8)$$

Аппроксимируем пластину регулярной сеткой и запишем уравнение (6) для  $i$ -ой точки сеточной области [4].

$$\left( \varphi_1 + \frac{Ka^4}{S^4\mu^2 D_3} - \frac{P_0\Theta^2 a^2}{gD_3 S^2 \mu^2} - \frac{q\Theta^2 a^4}{S^4\mu^2 D_3} \right) W_i + \varphi_2(W_k + W_l) + \varphi_3(W_m + W_n) + \varphi_4(W_p + W_q + W_o + W_r) + \varphi_5(W_s + W_t) + \varphi_6(W_u + W_v) = \frac{R_0 a^2}{D_3 S^2 \mu^2} \quad (9)$$

где  $S$  – число шагов сетки.

Точки приложения сосредоточенных масс и возмущающих сил можно принимать произвольно в любом узле сеточной области. Граничные условия шарнирного опирания, защемления и свободного края могут варьироваться по любой стороне пластинки или на участке стороны. Упругое основание также может учитываться на участке пластины или по всему основанию. Программа на ЭВМ составлена для произвольного числа шагов сетки  $S$ . В зависимости от  $S$  программа автоматически формирует нужное число уравнений в конечных разностях. Задачи решались при числе шагов сетки  $S=6,8,10$ . При  $S=10$ , без уточнения значений расчета, расхождение результатов с имеющимися точными решениями [5] лежит в пределах 3%.

Исследовалось влияние внешней нагрузки и граничных условий на прогибы пластины. Значения прогибов в характерных точках пластины приведены в таблице 1. В задачах с 1 по 3 рассматривается пластина, шарнирно опертая по всему контуру. Величина массы  $P_0$  меняется. В задаче 4 рассматривается эта же пластина, но с учетом упругого основания с коэффициентом упругости грунта  $K=0,5$ . В задаче 5 рассматривается пластина, защемленная по всему контуру. В этих задачах сосредоточенная масса и возмущающая сила приложены в центре пластины. В задачах с 6 по 11 исследуется влияние положения массы и возмущающей силы на прогибы пластины. Внешняя нагрузка поочередно прикладывается в точках 1, 2, ..., 6. Пластина защемлена по двум противоположным сторонам, а две другие свободны.

Представленный в работе класс задач представляет практическую ценность при проектировании прямоугольных плит на упругом основании с комбинированными граничными условиями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ельмуратова А.Ф., Ельмуратов С.К. Расчет ортотропных пластин на вынужденные колебания. Журнал «Наука и техника Казахстана». - Павлодар: ПГУ, 2002. - № 4.
2. Варвак П.М. Развитие и приложение метода сеток к расчету пластинок. - Киев: АН УССР, 1949. - ч.1, 1959. - ч.2.
3. Варвак П.М., Рябов А.Ф. Справочник по теории упругости. Будивельник. - Киев, 1971.
4. Боженков А.Ш., Ельмуратов С.К. Влияние сосредоточенных масс на вынужденные колебания прямоугольных ортотропных пластин. В сб. «Строительная механика». - Караганда: КПТИ, 1978. - вып. 3.
5. Киселева И.В. Колебания опертой по контуру прямоугольной ортотропной пластинки с учетом сосредоточенной массы в месте приложения вибрационной нагрузки. - М.: МАДИ, 1957. - вып. 21.

О.Т. Ибраева, И.К. Ибраев,

УДК 658.567

М.М. Суюндиков

*Павлодарский государственный  
университет им. С. Торайгырова*

## РЕГЕНЕРАЦИЯ МАСЛОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ШЕСТИКЛЕТЬЕВОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ 1400

*Осы бапта өндірісте қайта өңдеудегі аз мөлшердегі қалдықтарды қарастырған, белгілі тәсілдермен өткізілген және ең ыңғайлы тәсілдер алынған. Күкіртті қиықылды қайта өңдеу методикасы және қиықылда майдың қайта өңделу методикасын құрастырылған. Қайта өңдеуде әрі қарай майдың қолданудың жолын ұсынаған.*

*In this article examination to way regeneration empty departure, realization analyzed existence methods and to choose most come up method regeneration empty departure from this production. Devise me-*

### Состояние проблемы

При холодной прокатке металлов для охлаждения оборудования и снижения коэффициента трения между прокатываемым металлом и валками применяются различные эмульсии и смазочно-охлаждающие жидкости.

Кроме отработанной эмульсии при промывке опорожненной циркуляционной эмульсионной системы, а также при обмывке станов, появляются дополнительные стоки, содержащие маслоэмульсию до 3-5 г/л. Таким образом, возникают большие залповые сбросы стоков с маслом. Непосредственный сброс эмульсионных стоков в водоем недопустим, так как 1 г масла создает на поверхности водоема масляную пленку в 6 м<sup>2</sup> [1].

Для Республики Казахстан, как и для многих стран, проблема отходов производства и потребления является одной из актуальных экологических проблем. Острота этой проблемы в республике обусловлена, в первую очередь, значительной концентрацией промышленного производства.

В Казахстане нелегально сбрасывается на почву и в водоемы от 26 до 77 % всех отработанных масел; 40-48 % - собирается, но из всех собранных отработанных масел только 14-15 % идет на регенерацию, а остальные 26-33 % используются как топливо или сжигается.

Некоторые сорта базового масла вырабатываются из отработанного масла и называются регенерированными. Существует много различных технологических линий регенерации масла, Германия является лидером в регенерации отработанных масел, но в основном не из экономических, а из экологических соображений.

Одним из наиболее реальных источников пополнения масляных ресурсов является регенерация (восстановление качества) масел и повторное их использование. Регенерация масел - экономически рентабельная отрасль народного хозяйства [2].

**Способы регенерации маслосодержащих отходов**

Для восстановления отработанных масел применяются разнообразные технологические операции, основанные на физических, физико-химических и химических процессах и заключаются в обработке масла с целью удаления из него продуктов старения и загрязнения. В качестве технологических процессов обычно соблюдается следующая последовательность методов: механический, для удаления из масла свободной воды и твердых загрязнений; теплофизический (выпаривание, вакуумная перегонка); физико-химический (коагуляция, адсорбция). Если их недостаточно, используются химические способы регенерации масел, связанные с применением более сложного оборудования и большими затратами.

В настоящее время для регенерации отработанных масел используют физические, физико-химические, химические методы и комбинированные (рисунок 1). На практике обычно применяют комбинированные методы, обеспечивающие получение высококачественных регенерированных масел.

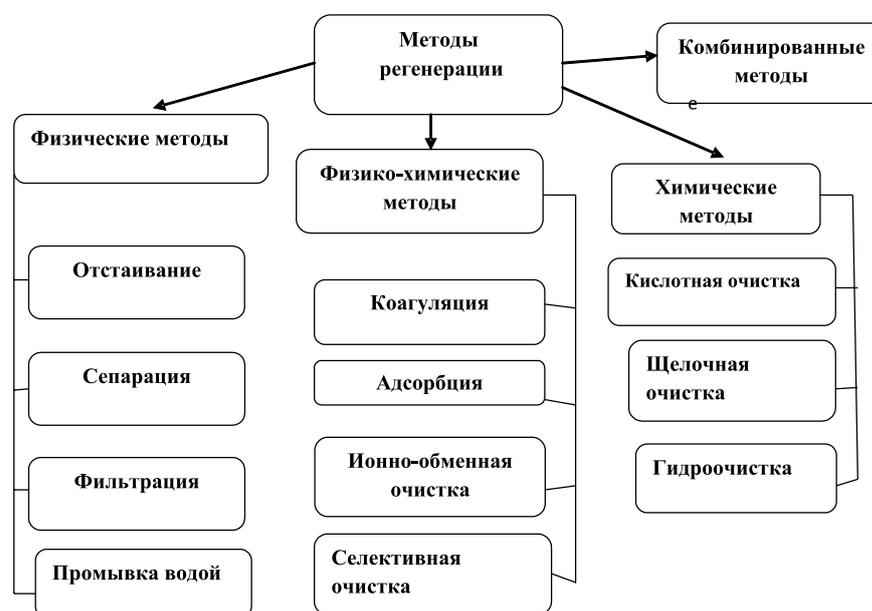


Рисунок 1 - Методы регенерации масла

При выборе метода регенерации или комбинации методов необходимо учитывать характер и природу продуктов старения отработанных масел и требования, предъявляемые к регенерированным маслам, а также количества собираемых масел. Необходимо также отдавать себе отчет об экологических последствиях тех или иных способах регенерации и выбирать наиболее приемлемые в данных условиях методы.

Существующие методы очистки маслоэмульсионных стоков основаны на разрушении гидратной пленки, препятствующей укрупнению капелек масла. Для разрушения гидратной пленки применяют электрическое поле высокого напряжения, а также различные физико-химические методы. Химические методы очистки широко применяются в процессе производства нефтяных масел и при регенерации отработанных масел. Наибольшее

распространение получили кислотная и щелочная очистка. Известен способ регенерации отработанного масла из пенных маслосодержащих производственных отходов путем кипячения при температуре 105 – 110 °С с неорганической солью в виде отвального шлама в условиях барботирования сжатым воздухом и непрерывного перемешивания в течение 3 - 4 ч, последующего отключения продувки и расслоения отстаиванием после 16 - 24 ч. Данный способ требует меньше энергозатрат на реализацию, но достаточно сложен в части дальнейшей утилизации шлама.

Существует метод регенерации отработанного минерального масла путем предварительного нагрева до температуры 110 °С для удаления воды и последующего окисления при температуре 40 – 70 °С, озонирования, содержащим около 1% озона, воздухом, а затем очистки растворами гидразинхлорида и поливинилового спирта [3]. Данный метод позволяет увеличить степень очистки масла, однако применение химикатов при очистке усложняет технологию очистки сточных вод.

Метод очистки отработанного масла от воды и легких фракций путем его диспергирования с водой и последующего контактирования в циклонной камере с продуктами сгорания топливозвоздушной смеси, температура которой предпочтительно около 160 °С. Контактное осуществляют при встречной подаче и температуре 20°С распыленного масла сверху и продуктов сгорания в виде перегретого пара и дымовых газов снизу. Способ повышает эффективность очистки, без применения химикатов, загрязняющих окружающую среду.

Известен способ регенерации отработанных масел путем нагревания, фильтрации и центрифугирования, отличающийся тем, что масло после фильтрации подвергают очистке щелочью и обработке природным адсорбентом, и после центрифугирования из масла дополнительно удаляют механические примеси, воду и легкие углеводороды с последующей очисткой масла в электрогидроциклоне и адсорбере с использованием природного адсорбента [4].

На Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) в цехе углеродистой ленты внедрена технология теплового разложения маслоэмульсионных стоков с целью сокращения затрат на обработку этих стоков и регенерацию масел. Способ теплового разложения выбран вследствие того, что на прокатных станах цеха используется эмульсия, стабилизированная неионогенным эмульгатором, малочувствительным к коагуляции электролитами, но чувствительным к нагреванию. Новой технологией предусматривается усреднение стоков, тепловое разложение и отстаивание [5].

Из реагентных очисток наиболее распространенной является кислотная очистка. В кислотной очистке в качестве расслаивающего реагента применяют сернокислый алюминий, сернокислое железо, серную кислоту или непосредственно отработанный сернокислотный травильный раствор, а также поваренную соль. Степень очистки стоков от масла достигает 95,0 %.

Один из способов регенерации отработанных масел с применением в качестве реагента различных кислот, заключается в обработке отработанных масел сильными минеральными кислотами, в частности серной кислотой с последующей обработкой отбеливающими глинами. При этом образуется кислый гудрон, но его, возможно, использовать как вторичный материал, к примеру, практикуется получение дорожных битумов из гудронов сернокислотной очисткой масел.

Еще одним методом с применением минеральных кислот является метод регенерации отработанного масла путем его обработки минеральной кислотой для проведения реакции с содержащимся в осадке железом при нагревании до температуры кипения, т.е. около 101°С, фильтрации через пористый материал, например перлит, и последующего разделения на водную и масляную фазы.

Данный способ сопряжен с образованием кислого гудрона, но прост в применении и требует меньше энергозатрат на реализацию.

При кислотном методе возможно образование кислых стоков, которые требуют нейтрализации. Технология обезвреживания кислых стоков осуществляется при помощи извести, она проста в исполнении, не требует больших затрат и является давно отработанной.

#### Экспериментальная часть

Нами была разработана методика и проведены эксперименты по регенерации маслосодержащих отходов шестиклетьевого стана 1400 цеха ЛПЦ-3 АО «АрселорМиттал Темиртау». Из проведенного анализа существующих методов нами был выбран метод сернокислотной очистки. т.к он наиболее прост в применении, в отличие от других методов требует наименьших затрат на оборудование и реагенты, а также, к примеру, в сравнении с тепловым методом не требует больших площадей под оборудование. Для данного производства и образующихся на нем маслосодержащих отходов наиболее приемлем именно кислотный метод.

Для регенерации масла кислотным методом использовалась концентрированная серная кислота ( $H_2SO_4$ ). После добавления  $H_2SO_4$  в маслосодержащие отходы, вся смесь прогревалась на водяной бане до расслоения на слои: вода, грязь и масло. Количество  $H_2SO_4$  добавляемое в маслосодержащие отходы было различным: 5 мл, 10 мл, 15 мл, 20 мл. При 5 мл происходит отделение масла, но масло получается грязным, при 15 и 20 мл происходит хорошее разделение, масло получалось чистое, но при этом кислотное число, получаемого масла очень высоко. Было установлено, что оптимальное количество  $H_2SO_4$  необходимое для регенерации масла составляет 10 мл, в результате масло получается чистым, кислотное число масла значительно ниже, но все же является высоким, для этого нами был опробован метод промывания водой полученного масла: в масло добавляется вода и прогревается на водяной бане, затем отстаивается и также определяется кислотное число. Также возможно отмывание масла от кислоты щелочью, но в нашем случае, при данном масле это невозможно, так как происходит свертывание масла. В таблице 1 представлены результаты экспериментов.

В результате экспериментов было выявлено, что при разделении маслосодержащих отходов на слои: вода, грязь, масло, нижний слой является регенерированной кислотой. Нами предлагается использование данной кислоты в сульфатно - аммиачном отделении цеха химулавливания коксохимического производства (КХП) АО «АрселорМиттал Темиртау». Полученная кислота может использоваться при производстве сульфата – аммония.

Таблица 1

Результаты экспериментов

Количество $H_2SO_4$ (мл)	Последующая промывка масла водой	V1 КОИ	V2 КОИ	m <sub>масла</sub>	Кч
5	—	0,4	12,9	2	35
10	—	0,4	19,5	2	53,8
	1 раз	0,3	18	2	49,6
	2 раза	0,3	9,1	2	24,7
	3 раза	0,3	7,45	2	20,0
15	—	0,3	25	2	69,3
20	—	0,3	33,2	2	92,2

### Использование регенерированного масла

Полученное после регенерации масло можно использовать в производстве смазки, применяемой для бетонной опалубки.

Смазка для бетонной опалубки Эмульсол ЭК-1 предназначена для создания масляных эмульсий, применяемых для смазывания металлических форм в различных технологических процессах на предприятиях стройиндустрии для производства бетонных изделий. Рекомендуется готовить эмульсию с применением раствора технической кальцинированной соды с концентрацией в соотношении 1 часть соды к 20 частями содового раствора. Возможны иные соотношения компонентов в зависимости от конкретных условий применения. Показатели масла, требуемые для производства данной смазки приведены в таблице 2 [6].

Полученное масло после регенерации кислотным методом подходит по показателям, представленным в таблице 2 и может быть использовано для приготовления смазки для бетонной опалубки.

Также возможно использование масляного компонента, полученного после регенерации, как составляющую консистентных смазок. Так смазка ИП-1, на основе регенерированного масла, была изготовлена и применяется в централизованных системах густой смазки прокатных цехов АО «АрселорМиттал Темиртау».

Таблица 2

Показатели регенерированного масла

Наименование показателя	Значение
Внешний вид при 20 0С	Вязкая жидкость от желтого до темно-коричневого цвета
Кислотное число, мг КОН на 1г масла, не более	20
Стабильность эмульсии: выделение масла в течение 3-х часов не более, %	1

### Заключение

Экспериментальными исследованиями установлена эффективность кислотного метода регенерации маслосодержащих отходов ЛПЦ-3, также выбранный метод по сравнению с другими методами регенерации наиболее эффективно можно использовать на данном производстве.

Анализ проведенных экспериментов показал удовлетворительные результаты. Параметры регенерированного масла соответствуют тем параметрам, при которых возможно дальнейшее использование регенерированного масла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стряпков А.В., Ибраев И.К., Таргинова Г.Б. Утилизация отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей и маслоотходов прокатного производства. // Чёрная металлургия: бюллетень.-1997.- № 8.- С 47-49.
2. Пушкарёв В.В., Южанинов А.Г., Мэн С.К. Очистка маслосодержащих сточных вод // Москва.- Металлургия.- 1980.- С.146-159.
3. [http://www.rosa1.ru/Secondlife/regeneration\\_classic/](http://www.rosa1.ru/Secondlife/regeneration_classic/)
4. Бутов Н.П «Научные основы проектирования малоотходной технологии переработки и использования отработанных минеральных масел». - Зерноград: ВНИПТИ-МЭСХ, 2000.
5. Переработка и использование маслосодержащих отходов металлургического производства. В.Ф. Пивоваров, Сталь. - 2002.- №2. – С. 90-91.
6. <http://www.ecmas.ru/index>.

О.Т. Ибраева, М.М. Сүйіндіков

ӘОЖ 669.145.130

С. Торайғыров атындағы Павлодар

мемлекеттік университеті

## ӨНЕРКӘСІПТІҢ МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТАУ-КЕН САЛАЛАРЫНДАҒЫ ҚОРЛАР МӘСЕЛЕСІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ШЕШУ ЖОЛДАРЫ

*Данная статья основана на решении вопроса, связанного с ресурсами и отходами металлургических предприятий и горных отраслей. А так же способы развития ресурсов и причины, вынуждающие перерабатывать производственные отходы. Авторами предлагается несколько способов переработки отходов, в том числе окучкование, агломерация и брикетирование.*

*In this article examination and analyzed ways utilization departure metallurgy production. The author's one's services new ways utilization departure metallurgy production and use their in the capacity a second time raw materials.*

Табиғи қорлардың қоймаларын жоғарлатудың екі жолы бар: табу, жеткізу, сақтау тәсілдерін жетілдіруге болады немесе оларды пайдалану нәтижелілігін жоғарлатуға болады. Бірінші жағдайда қорларды өңдеу технологиясымен жұмыс істейміз, екіншісінде – оларды пайдалану технологиясымен, немесе қорсақтау технологияларымен істес боламыз. Дәл осы пайдалану технологиялары тұрақты даму концепциясының негізі болып келеді, қайсысылардың өңделуі және жүзеге асырылуы – адамзаттың ғаламдық шикізаттық және экологиялық қауіп-қатеріне жауабы.

Техногенді қалдықтарды қайта өңдеу және пайдаға асыру оларды шикізаттың альтернативті қайнары ретінде пайдалану көз қарасынан ғана емес, сонымен қатар қоршаған ортаны қорғау көз қарасынан да маңызды. Осы кезде технологиялық сапа бойынша қалдықтар жие жер қойнауынан шығарылатын, кендерден артық болады.

Берілген тақырыптың өзектілігі металлургиялық өндірісте пайда болатын екі қайшылық қиылысында пайда болды.

Бір жағынан:

- коксталатын көмірлердің қорлары тапжылмай қысқарып барады, олардың бағасы үнемі өседі;
- табиғи темір кенді шикізат шығарылуы төмендейді, оны байытуға шығындар өседі;
- табиғи қазбалардың жаңа кен орындары мүлде меңгерілмейді;
- энергия ресурстарына және теміржолды тасуларға бағалар үнемі өседі;

Басқа жағынан:

- ондаған жылдар бойы жиналған металлургиялық, машинажасау, тау-кен қазушы және химиялық өндірістерінің, отын-энергетикалық кешеннің қалдықтары бүгінгі күнге қысқарылмайды, ал өсуін жалғастырады;

- осы қалдықтар металлургиялық және химиялық өндіріс маңында орналасқан;
- оларды іздеуге және меңгеруге орасан шығындарды талап етпейді.

Берілген қарама-қайшылықтарды талдау ғылыми есепті екі бағыт бойынша шешуі бойынша тұжырымдауға мүмкіндік берді:

Бір жағынан:

- қалдықтарды қайта өңдеу және пайдаға асыру, оларды металлургиялық өндіріс үшін салыстырмалы арзан шикізат түрінде пайдалану шихтаға шығындарды маңызды төмендетуге, сапасын және бәсеке қабілеттілігін жоғарлатуға, ең бастысы, дайын өнімнің өзіндік құнының төмендетуіне мүмкіндік береді.

Екінші жағынан:

- бүтін аймақтардың тазалаудың экологиялық мәселелерін шешу, қайда қалдықтардың орасан техногенды кен орындары жиналған, сонымен қатар жоғарыда аталған өндірістен қалдықтардың ағымды жинақтарын пайдаға асыру.

Өртүрлі өндірістердің қалдықтарын қайталама пайдаланудың бар технологиялары, алғашқы кезекте, металлургиялық өндірістің – жетімсіз. Мысалы: аглодомналық өндіру кезінде агломенді шламды пайдалану 1 тонна агломератқа 250 кг жоғары емес технологиялық шекке ие болады.

Бірақ орасан қор потенциалына қарамастан, тау өнеркәсіптік қалдықтар елде көбінесе құрылыс индустриясы үшін шикізат ретінде пайдаланылады, бірақ осында да олардың пайда болуының жылдық көлемінен 10% жоғары емес қайта өңделеді.

Қара металдар кендері, ереже ретінде, кешенді емес қолданылады, соның нәтижесінде үйінділерде және қалдық қоймаларында жиналатын, пайдалы компоненттердің маңызды мөлшері жоғалады.

Пайдалы қазбалардың дүниелік шығаруының тұрақты өсуі кезінде жер қойнауынан шығарылатын, шикізаттың тек 10% ғана дайын өнімге айналады, қалған 90% - бұл қоршаған ортаны ластайтын қалдықтар.

Қамтамасыз ету көзқарасынан металлургиялық өнеркәсіп дамуының маңызды факторы қайталама шикізатты пайдалануды кеңейту болып келеді – сүйемендерді және қара және түсті металдар қалдықтарын. Энерго, қор және еңбекті сақтайтын қарқынды технологияларды пайдалану масштабтарының кеңейуі мүлде барлық металлургиялық бөлістерде өндірістердің және өнімдердің бәсеке қабілеттілігін қамтамасыз етуі керек.

Қазіргі ғылыми-техникалық өрлеу шикізатты, материалдардың кешенді пайдалануын және қоршаған табиғи ортаға залалы әсердің төмендеуін қамтамасыз ететін, нәтижелі энергия сақтайтын технологияларымен үздіксіз байланысты.

Металлургиялық өндіріс технологиялық болат шығарудан 30% жететін, алуан қалдықтардың маңызды мөлшерінің пайда болуымен қосталады. Олардың 80% жуық қождар құрастырады, ал 20% жуығы тозандар мен қалған қалдықтарға келеді.

Металлургия үлесіне өнеркәсіптің жалпы шығындарының 38% жатады, олардың ішінде қара металлургия үлесіне - 16% келеді. шетел елдерде маңызды қаражаттар қоршаған ортаның ластануын алдын алатын, шараларға шығындалады, мысалы, Германияда осы соммалар 20-27 долл/т, Солтүстік Америкада – 15 долл/т құрастырады.

Энергияның негізгі пайдаланушысы және қоршаған ортаға залалы заттардың эмиссия қайнары аглодомналық кешен болып келеді (шығындардың 70% жоғары агломерациялық және қоқыс химиялық өндірістеріне келеді). Сондықтан өндірістік жиілігінің осы учаскесіндегі технологияның ұстанымды өзгеруі елеулі нәтиже беруі мүмкін.

Агломерациялық, домналық және болат балқыту өндірістерінде темірқұрамды шламдары және тозандары өнімнің 2-5% немесе 20-50 кг/т құрастырады. Экологиялық салықтарды

алуға ауысуымен өндірістің нақты шығындардың көлеміне, соның ішінде қалдықтарды технологиялық қоқыс тастау жерлеріне шығару көлеміне пропорционал, одан үдемелі компаниялар қалдықтардың мөлшерін олардың пайда болу орындарында қысқарту немесе жою, экологиялық салықтарды төлеуге қарағанда маңызды арзандау екенін түсіне бастады.

Тозандар мен шламдарды пайдаға асыру агломерациялық өндірісте ірі металлургиялық кәсіпорындарында басым өткізіледі. Металлургияда қайталама пайдалану үшін тек алдын ала арнайы дайындалған берілген қалдықтар қолданбалы. Шламдарды қайта өңдеудегі негізгі технологиялық қиындылық – оларды 10-12% ылғалдылыққа дейін сорғыту. Сол кезде толық емес жүйелі машина жасау, болат балқыту және болат илемдеу кәсіпорындарында шламдар басым үйіндерге барады. Осыған орай қазіргі металлургиялық үдерістердің талаптарына жауапты, брикет түріндегі қайталама шикізатқа құрғақ тозанды және шламдарды өңдеу бойынша кіші және орта қуатты кампактілі өндірістердің дамуы өзекті болып келеді.

Көптеген жағдайларда бай темірқұрамды шикізат өзімен жұқадисперсті концентраттарды ұсынады және пештердегі металлургиялық үдерістерді жүргізу қажетті газөтімділігін қамтамасыз ету үшін олардың кесектенуін талап етеді. Осындай бөлістер үшін дәстүрлі шихта агломерат, окатыш, тура қалыптасу темір, құмалы шойын, металл сынықтары, ферромарганец, ферросилиций және т.б., сонымен қатар флюстелетін қоспалар ретіндегі минерал шикізаты болып келеді.

Кесектеу металлургиялық бөлініске құрамында темір болатын материалдарды дайындаудағы өзекті міндеттердің бірі болып келеді.

Қайталама шикізаттар нарығында жүзеге асыру үшін жарамды, тауар өнімін алу үшін, брикет талаптар қатарына жауапты болуы керек:

- металлургиялық үдеріс үшін залалы қоспалар элементі мүмкін деңгейінен жоғары болмауы керек;
- оны келесі тасымалдау үшін жеткілікті, беріктілікке ие болуы керек;
- тасымалдау кезінде ылғалдау кезінде беріктілікті сақтау;
- жоғары температура кезінде беріктілікке ие болуы керек;
- химиялық құрамның біртектілігіне ие болуы керек;
- кесектердің сызықты өлшемдерінің біртектілігіне ие болуы керек;
- дәстүрлімен салыстырмалы, өзіндік бағаға ие болуы керек.

Ұсақ дисперсті тозандарды және шламдарды кесектеу тек қана кәсіпорындарды темірқұрамды материалдардың қосымша қорларымен қамтамасыз етуге және қоршаған ортаға экологиялық жүктемені төмендетуге ғана емес, сонымен қатар негізгі бөлістердің жұмысын тұрақтылауға – шикізатты және домна өндірісін даярлауға мүмкіндік береді.

Теміркөміртекті материалдар (дисперсті компоненттерден окатыштар мен брикеттер) өзінің пайда болуымен темір өндірісінің тиімді тәсілдерін жүзеге асырудағы күрт өзгерісті кезеңін көрсетеді. Компоненттердің дисперсті дәрежесі бойынша дәстүрлі шихтадан олардың ұстанымдық айырмашылығы темір оксидінің көміртегімен және газбен түйіспебетінің аудандары жүйеге жаңа сапаларды хабарлайды. Осы кездегі қалыптасуы қарқындылау өтеді және кесек аралық қуысындағы газдың жоғары тотықтырғыш газымен үйлесімді.

Бүгінгі күнге ұсақ кендерді, концентраттар мен қалдықтарды кесектеудің үш тәсілдері белгілі: агломерация, ұсақталу (кесектеу) және брекиттелуі.

Агломерация – жанудың жоғары температурасы кезінде ұсақ кеннің және концентраттың отынмен қақтала жабысу әдісімен кесектерді (агломератты) алу үдерісі.

Ұсақталу – арнайы аппараттарда жабағыланумен қажетті өлшем мен пішін берілетін, келесі күйдіруімен – жоғары беріктілік берілетін, үлкен немесе кіші ірілікті және беріктікті

окатыштарды жасаудағы ылғалдандырылған жұқа ұсақталған кен бөлшектері немесе концентраттардың қасиеттерінде негізделген, окатыштарды алу үдерісі.

Брикеттелу - қоспаларды қажетті өлшемді және пішінді брикеттерге келесі баспалаумен байланыстыратын заттардың қоспалы немесе қоспасыз кесектерді (брикеттерді) алу үдерісі.

Ұсақ материалдардың құрылымының пайда болу мақсаты тек қана белгілі өлшемді кесектерді алу ғана емес, сонымен қатар берілген физикалық-химиялық қасиеттер кешенін жасанды құрылымдарында жасау болып келеді. Осыған байланысты дайындалған материалдардың сапалы сипаттамаларымен құрылымның пайда болу үдерістерінің техникалық параметрлерінің заңды себепті-тергеу байланыстары бар болады.

0-10 мм фракциялардың ұсақфракциялық материалдары төмен газөтімділігіне ие болады, ол олардың агломерациялық үдерісінде алдын ала дайындықсыз пайдалануын қиындатады.

Байланыстырушы заттармен ұсақдәнді және жұқадисперсті материалдарды брикеттелуі – құнды отын, кенді және минералды шикізат компоненттерін қайта өңдеуге қатыстырудың ең әмбебап тәсілі, сонымен қатар техногенді қалдықтар қатары, қайсысылары өз агрегаттық физикалық қалпы бойынша технологиялық үдерістерде және аппараттарда тікелей пайдалану үшін жарамсыз.

Брикеттеу үдерісінің ерекше ерекшелігі металлургиялық бөліністің агрегаттарының негізгі типтері үшін нәтижелі, шикізаттық қоспалардан брикеттерді жасау мүмкіндігі болып келеді.

Брикеттелетін материалдар және брикеттерді пайдалану саласы кестеде ұсынылған. Тек қана техногенді қалдықтар ғана емес, сонымен бірге бірінші текті ұсақфракциялық және жұқадисперсті шикізаттар да брикеттелуге жататынына көңіл аударуы керек.

Металлургиялық брикетті пайдалану облысынан тәуелді, әрбір нақты металлургиялық бөлініс және оның шикізат, берілген механикалық қасиеттерімен, әртүрлі қоспалы және флюстелетін қоспаларды қосумен талаптарына жауап беретін кез келген брикет құрамын алу мүмкін. Технологиялық тағайындалуы бойынша металлургиялық брикеттерді шартты түрде үш ірі классқа бөлуге болады.

Кесте

Брикеттеуді пайдалану облысы

Қалдықтардың пайда болу орны	Брикеттелетін материалдар	Брикеттерді пайдалану облысы
Домна өндірісі	- газ тазалау шламдары; - аспирационды қондырғылар тозаңы; - кокыс ұнтағы және тозаңы; - ұсақдисперсті алғаш текті шикізат; - флюстелетін компоненттер елегі (ізбес, доломит және т.б.)	Домна пешінің құрамында ауыстырушысы ретінде темірқұрамды және көміртеқұрамды компоненттер. Домна пешінің металл қабылдағыштарын шайю үшін. Домна пешінің металл қабылдағыштарының гарнисажын өсіру үшін.
Аглодомна өндірісі	Агломерат елегі <5 мм (11-19%)	Домна шикізатының құрамында
Болат қорыту өндірісі	- газ тазалау шламдары; - аспирация қондырғыларының тозаңы; - кокыс ұнтағы және тозаңы; - илемдеу қағы; - болат және шойын жоңқалары.	Шойын, болат қырғышының ауыстырғышы, карбюратор, конвертерлі, мартеновск, электрогаздық пештеріндегі және вагранкаларындағы флюстік қоспалары ретінде
Машинажасау және металл өңдеу	- илемдеу және темір соғатын қағы; - болат және шойын жоңқалары; - металл елегі; - аспирация қондырғыларының тозаңы.	Шойын, болат қырғышының ауыстырғышы, карбюратор, конвертерлі, мартеновск, электрогаздық пештеріндегі және вагранкаларындағы флюстік қоспалары ретінде

Қоқысхимиялық кәсіпорындар және көміртек құрамды материалдардың басқа өндірушілері	- шартқа сәйкес сұрыпталмаған көміртекқұрамды електері мен шламдары.	Металлургиялық кәсіпорындарына жеткізу.
Тау-кен қазушы кәсіпорындар	- құрамында көміртегі бар концентраттарды елеу <5 мм; - ұсақфракциялы біртекті шикізат; - ізбесті, доломитті елеу <5 мм; - көмірлерді, антрациттерді елеу <5 мм.	Металлургиялық кәсіпорындарына жеткізу.
Қайталама қорларын өңдеу бойынша комбинаттар	- болат және шойын жоңқалары; - кокыс елеулері.	Металлургиялық кәсіпорындарына жеткізу.
Орман кәсіпорны	- ағаш көмірінің ұнтағы және тозаңы; - лигносульфонаттар.	Металлургиялық кәсіпорындарына жеткізу.

Бірінші класқа өзі қалыптастыратын брикеттер жатады, яғни брикет компоненттері темір және көміртегі оксидінен тұрады, қалыптастырған темірді қалыптастыруға және көміртектендіруге баратын. Қалыптастыру және тотықтыру атмосфера жағдайында бұл қатынас әртүрлі. Көміртегі – оксидтер – темір қатынасын реттеудің қайталама факторы брикеттің ашық кезектілігі болып келеді, қайсысы бір жағдайда брикет деңесінде өтетін, пештегі үдерістер үшін қалыптастырушы газды тартады, басқа жағдайда, көміртектің қосымша тотығуы үшін оттекті жібермейді. Берілген класты брикеттер жұмысының негізгі ұстанымы брикет ішіндегі осы құраушылардың көптеген және қатты дамыған түйіспелер арқасында темір оксидтерінің көміртекпен тура қалыптасуы болып келеді.

Осы жағдайда компоненттердің фракциялық құрамы үлкен қызмет атқарады, ол жеткілікті ұсақ болуы тиіс, яғни қоқыс фракциясы үшін – 3 мм кіші, оксидтер үшін – 5 мм кіші. Брикеттердің берілген типі болат балқыту бөлінісінде шойынды немесе болат сынықтарын алмастырады және карбюратор қызметін атқарады, домналықта – қоқысты тиімділейді. Брикеттегі темір құрамы металлургиялық бөліністің композициялық шихтасынан кем болмауы өте маңызды. Мысалы, бөліністік шойында жұмыс істейтін, домна пештерінің қосынды шихталарындағы темір құрамы орташа 44-45% құрастырады. Құрамында темір оттегісі бар брикеттерді пайдалану сондай және жоғары темір құрамымен тек қана қоқысты үнемдеуге емес, сонымен бірге агрегаттың өнімділігін жоғарлатуға мүмкіндік береді. Осы көзқарас бойынша шламдарды, қабатты тозаңмен, электрсузгіштерден тозаңдарды пайдалану брикеттер құрамында шектеледі.

Тотықтырғыш және қалыптастырушы компоненттердің, сонымен қатар фракциялық құрамының қатынасының бос өзгеру мүмкіндігі әртүрлі металлургиялық агрегаттардағы шойын мен болатты балқыту кезінде металл шихта құраушысы ретінде біз ұсынатын металлургиялық брикеттерді пайдаланудың технологиялық құндылығын және мақсатқа лайықтығын негіздейді.

Нақты металлургиялық бөлініс үшін компоненттердің есепті құрамы маңызды дәрежеде тотықтырылғын құрамында темір болатын материалдардың қалыптасуы үшін қажетті жылу энергиясының және металлургиялық қоқыстың шығындарын өтеуге мүмкіндік береді.

Брикетте дамыған фаза аралық бетпен және қажетті кезектілікпен көміртегі мен

темір оксидінің болуы брикет деңесіндегі және шихтаның дәстүрлі түрлерімен салыстыру бойынша алдында пайда болған СО темір оксидінің қалыптасуын қамтамасыз етеді.

Көміртектің тотығуы өзімен күрделі көп кезенді гетерогенді реакцияны ұсынады, ол энергетикасы жоғары СО және СО<sub>2</sub> оксидтердің қоспасы түрінде газ фазасының пайда болуымен аяқталады. Осыдан шығады, оксидтеміркөміртектіқұрамды брикеттердің ең маңызды көрсеткіші көміртектің тотығу жылдамдығы болып келеді, яғни, темір оксидінің қалыптасу жылдамдығы, ол әсіресе болат балқыту бөлініс үшін өзекті.

Осы көрсеткіш брикет компонентінің фракциялық құрамымен анықталады. Темірдің көміртекпен қалыптасудың қаттыфазалық реакцияның дамуы арқасында брикет деңесінде 1150-1170°C дейін қыздыру кезінде темір оксидтері толық қалыптасады, сонымен бірге 0,5% С/мин тең, көміртектің тотығуының жылдамдығының максимумы 1000-1050°C температуралар аралығында болады, осы кезде қаттыфазалық өзара әрекетесудің басталуы 800°C температура кезінде өтеді. Брикетте оксидтер басым болған кезде, не болат балқыту бөлініс кезінде маңызды, шойын қоспаларының тотығуы СО және СО<sub>2</sub> бөлінетін сұйық металдардың шомылдырықтарын тұрақты барботация кезінде, оксидтердің оттегі арқасында болады. Домна бөлініс үшін көміртегі және темір тотықтарының қатынасы солай таңдалуы керек, яғни олардың толық қалыптасуын қамтамасыз ету.

Екінші класқа көміртекті құраушылар қосылмайтын, металлургиялық брикеттер жатады, яғни олардың негізі қалыптасқан темір, темір оксидтері және флюстелетін тұтқырлар болып келеді. осы брикеттердіңтехнологиялық міндеті шойын бөлшектерінің елегін, шойын жоңқаларын, металл електерін, бөлшектелген болат жоңқаларын, қабыршақтарды және басқаларын жатқызуға болатын, ұсақфракциялы және жұқадисперсті материалдардан темірдің жоғары құрамды фракциялық шихтаны жасаудан тұрады. Берілген жағдайда экономикалық нәтиже үдерістің газдинамикасын жақсарту, шихтадағы темір құрамының жоғарлауы, шихта шығындарын төмендету арқасында жеткізіледі.

Үшінші класқа бірінші және екінші кластармен жанасқан және арнайы брикеттер жатады. Мысалы, илемдік қабыршақ негізіндегі брикеттер, жалпы темірдің, темірдің шала тотығы (60% дейін) жоғары құрамды болатын, домна пештерінің металл қабылдағыштарының жуатын темірқұрамды материалы ретінде пайдаланылады, титанқұрамды компоненттер негізіндегі брикеттер (соның ішінде феррованадийлік өндірістің металл елегі), керісінше, гарнисажды өсіру үшін пайдаланылады.

Құрамында маранецтің жоғары құрамымен ұсақфракциялық компоненттерді қосу шойынның марганцтік құйма маркаларын балқыту үшін арналады. Бұл шойын және болат өнірісі кезінде қажетті, тең дәрежеде қалған қосылатын компоненттерге де қатысты. Осы кластың брикеттері, көміртекті құраушыларды қосуымен, бірінші және екінші класстардың үстемдіктерін жартылай біріктіреді, яғни қоқысты үнемдейді, газ динамикасын жақсартады, темір құрамын көбейтеді, қоспалы компоненттерді өнгізеді. Берілген жағдайда көміртекті құраушысының фракциялылығына талаптар төмендейді және жеке жағдайларда алдын ала ұнтақтаусыз домна пештерінен қоқыстың електерін пайдалануға рұқсат етеді.

Брикеттің шүбасыз үстемдіктеріне келесілерді жатқызуға болады:

- брикеттер дұрыс бірыңғай берілген пішінге және орнықты салмаққа ие. Берілген көлемде металл құрамы басым, жоғары беріктілікке және жақсы тасмалдауға жарашылыққа ие болады;
- тым жоғары меншікті салмаққа ие;
- брикеттердің экологиялық қауіпсіздігі (қалдықсыз, жасау кезінде жоғары температуралары болмайды);
- металлургиялық пеште үдерістерді белсендіру үшін көміртекті құрамды

толтырғыштың кез келген қатынасты брикетте пайдалану мүмкіндігі (карбюратор, қалыптастырғыш, энергия тасымалдаушы);

- брикеттегі барлық оттегі белсенді болып қалады;

- брикетте жұқадисперсті темірфлюскоспалы көміртеққұрамды материалдардың барлық түрлерін пайдалану мүмкіндігі.

Сөйтіп барлық металлургиялық бөлініс түрлері үшін дәстүрлі емес байланыстырушыны және көміртекті толтырғышты пайдалануымен металлургиялық брикетті жасау, яғни ұстанымды жаңа композициялық шихтаны жасау өнеркәсіптің қалдықтарын металлургиялық бөлініске теміркөміртектіқұрамды брикеттер түрінде, жеткілікті жоғары рентабелды шикізат ретінде қайтаруға мүмкіндік береді.

Сондай брикеттерді жасау аймақтың экологиялық жағдайын жақсартып, металлургиялық кәсіпорындар бөлінісінің техникалық-экономикалық көрсеткіштерін маңызды жақсартуға мүмкіндік береді.

Ж.Ж. Камзин, Р.В. Пак,

УДК 669.0124.005

АО «Казахстанский электролизный завод», г. Павлодар

И.К. Ибраев, М.М. Суюндиков

Павлодарский государственный университет

им. С. Торайгырова

## РАСТВОРИМОСТЬ ГЛИНОЗЕМА В ЭЛЕКТРОЛИТ-ГЛИНОЗЕМНОМ РАСПЛАВЕ

*Мақалада өндірілетін алюминийдің сапасы және үрдістің өнімділігі тәуелді болатын, электролит-глиноземді балқымада глиноземнің және криолит-глиноземді қабықтың еру жылдамдығына әсер етуші технологиялық факторлар талданған. Қатарына электролиттің құрамы, температурасы және асыра қыздыру, салынатын глиноземнің мөлшері, араластыру шарты жататын технологиялық факторларының және бастапқы қасиеттері глиноземнің электролит-глинозем балқымасында ерігіштігіне әсерін тигізетіні көрсетілді. Электролиттегі  $Al_2O_3$  концентрациясының жетерліктей жоғары деңгейде болған кезінде глинозем қасиеттерінің өзгеруі еру жылдамдығының 5 және одан да көп есе өсуіне әкелетіні анықталды.*

*In this article analyzed technological factors influenced on speed solution alumina and criolit-alumina crust in electrolyte-alumina melting, from which in so far as it depended on productivity processes and quality productizing to aluminium. Demonstration, that on solubility alumina in electrolyte-alumina melting influenced him initial relations and technological factors, whom to take temperature and over heating electrolyte, his composition, quantity loading alumina, requisite of mixing. Establishment that attached to sufficiently highest concentrations  $Al_2O_3$  in electrolyte changes relation of alumina make to bring in creases speed solutions in 5 and more times.*

На скорость растворения глинозема влияют его исходные свойства и технологические факторы, к которым относят температуру и перегрев электролита, его состав, количество загружаемого глинозема, условия перемешивания.

В ряде работ отмечено, что технологические параметры электролиза могут оказывать большее влияние на скорость растворения, чем свойства глинозема. Так, Вэлч [1] и Кашел [2] полагают, что изменение технологических условий может вызвать многократное (30 кратное по [1]) увеличение скорости растворения, в то время как изменение свойств глинозема - только двукратное. Измерения скорости растворения глиноземов разного качества [3] показали, что при достаточно высоких концентрациях  $Al_2O_3$  в электролите изменение свойств глинозема может привести к увеличению скорости растворения в 5 и более раз.

**Исследования растворимости глинозема**

Условия эксперимента:

- масса растворяемой навески глинозёма соответствовала увеличению его концентрации в электролите на 0,5 % и составляла 1 г или 0,035 г/см<sup>2</sup>;
- состав электролита, %: KO = 2,5; CaF<sub>2</sub> = 6,5; MgF<sub>2</sub> = 1,5, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2,5;
- температура электролита составляла 980 °С, температура перегрева 9 °С.

Электролит подвергался электрохимической очистке, корректировке и усреднению.

Наблюдения показали, что при загрузке глинозёма в электролит он образует корку, которая некоторое время плавает на поверхности (7-12 с), а затем тонет в электролите (рисунок 1).

При опускании на дно тигля корка разрушается на куски, которые со временем полностью растворяются. При загрузке фторированного глинозёма образуется более «рыхлая» корка, которая быстрее разваливается на куски и осыпается с краёв, как находясь на поверхности, так и при опускании на дно тигля. Распад корки фторированного глинозёма сопровождается её «взрывами», за счет испарения влаги и летучих соединений.

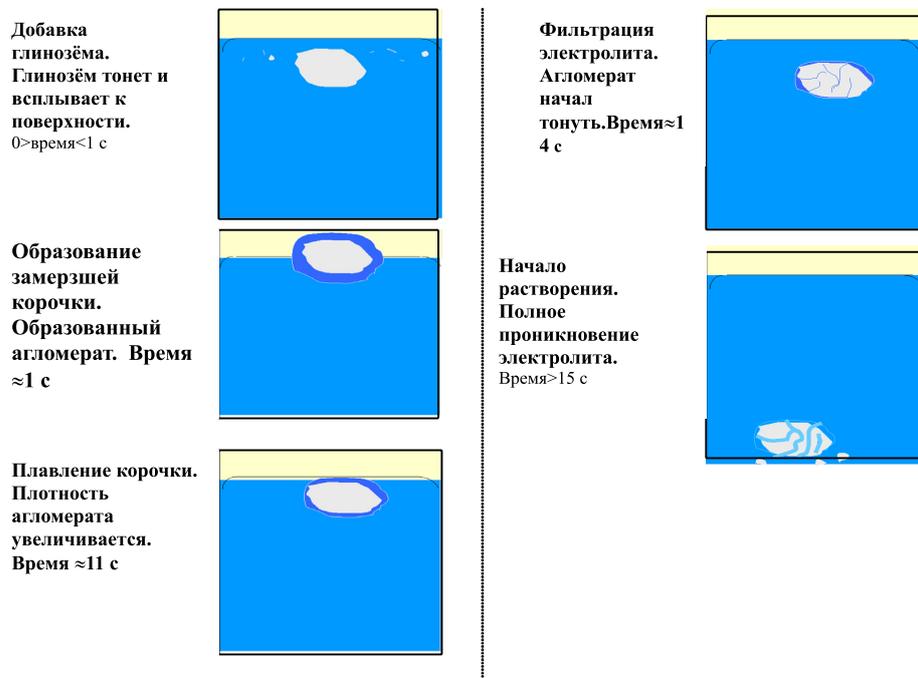


Рисунок 1 - Механизм растворения глинозема

На рисунке 2 приведены графики полного растворения первичных и фторированных глинозёмов в зависимости от его исходной концентрации в электролите, полученные визуальным методом.

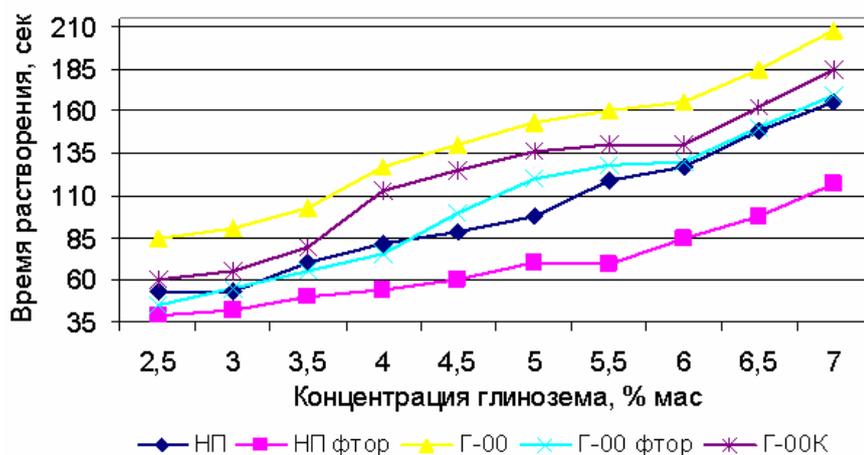


Рисунок 2 - Зависимость времени полного растворения глинозёма от его концентрации в электролите

Анализ рисунка 2 показывает, что из свежих глиноземов быстрее растворяется недопрокаленный в не зависимости от его концентрации в электролите. Наименьшую скорость растворения имеет глинозем марки рядовой.

Сравнения скоростей растворения первичных и фторированных глиноземов показывает, что фторированный глинозёмы растворяется в два раза быстрее первичного. Это связано в основном с бурным (в виде взрывов и развала корки) удалением паров воды и летучих соединений, которые образуются при горении смолистых и углерода. При этом отмечено, что фторированный глинозем марки рядовой имеет одинаковую скорость растворения с первичным недопрокаленным глиноземом.

В опыте с использованием электрохимического метода производилась загрузка первичного глинозёма марки рядовой в электролит с концентрацией 2,5 %  $Al_2O_3$ . На рисунке 3 представлена зависимость доли растворённого глинозёма от времени.

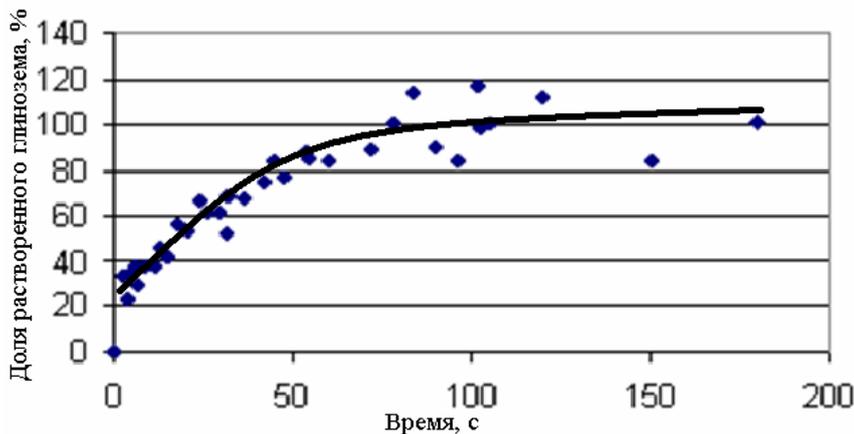


Рисунок 3 - Зависимость доли растворённого глинозёма от времени

Среднее значение тока при исходной концентрации глинозёма в электролите составило 0,9 А, а при установившейся концентрации после растворения глинозёма 1,5 А. Из рисунка 3 видно, что часть глинозёма (чуть больше 20 %) растворилась очень быстро, в течение нескольких секунд. Оставшаяся часть растворялась значительно медленнее. Наибольшая скорость растворения соответствует глинозёму, который диспергировал на отдельные частицы в электролите после загрузки, а наименьшая скорость характерна растворению образовавшихся агломератов глинозёма. Анализ данных показывает, что быстро растворившаяся часть составила чуть больше 20 %, по данным других исследователей, которые использовали песчаный глинозём, она составляет около 40 %. Такое различие связано с различием свойств используемых глинозёмов. Количество быстрорастворимого глинозёма тем больше, чем меньше время полного растворения навески глинозёма.

Время полного растворения, определённое электрохимическим методом, составила в среднем девяносто секунд, что хорошо согласуется с данными визуальных исследований, при которых среднее время полного растворения составила восемьдесят пять секунд.

В таблице 1 представлены данные измерения времени растворения рядового глинозёма в зависимости от криолитового отношения, концентрации фторидов кальция и магния и температуры электролита.

Таблица 1  
Время полного растворения навески рядового глинозёма (Г-00) при различных составах и температурах электролита

Состав и температура электролита	Время полного растворения в сек. при концентрации глинозёма, % масс.		
	3	4	5
КО-2,2; CaF <sub>2</sub> -6,5 %; MgF <sub>2</sub> -1,5 %; T <sub>эл</sub> -980 °С	105	154	172
КО -2,4; CaF <sub>2</sub> -6,5 %; MgF <sub>2</sub> -1,5 %; T <sub>эл</sub> -980 °С	87	138	150
КО-2,5; CaF <sub>2</sub> -6,5 %; MgF <sub>2</sub> -1,5 %; T <sub>эл</sub> -970 °С	90	143	164
КО-2,5; CaF <sub>2</sub> -6,5 %; MgF <sub>2</sub> -1,5 %; T <sub>эл</sub> - 980 °С	78	130	140
КО-2,5; CaF <sub>2</sub> -6,5 %; MgF <sub>2</sub> -1,5 %; T <sub>эл</sub> -990 °С	73	99	116
КО-2,5; CaF <sub>2</sub> -6,5 %; MgF <sub>2</sub> -2,5 %; T <sub>эл</sub> -980 °С	83	133	143
КО-2,5; CaF <sub>2</sub> -7,5 %; MgF <sub>2</sub> -1,5 %; T <sub>эл</sub> -980 °С	81	131	144
КО-2,6; CaF <sub>2</sub> -6,5 %; MgF <sub>2</sub> -1,5 %; T <sub>эл</sub> -980 °С	69	81	124

Анализ результатов эксперимента, представленных в таблице 1, показывает, что уменьшение температуры электролита на 5 °С или криолитового отношения на 0,1 приводит к увеличению времени растворения глинозёма на 10 %.

#### Исследования растворимости криолит-глиноземной корки

Для экспериментов отбирались криолит-глиноземные корки образованные свежим рядовой и укрупненным глиноземом, а также фторированным укрупненным глиноземом.

Место отбора проб: на электролизерах с продольной стороны.

Из отобранных кусков криолит-глиноземной корки приготавливались образцы для растворения, которые имели форму куба. Масса образцов составляла 2,5 грамма, что при загрузке в электролит соответствовало увеличению концентрации глинозёма на 0,5 %.

Наблюдения показали, что при загрузке в электролит криолит-глиноземные корки тонут, и спустя 40 ч 60 секунд начинают разрушаться на дне тигля. Корка, образованная первичным рядовым глиноземом, разрушается быстрее корки, образованной укрупненным глиноземом. Это связано с более высоким содержанием фракции менее 45 мкм и  $\alpha$ -фазы в глиноземе марки рядовой. Глинозем с большим содержанием фракции -45 мкм и  $\alpha$ -фазы плохо смачивается электролитом, сетка из переплетенных кристаллов  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  образуется слабо и поэтому корка легче распадается на куски, попадая в электролит. После полного разрушения корки, глинозем, входивший в ее состав, растворялся из образовавшегося на дне осадка.

Корка, образованная фторированным глиноземом, разрушается быстрее корок, образованных свежим глиноземом. Кроме того, из корок, образованных фторированным глиноземом, протекает более бурное, по сравнению с коркой, образованной первичным глиноземом, удаление паров воды и летучих соединений (в виде пузырей), которые способствуют разрушению корки. После полного разрушения корки, глинозем, входивший в ее состав, так же растворялся из образовавшегося на дне «песчаного» осадка.

На рисунке 4 приведены зависимости времени полного растворения криолит-глиноземных корок при различных концентрациях глинозема в электролите. Так же на рисунке 4 для сравнения приведена зависимость растворения глинозема Г-00.

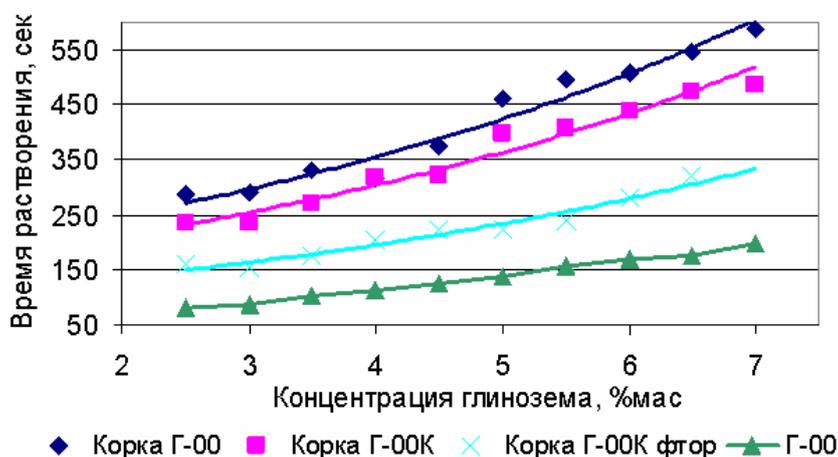


Рисунок 4 - Времени полного растворения криолит-глиноземных корок и рядового глинозема в зависимости от концентрации глинозема в электролите

Из рисунка 4 видно, что корка, образованная рядовым глиноземом, растворяется в 1,5 раза медленнее, чем корка, образованная укрупненным глиноземом. При этом корка, образованная глиноземом марки рядовой, растворяется в среднем в 2,5 раза медленнее, чем рядовой глинозем. Корка, образованная фторированным глиноземом, растворяется в 1,3 и 1,5 раза быстрее, чем корка, образованная свежим глиноземом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. J. Welch. Aluminas in Aluminium Smelting. 10 th. Int. Course on Process Metallurgy of Aluminium. Trondheim, Norway. 1991, chapter 13, p. 1-29.
2. G. I. Kuschel, B. J. Welch. Light Metals. 1991, p. 299-305.
3. L. Isaeva. Light Metals. 1998.
4. Материалы высших алюминиевых курсов.- Красноярск, 2005.

**А.Л. Касенов, С.Д. Токаев**

**УДК 621.1:664.723**

*Семипалатинский государственный университет*

*им. Шакарима, г. Семипалатинск*

**Т.М. Жакупов**

*Екибастузский инженерно-технический институт*

*им. академика К.И.Сатпаева, г. Екибастуз*

## **ИЗУЧЕНИЕ УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ СЛОЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Мақалада газдық ағындағы дисперстік материалдардың үстінен дымқылды механикалық жолмен өшіру процессін тану бойынша теоретикалық және практикалық зерттеулер жасалған. Газдың оптималдық жылдамдылығын анықтау бойынша және қажетті кептіру уақытында дымқыл материалдар бөліктері алынған.*

*In the given work results theoretical and mechanical researches on studying mechanical removal process of moisture from surface dispersion materials with gas steam. Received dependence on definition optimal speed of gas and necessary time lands of puffs damp materials.*

Известно, что в существующих сушильных установках не используется полностью физический потенциал потока теплоносителя – его кинетическая энергия. Поэтому для обеспечения оптимального режима сушки, заключающегося не только в тепловом испарении влаги, но и в механическом обезвоживании материала, требуются высокие значения относительной скорости газа и материала. В этой связи должно быть отличие в скоростях движения материала и газа. Размеры частиц могут быть настолько малы, что их скорость приблизится к скорости теплоносителя. Поэтому нецелесообразно дезагрегировать дисперсный материал до величины составляющих его частиц. В то же время, относительно большие агрегаты не обеспечивают необходимую площадь контакта с теплоносителем, значительное количество влаги остается внутри их. Необходима дезагрегация материала до размеров агрегатов, позволяющих обеспечить большую площадь контакта и высокую относительную скорость теплоносителя и материала. Эти параметры в конечном итоге определяют не только время сушки, но и энергозатраты на процесс. В этой связи открываются принципиально новые возможности при использовании высокоскоростного потока низкотемпературного газового теплоносителя, воздействующего на агрегаты влажного материала и обеспечивающего механическое удаление поверхностной влаги, что имеет значительные преимущества перед известными видами сушки.

Рассмотрим подробнее механизм уноса влаги при силовом воздействии газового потока на влажные дисперсные материалы. Взаимодействие высокоскоростного потока теплоносителя с агрегатами или отдельными частицами материала обуславливает формирование капли и её унос из слоя. Если силы поверхностного натяжения влаги меньше сил скоростного напора теплоносителя, то капли отрываются от агрегатов.

Предложенный механизм механического уноса влаги отличается от описанного в работе [1], автор которого считает, что отрыву пленки предшествует перераспределение по поверхности частицы влаги, образующейся из равномерного покрытия оболочки дисперсных материалов, причем движение жидкости происходит послойно [2]. На наш взгляд, указанный механизм уноса влаги объясняется высокой влажностью материала, когда частицы покрыты относительно толстой пленкой влаги.

Будем считать, что удаление капелек влаги происходит на границе между газом и жидкостью, т.е. в зоне сил вязкостного трения [3]. Примем, что начало образования капли диаметром  $d_k$  происходит тогда, когда давление внутри её от сил поверхностного натяжения уравнивается скоростным напором:

$$\zeta \frac{\rho_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma}^2}{2} = \frac{C_0}{\text{Re}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma}^2}{2} = \frac{C_0 \rho_{\Gamma} \mu_{\Gamma} C_{\Gamma}^2}{2V_{\Gamma} d_k \rho_{\Gamma}} = \frac{4G_{\text{жс}}}{d_k}, \quad (1)$$

где  $\zeta$  - коэффициент трения, ( $\zeta = \frac{C_0}{\text{Re}}$ );  $C_0$  - коэффициент, зависящий от режима обтекания капли газом;  $\rho$ ,  $\mu_{\Gamma}$ ,  $V_{\Gamma}$  - плотность, динамическая вязкость и относительная скорость газа соответственно;  $G_{\text{жс}}$  - коэффициент поверхностного натяжения воды;  $V_{\Gamma}$  - скорость газа (теплоносителя). Для вычисления коэффициента  $C_0$  воспользуемся критерием устойчивости газожидкостной системы -  $K$  [4]:

$$K = \frac{8}{C_0} \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{жс}}}} = \text{const} = 6,5 \cdot 10^{-5}.$$

Следовательно:

$$C_0 = 1,23 \cdot 10^5.$$

Из соотношения (1) получим интересное нас выражение для относительной скорости газа, необходимой для механического удаления влаги (срыва капель):

$$\frac{C_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} = \frac{8G_{\text{жс}}}{C_0 \mu_{\Gamma}} = \frac{6,5 \cdot 10^{-5}}{\mu_{\Gamma} \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{жс}}}}}. \quad (2)$$

С другой стороны, уравнение движения агрегата диаметром  $d_{\text{аз}}$  и массой  $M_{\text{аз}}$  в криволинейном канале запишется в виде [5]:

$$M_{\text{аз}} \frac{dV_{\text{м}}}{d\tau} = C_0 \frac{\pi d_{\text{аз}}^2}{4} \rho_{\Gamma} \frac{C_{\Gamma}^2}{2} - \Psi \frac{M_{\text{аз}} V_{\text{м}}^2}{R}, \quad (3)$$

Откуда получаем (для условий равновесия):

$$C_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{1 + \sqrt{\frac{3R\rho_{\Gamma}}{4Kd_{\text{аз}}\rho_{\text{м}}}}}, \quad (4)$$

здесь  $C_{\Gamma} = (V_{\Gamma} - V_{\text{м}})$  - относительная скорость газа;  $V_{\text{м}}$ ,  $\rho_{\text{м}}$  - скорость и плотность материала;  $\Psi$  - коэффициент сопротивления, учитывающий совокупность сил, тормозящих движение агрегата (соударение и трение их друг о друга и о стенку сушилки, поперечная кориолисова сила и др.);  $R$  - радиус установки;  $K = \Psi / C_0$  - приведенный

коэффициент, характеризующий соотношение сил (факторов торможения и гидродинамического сопротивления при движении агрегата).

Приведенный коэффициент сопротивления  $K$  в дальнейшем будем определять по эмпирической зависимости, аналогичной приведенной в [5]:

$$K = 2,5 \cdot 10^{-3} d_{az}^{-0,75}$$

С учетом этого коэффициента из соотношения (4) получим уравнение для определения оптимального диаметра агрегата из частиц влажного материала:

$$d_{az} = \left[ \frac{3R\rho_{\Gamma} \cdot 10^2}{\left(\frac{V_{\Gamma}}{C_{\Gamma}} - 1\right)^2 \rho_{\Gamma}} \right] \quad (5)$$

Для реализации полученного выражения (5) необходимо иметь информацию о виде зависимости между скоростями материала и газа. Согласно оценкам для движущихся в трубах-сушилках дисперсных материалов [1]:

$$V_M = 61,5 Fr^{0,5} \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_{\Gamma}}\right)^{-1} \cdot V_{\Gamma}, \quad (6)$$

где число Фруда –  $Fr = \frac{V_{\Gamma}}{\sqrt{gd_{az}}}$ . Тогда выразим уравнение (6) в следующем виде:

$$\sqrt[4]{d_{az}} = \frac{61,5 V_{\Gamma}^{1,5}}{\sqrt[4]{g} V_M} \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_{\Gamma}}\right)^{-1}. \quad (7)$$

Анализ зависимости (5) показывает, что с увеличением дезагрегации материала (с уменьшением диаметра агрегата) необходимо увеличить скорость газового потока. Это в свою очередь, приводит к увеличению расхода энергии, а с другой стороны снижает общее количество поверхностной влаги, удаляемой потоком газа. Таким образом, в процессе обезвоживания материалов в результате срыва газом капли жидкости скорость газа и диаметр агрегатов материала играют большую роль.

Подставим в (7) выражение (5), получим уравнение следующего вида:

$$\frac{3R \cdot 10^2 \rho_{\Gamma}}{\left(\frac{V_{\Gamma}}{C_{\Gamma}} - 1\right)^2 \rho_M} = \frac{V_{\Gamma}^{0,5} \cdot 61,5}{\sqrt[4]{g} \cdot V_M} \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_{\Gamma}}\right)^{-1}. \quad (8)$$

Следовательно,

$$\frac{3R \cdot 10^2 \cdot C_{\Gamma}}{\left(\frac{V_{\Gamma}}{C_{\Gamma}} - 1\right)} = \frac{61,5}{\sqrt[4]{g}} \cdot \sqrt{V_{\Gamma}} \cdot V_M,$$

тогда

$$\frac{300\sqrt[3]{g}}{61,5} R = \left( \frac{V_r}{C_r} - 1 \right) \frac{V_r}{C_r} \cdot \sqrt{V_m}, \quad (9)$$

где из (2) имеем:

$$\frac{C_r}{V_r} = \sqrt{\frac{8G_{ж}}{V_r \cdot C_o \cdot \mu_r}}$$

С учетом последнего выражения, уравнение (9) окончательно будет иметь вид:

$$\frac{300\sqrt[3]{g}}{61,5} R = \left( \sqrt{V_r} \cdot \sqrt{\frac{C_o \mu_r}{8G_{ж}}} - 1 \right) \sqrt{V_r} \cdot \sqrt{\frac{C_o \mu_r}{8G_{ж}}} \cdot \sqrt{V_m}. \quad (10)$$

Механический срыв жидкости при помощи скоростного низкотемпературного теплоносителя приводит в итоге к значительному ускорению общего процесса влагоудаления. В этом случае испарению подлежит лишь внутренняя влага в агрегате материала.

Продолжительность сушки при постоянных условиях определяется по приближенному уравнению [5]:

$$\tau = \frac{W_n - W_{кр}}{N} + \frac{W_{кр}}{N} \cdot 2,31g \frac{W_{кр}}{W_k}, \quad (11)$$

где  $N$  – скорость сушки в первом периоде (при постоянной скорости сушки);  $W_n$ ,  $W_{кр}$ ,  $W_k$  – начальное, критическое и конечное влагосодержание материала (на сухое вещество).

Оценим влияние условий срыва жидкости на продолжительность процесса сушки, уравнение (11). Для этого видоизменим начальное влагосодержание материала  $W_n$  исходя из следующих соображений. Так как влагосодержание определяется как отношение массы влаги  $M$ , содержащейся в теле, к массе сухого тела  $C_1$ , то при тепловом испарении, в отличие от предложенного метода, уравнение (11) включает как «внутреннюю», так и поверхностную влагу агрегата. В нашем случае в качестве начального влагосодержания, входящего в (11), необходимо подставить лишь «внутреннюю» влагу материала. Таким образом, уменьшение времени сушки при срыве жидкости с поверхности влажных тел, запишется в следующем виде:

$$\Delta\tau = \left[ W_n - \left( \frac{100 \frac{M_a}{C_1} - 100 \frac{M_n}{C_1}}{100 - \frac{M_a - M_n}{C_1}} \right) \right] / N. \quad (12)$$

здесь  $M_a$ ,  $M_n$  – масса влаги внутри и на поверхности агрегата материала;  $M_a = M - M_n$ ;

Массу сухого тела можно определить в первом приближении как

$$C_1 = \rho_M \cdot V_M = \rho_M \cdot \frac{1}{6} \pi d_{a2}^3.$$

Подставляя в (11) экспериментальные значения  $M_a$ ,  $M_n$  и среднее значение  $N$  для различных дисперсных материалов получим величину, характеризующую снижение времени сушки.

По расчетам для сушки зерна с начальной 20% и конечной влажностью – 14%, размерами  $d_{az} \approx 3\text{мм}$  требуется скорость газового потока, не ниже 30 м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Утеуш З.В. Управление измельчительными агрегатами. - М.: Машиностроение, 1983. - 223 с.
2. Филиппов В.А. Конструкция, расчёт и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. -М.: Недра, 1979. - 310 с.
3. Сорока Е.И. Разработка комбинированного способа сушки, основанного на дезагрегации дисперсных материалов и механическом уносе влаги с целью экономии топлива: Дис. ... канд. техн. наук. - Свердловск: ВНИИМТ, 1990. - 132 с.
4. Максимов Е.В., Альжанов М.К., Койлыбаев Ж.А. и др. Сушка железорудного концентрата в опытно-промышленной установке вихревого типа // Бюл. Черметинформация, 1988. №10. - С.32-33.
5. Альжанов М.К., Максимов Е.В., Сорока Е.И. и др. Сушка глины и кварцита // Огнеупоры, 1990. №1. - С. 43-44.

**А.Л. Касенов, С.Д. Токаев**

**УДК 621.1:664.723**

*Семипалатинский государственный университет*

*им. Шакарима г. Семипалатинск*

**Т.М. Жакупов**

*Екибастузский инженерно-технический институт*

*им. академика К.И.Сатпаева г. Екибастуз*

## **СПОСОБ СУШКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И УСТАНОВКА ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

*Мақалада ауылиаруашылығы мәдениеттерінің бөлек және біріккен кептіру амалдары қарастырылып, «салқын» немесе жылы ауаның материалдың дымқыл бөлігінен сорылу нәтижесі берілген. Қондырғының белгілі бір аймақтың климат жағдайларына қарай тиімді мүмкіндіктері мен қондырғының әлдеқайда жай түрін қолданудағы кептіру процессінің тиімсіздігі қарастырылған.*

*In given article are considered separate and combined drying of agricultural culture, in the of suction "cold" and warm air from damp material. Abilities of effective using of installation depending on climate conditions in given district and price-reduction of drying process at the expense of using more simple installation.*

Данная установка относится к технике обезвоживания и сушки сельскохозяйственных продуктов, преимущественно зерновых культур. Известен способ сушки сыпучих материалов, в том числе зерна, на сплошной или сетчатой ленте потоком теплоносителя, который проходит над слоем высушенного материала к противотоку [1]. Недостаток данного способа – низкая производительность и запыленность окружающей среды. Известен способ обезвоживания угля в трубах - сушилах (аналог 2) потоком высокоскоростного воздуха [2]. К недостаткам этого способа обезвоживания следует отнести неравномерное удаление влаги из объема материала и отсутствие данных по его опробованию на сельскохозяйственных культурах. Известен способ сушки окатышей с использованием газообразного теплоносителя на агломерационной машине (прототип) [3]. Недостатки способа заключаются в следующем: использование дефицитного и дорогостоящего природного газа и большая металлоемкость установки. Известна установка для обработки зерна (аналог 1), которая содержит закрытую камеру с входом и выходом, а также устройство для подачи тепла в камеру и конвейер с зерном, проходящий вдоль камеры [4]. Недостатки установки: большой расход тепла на нагрев камеры и значительная металлоемкость установки и невозможность ее перевозки. Известна установка для сушки трав и семян зерновых (аналог 2), включающая воздушнонагревательную печь; три ленты для сушки и ленту для охлаждения семян, емкость, в которой помещены ленты и другое вспомогательное оборудование [5]. К недостаткам установки следует отнести отсутствие возможности мобильного перемещения установки из одной местности в другую, большой расход тепла на нагрев емкости, сложность в изготовлении.

Известна агломерационная машина для сушки никелевого концентрата (прототип) с просасыванием теплоносителя через слой шихты [6]. Недостатки установки: сложность в изготовлении, невозможность транспортировки установки. Решаемые задачи представленной установки заключаются в раздельном и/или совместном обезвоживании и сушке сельскохозяйственных культур, в результате просасывания через слой влажного материала «холодного» или нагретого воздуха, удешевлении процесса сушки за счет использования более простой установки, возможности эффективного применения установки в зависимости от климатических условий данной местности. Достижимый технический результат, который может быть получен при осуществлении предлагаемого изобретения, заключается в следующем:

- удалении части влаги из сельскохозяйственных культур низкотемпературным потоком воздуха (механический срыв влаги);

- удалении оставшейся влаги нагретым воздухом.

К существенным признакам заявляемого изобретения относятся:

- использование слоя влажного материала, высотой не более 500 мм;

- использование перфорированной ленты или колосниковой решетки.

Отличительными признаками предлагаемого способа являются:

- просасывание влажного слоя материала воздухом окружающей температуры, а затем, при необходимости, нагретым воздухом;

- возможность обезвоживания и сушки материала при неподвижной ленте (колосниковой решетке);

- использование вместо спекательных тележек перфорированной ленты (колосниковой решетки);

- использование вместо зажигательного горна калорифера;

- установка может быть стационарной;

- установка может быть передвижной;

- установка может быть комбинированной.

По предлагаемому изобретению на перфорированную ленту (колосниковую решетку) загружают влажный материал и, используя вакуум-насос или вентилятор через слой просасывают воздух (рисунок 1). Если влажность материала высокая, выше ленты устанавливают калорифер и осуществляют сушку материала нагретым воздухом. В случае, когда влажность исходного материала очень высокая ленту останавливают, а обезвоживание и сушку материала проводят в неподвижном состоянии. Высушенный материал охлаждают известными способами или на складе готовой продукции.

Пример конкретного выполнения способа.

Сушку пшеницы проводили на агломерационной чаше диаметром 300 мм, полностью моделирующую агломерационную машину. Начальную влажность зерна изменяли от 16 до 32%, высоту слоя от 80 до 500 мм, а разрежение от 600 до 1400 мм. вод. ст. Оптимальная влажность зерна принимается равной 14%.

Результаты экспериментов по определению рационального режима сушки, приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Сушка зерна на перфорированной ленте

Время прососа слоя «холодным» воздухом, мин	5	7	9	11	13	15
Содержание влаги в пшенице, %	20	18	17	16	15	14

Таблица 2

Сушка зерна на перфорированной ленте

Время прососа слоя нагретым воздухом, мин	5	7	9	11	13	15
Содержание влаги в пшенице, %	28	24	20	18	16	14

Следует отметить, что эксперименты проводились при высоте слоя, равной 250 мм и при разрежении 1200 мм. вод. ст. В таблице 1 приведены данные, когда исходная влажность зерна составляла 23%, а в таблице 2 она составляла 33%. Температура нагретого воздуха составляла 2200С.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что при относительно небольшой влажности (23%) прососом слоя, расположенного на перфорированной ленте, «холодным» воздухом можно за 15 минут удалить необходимое количество влаги (таблица 1). В случае сушки зерна большой влажности необходимо использовать нагретый воздух (таблица 2).

Влияние температуры нагрева воздуха на качество зерна отражено в таблице 3.

Таблица 3

## Показатели качества зерна

Температура нагрева воздуха, оС.	Содержание клейковины в зерне, %	Группа зерна
50	30.4	1
100	30.2	1
150	28.8	1
220	28.4	1

С повышением температуры нагрева воздуха от 50 до 220оС содержание клейковины в пшенице понизилось всего на 2%. Зерно продолжало относиться к первой категории.

В таблице 4 приведены данные по результатам сушки зерна в различных установках.

Таблица 4

## Сравнительные данные по сушке зерна

Влагосодержание, %		Затраты тепла, кДж/кг		
Унач	Укон	Вихревая камера	Зерносушилка «Целинная-60»	Установка с перфорированной лентой
21	14	28,3	21,4	16,3
33	14	34,9	27,6	20,8

Таким образом, затраты тепловой энергии на сушку 1 кг влажного материала в установке, в которой просос воздуха через слой осуществляется на перфорированной ленте, оказываются значительно меньше (таблица 4). Следует отметить, что предлагаемую установку можно собрать на большегрузном автомобиле, например КАМАЗЕ с прицепом, и перевозить из одной местности в другую. Это особо важно для Казахстана, где чередуются засушливая и дождливая погода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. - Л.: «Химия», 1979. - 272 с.
2. Филиппов В.А. Технология сушки и термоаэроклассификация углей. - М.: Недра, 1987. - 287с.
3. Кателова И.Н., Королев А.С., Сергеева И.В. Предпосылки создания технологии сушки никелевого концентрата НГМК на агломашинах // Журнал «Обогащение руд», 1991. № 4. - С. 20 -23.
4. Патент США № 3942267 // Опубликовано 09.03.1976. Том 944, №2.
5. Зимин Е.М. Комплексы для очистки, сушки и хранения семян в нечерноземной зоне. - М.: Россельхозиздат, 1978. - С. 144-146.
6. Костылева И.Н., Королева А.С., Сергеев И.В. Предпосылки создания технологии сушки никелевого концентрата НГМК на агломашинах // Обогащение руд, 1991. №4. - С.20.

В.А. Козионов

УДК 624.131.22:519.87

*Павлодарский государственный  
университет им. С. Торайгырова*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПРЕССИОННОЙ СЖИМАЕМОСТИ ВАЛУННО-ГЛЫБОВЫХ ГРУНТОВ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

*Талдаудың математикалық модельдеуі әдісі арқылы құзды және балшықты топырақтағы геокомпозиттердің тығыздығын зерттеу нәтижелері келтіріледі. Геокомпозиттердің олардың құрылымдарының параметрлерімен және механикалық қасиеттерімен модулінің байланыс теңдеуі алынады.*

*The results of compressibility of rocky and argillaceous soil geocomposites researches by the method of experimental mathematic modeling are introduced in the article. The equation that connects compressive module of geocomposites deformation with the parameters of their structures and mechanical characteristics of components is derived*

При геотехнических исследованиях для различных видов строительства часто возникает необходимость определения механических характеристик грунтов, представляющих собой природные смеси включений из крупных скальных обломков различной формы, ориентации в пространстве, степени трещиноватости и выветрелости с неоднородным песчаным или глинистым заполнителем, например, в виде щебеннистого суглинка или супеси. Типичным примером таких массивов являются валунно-глыбовые отложения. Выделяемые из них объемы разных размеров характеризуются различным строением, состоянием и часто составом, т.е. представляют собой масштабно неоднородные тела. С позиций механики такие массивы грунтов можно рассматривать как геокомпозитную среду природного образования. Стандартные методы определения их свойств оказываются малоэффективными, так как в масштабах обычных лабораторных и полевых испытаний не удается обеспечить представительность, т.е. однородность образца грунта. В последние годы для исследования этих грунтов используется метод математического моделирования эксперимента [1], позволяющий определять механические параметры грунтов по показателям свойств их компонент на основе метода конечных элементов (МКЭ). Такой подход дает возможность исследовать значительные объемы массива грунтов и удовлетворять условию представительности при любом размере элементов неоднородности. Основной объем выполненных к настоящему времени данным методом исследований относится к изучению плоской деформации грунтов типа двухосное сжатие.

Постановка задачи и метод исследования. В работе ставится задача исследования компрессионной сжимаемости представительного объема геокомпозита из валунно-глыбовых грунтов с учетом выделенных элементов структурной неоднородности заполнителя и включений. Для решения задачи использован метод математического моделирования эксперимента, модифицированный применительно к условиям компрессионного испы-

тания грунтов. Определение механических характеристик включений и заполнителя производилось экспериментальным путем. Далее с помощью МКЭ моделировалось по расчетной схеме компрессионное сжатие представительного объема всего геокомпозиата, и определялись его эффективные (осредненные по объему) характеристики деформируемости.

Результаты определения механических свойств включений. Экспериментальные исследования включений проводились на крупномасштабных монолитах трещиноватого мергеля размером в плане до 0,5×0,5 м методом кольцевого нагружения [2]. По результатам испытаний получены следующие характеристики [3]: модуль деформации  $E = 212000 \text{ кПа}$ ; сцепление  $C = 600 \text{ кПа}$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 29^\circ$ ; коэффициент относительной поперечной деформации  $\nu = 0,128$ . Наряду с прямыми экспериментами проводились параллельные опыты по измерению ультразвуковым прибором скорости прохождения через монолит продольных упругих волн  $V_p$ . По их результатам построена корреляционная зависимость [2] для определения модуля деформации  $E$ , МПа

$$E = 11,5 \cdot v_p^{5,2}. \quad (1)$$

Использование (1) позволяет снизить трудоемкость испытаний включений и проводить их в условиях естественного залегания грунтов.

**Результаты определения механических свойств заполнителя.** Экспериментальные исследования заполнителя проводились на смесях суглинка с дресвой. Физические характеристики суглинка: влажность  $W = 0,205$ ; влажность на границе раскатывания  $W_p = 0,158$  и на границе текучести  $W_L = 0,296$ . Сжимаемость заполнителя изучалась на компрессионных приборах. Определялись также параметры прочности заполнителя на срез. При выполнении испытаний была использована теория планирования многофакторного физического эксперимента. Число факторов было принято равным трем, их численные значения варьировались на двух уровнях (+1 и -1):  $Z_1(n)$  – процентное содержание включений (-1 – 0,2; +1 – 0,4);  $Z_2(d)$  – крупность включений дресвы (-1 –  $d 0,5$ ; +1 –  $d 1,0$ );  $Z_3(W)$  – влажность заполнителя (-1 –  $W = 0,205$ ; +1 –  $W = 0,255$ ). Некоторые данные этих испытаний были опубликованы ранее в работе [4]. На рисунке 1а приведены характерные компрессионные кривые исследованных грунтов при различном содержании включений размером  $d=5 \text{ мм}$ . Их анализ показывает, что зависимости  $\varepsilon = f(p)$  в диапазоне  $p = 0 \dots 0,35 \text{ МПа}$  имеют нелинейный характер.

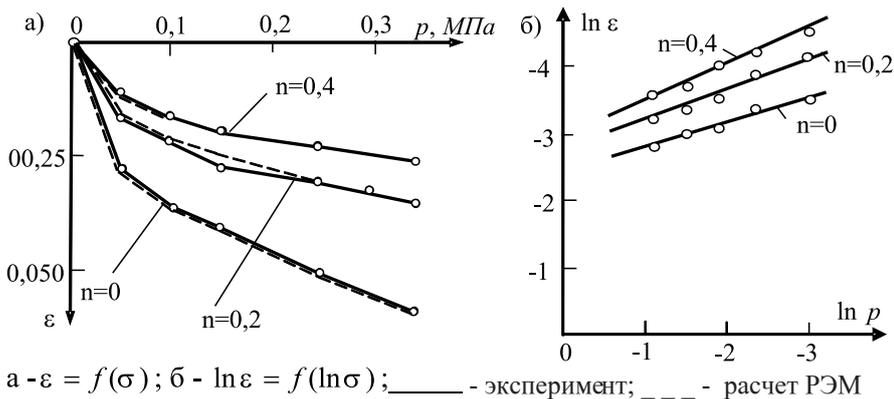


Рисунок 1 – Компрессионные зависимости для исследованных грунтов

Анализ компрессионных зависимостей относительной деформации сжатия заполнителя  $\varepsilon$  от давления на образец  $p$ , т.е.  $\varepsilon = f(p)$  показал, что они удовлетворительно аппроксимируются степенной зависимостью при всех исследованных значениях параметров  $n, d, w$

$$\varepsilon = A \cdot p^K \quad (2)$$

где  $A, K$  – параметры компрессионной кривой.

Результаты обработки  $\varepsilon = f(p)$  в логарифмических координатах  $\ln \varepsilon - \ln p$  показали, что параметры  $A$  и  $K$  зависят, в общем случае, от всех исследованных параметров  $n, p, d, w$ . Таким образом, для величины модуля деформации заполнителя  $E_S^3$  существует зависимость вида  $E_S^3 = f(n, p, d, w)$ . Так, для начального интервала давлений  $p = 0,00 - 0,05$  МПа и стабилизированных во времени деформаций  $\varepsilon$  получено следующее уравнение

$$E_S^3 = 1,7 + 0,2 * z_1 - 0,1 * z_2 - 0,33 * z_3 + 0,05 * z_1 * z_2 + - 0,075 * z_1 * z_3 + 0,625 * z_2 * z_3 + 0,125 * z_1 * z_2 * z_3, \quad (3)$$

где  $z_i = (Z_i - Z_{i0}) / \Delta Z_i$  – кодированные значения факторов  $Z_i$ ;  
 $Z_i, \Delta Z_i$  – натуральные значения факторов и интервал их варьирования;  
 $Z_{i0}$  – нулевой уровень факторов  $Z_i$ .

В дальнейшем исследовании использовались экспериментальные зависимости вида  $E_{Si}^3 = f(n, p)$ . В этом случае, как показали результаты вычислений, параметр  $K$  в (2) изменяется в узких пределах 0,384...0,466, а значение параметра  $A$  составляет 11,031...22,010 и существенно зависит от содержания включений  $n$ .

**Результаты математического моделирования компрессионного сжатия.** На рисунке 2 приведены варианты расчетной схемы типового фрагмента массива валунно-глибового грунта размером 2,8×1,4м, состоящего из включений мергеля (1) и заполнителя – суглинка с дресвой (2). Размер включений составляет 0,1 – 0,2 м, что позволяет рассматривать представленный фрагмент «типовой структуры» как квазиплоской образец грунта.

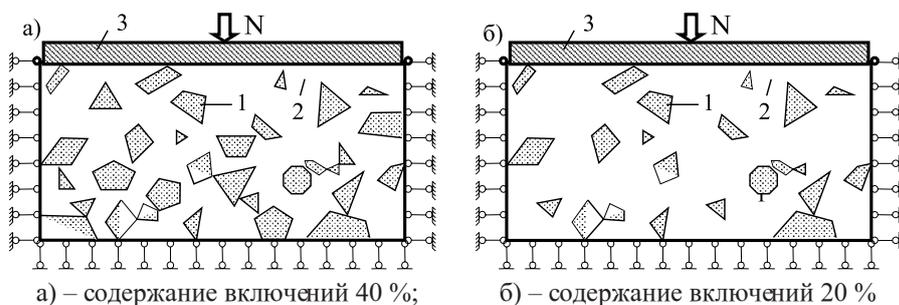


Рисунок 2 – Расчетная схема фрагмента массива неоднородного грунта

Такие структуры разрабатываются по результатам инженерно-геологических изысканий участка строительства. На них отражаются особенности состава и расположения структурных элементов (твердые включения, заполнитель, зоны контактов элементов),

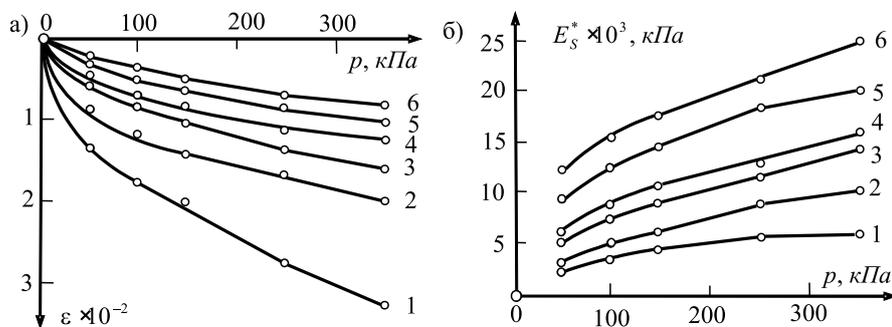
их размеры, форма и содержание. Эти работы выполняются путем фотографирования площадок массива, анализа гранулометрического состава грунтов и другими методами, изложенных в работе [5].

При математическом моделировании компрессионного испытания нагрузка на образец грунта  $N$  передавалась через штамп 3 (рисунок 2) ступенями 50...100 кПа. На боковых гранях образца ставилось условие отсутствия горизонтальных перемещений, а на нижней границе – отсутствие вертикальных перемещений. Задача решалась МКЭ по программе SCAD. Расчеты выполнялись в условиях плоской деформации с разбивкой заполнителя и включений на конечные элементы треугольной формы.

По данным расчетов МКЭ сначала устанавливались абсолютные вертикальные перемещения штампа компрессионного прибора  $S_p$ , а затем относительные деформации грунта  $\varepsilon_i = S_p/h$ , где  $h$  – высота образца грунта. Для определения  $S_i$  по данным физических экспериментов с образцами заполнителя определялись текущие значения компрессионного модуля деформации грунта  $E_{Si}^3$  для каждой ступени нагрузки  $P_i$ . Полученные значения  $E_{Si}^3$  использовались в расчетах типовых структур грунта МКЭ для определения их эффективных характеристик сжимаемости: текущего компрессионного модуля деформации  $E_s^*$ ; коэффициента Пуассона  $\nu_s^*$ ; параметров нелинейности  $A_s^*$  и  $K_s^*$  (аналоги формулы 1).

Математическое моделирование выполнялось с применением теории планирования вычислительного эксперимента. Варьировались на нижних и верхних уровнях факторы:  $X_1 = n$  – содержание дресвы в заполнителе (0,2 и 0,4);  $X_2 = m$  – содержание включений мергеля (0,2 и 0,4);  $X_3 = r$  – отношение модулей деформации включения  $E_a$  и суглинка  $E_c$  (50 и 116). Проведены также дополнительные вычисления при значениях  $r = 10, 25$  и 75.

Характерные зависимости  $\varepsilon = f(p)$  и  $E_s^* = f(p)$  построенные по результатам математического эксперимента, приведены на рисунке 3. Их анализ показывает, что они также имеют нелинейный характер и существенно зависят от содержания включений мергеля и дресвы. В результате обработки зависимостей  $\varepsilon = f(p)$  в логарифмических координатах  $\ln \varepsilon - \ln p$  по формуле (1) получено, что параметр  $K_s$  изменяется в пределах 0,40...0,64, а значение параметра  $A_s$  существенно зависит от факторов  $X_i$  и составляет 0,0014...1,8410.



1 – m=0,2, n=0; 2 – m=0,2, n=0,2; 3 – m=0,2, n=0,4; 4 – m=0,4, n=0;  
5 – m=0,4, n=0,2; 6 – m=0,4, n=0,4

Рисунок 3 – Зависимости для типовых структур: а)  $\varepsilon = f(p)$ ; б)  $E_s^* = f(p)$

Методом факторного анализа получено следующее эмпирическое уравнение для модуля деформации  $E_s^*$  в интервале  $p = 0...0,10$  МПа

$$E_s^* / E_c = -0,5322 + 2,9215X_1 + 7,4713X_2 - 0,0066X_3 + 0,3278X_1X_2 - 0,0010X_1X_3 + 0,0761X_2X_3 + 0,1279X_1X_2X_3. \quad (4)$$

Зависимость (4) может быть построена для иных интервалов давления  $P$ . На рисунке 4 приведены данные вычислений  $E_s^*$  типовых структур по формуле (4) с учетом дополнительных расчетов по оценке влияния жесткости мергеля на сжимаемость грунтов.

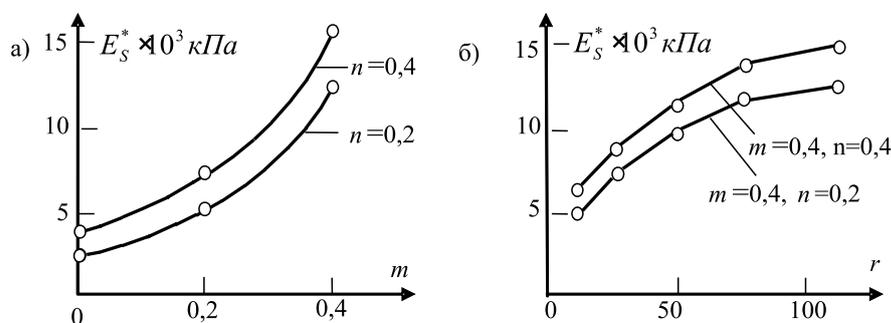


Рисунок 4 – Графики зависимости: а)  $E_s^* f(m)$ ; б)  $E_s^* = f(r)$  при  $P = 100$  кПа

Результаты вычислений указывают на наличие сложной функции  $E_s^* = (f(n, m, r, p))$  и подтверждают «армирующее» влияние включений на сжимаемость грунтов. Данные определений  $E_s^*$  по формуле (4) и по другим методикам в сопоставимых условиях не противоречат друг другу. Так, при  $m = 0,4$  и значениях  $n = 0,2$  и  $n = 0,4$  расчетом по формуле (4) получено соответственно  $E_s^* = 12653$  кПа и  $E_s^* = 15500$  кПа, а по методике ДальНИИСа для предварительных оценок  $E_s^* = 17000$  кПа. Данные рисунка 4б хорошо согласуются с результатами работы [1], где получено, что при величине  $r > 100$  включения можно считать абсолютно жесткими телами. Зависимость (4), в отличие от соотношений механики композитов [6] и отмеченных выше работ отражает структурную неоднородность заполнителя и включений. При наличии в заполнителе крупных неоднородностей эффективные его характеристики  $E_s$ ,  $V_s$ ,  $A_s$  и  $K_s$  могут быть также определены методом математического моделирования эксперимента. В качестве примера на рисунке 1а приведены кривые  $\varepsilon = f(p)$  (пунктир) построенные по результатам математического моделирования компрессионного сжатия суглинка с дресвой. Их отличие от физических экспериментов не превысило 3...9 %.

### Выводы

1. Обоснована методика определения характеристик нелинейного деформирования валунно-глыбовых грунтов с заполнителем в условиях компрессионного сжатия с учетом их структурно-механических особенностей.

2. Представленная методика рекомендуется в качестве дополнения к существующим способам оценки характеристик деформируемости валунно-глыбовых грунтов, когда использование типовых испытаний затруднено или невозможно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ухов С.Б., Конвиз А.В., Семенов В.В. Механические свойства крупнообломочных грунтов с заполнителем // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1993. – № 1. – С. 2 – 7.
2. Рекомендации по определению характеристик реологических свойств скальных и полускальных грунтов методом кольцевого нагружения. – Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. – 111 с.
3. Козионов В.А. Методы испытаний трещиноватых скальных грунтов: учебное пособие. – Павлодар : Издательство Кереку, 2006. – 118 с.
4. Козионов В.А., Кудерин М.К., Варламова Л.А., Искужанов А.Е. Прогноз сжимаемости глинистых грунтов с древесно-щебенистыми включениями // Наука и техника Казахстана, 2007. – № 2. – С. 46 – 59.
5. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М. : Недра, 1986. – 256 с.
6. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М. : Мир, 1982. – 334 с.

**В.А. Козионов**

УДК 624.131:624.1

*Павлодарский государственный  
университет им. С. Торайгырова***О.В. Тарасова***ТОО НПФ «Севказэнергоремонт», г. Павлодар*

## КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ НА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ С КРУПНООБЛОМОЧНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

*Ақырғы элементтер әдісін сандық модельдеу нәтижесі бойынша тазшаңды-балшықты топырақтағы үй қалыптарын анықтау кезінде оның тек қана өлшемі мен құрамын ғана емес, үй қалыптары мен құзды қиыршықтың төменгі қабатының өлшемі арасындағы қатынас көлемін де есепке алу қажеттігі де беріледі.*

*According to the results of numerical simulation of FEM it is revealed that while evaluating the foundation settlement on powder-argillaceous soils with boulder-blocky inclusions it is strongly recommended to take into account not only the size and the content of inclusions but also the correlation between the bottom of foundation and rocky debris*

Строительство современных высотных зданий и сооружений часто связано с использованием в качестве их оснований крупнообломочных грунтов с заполнителем или разнообразных пылевато-глинистых грунтах с крупнообломочными включениями. При расчетах осадок фундаментов на таких грунтах необходимо учитывать в соответствии с рекомендациями СНиП РК 5.01-01-2002 размер и содержание имеющихся в них крупнообломочных включений (валуны, глыбы) из скальных пород. Главным образом это относится к установлению глубины сжимаемой толщи грунтов под фундаментом. В тоже время специфика крупнообломочных грунтов с заполнителем как композитов природного образования, обуславливает необходимость учета в расчетах осадок фундаментов и ряда других параметров, таких как отношения: размеров включений  $d$  к представительному объему образца грунта  $h$ ; размера расчетной области основания  $\Lambda$  к величине  $h$ ; размеров подошвы фундаментов  $b$  к величинам  $d$ ,  $h$ ,  $\Lambda$  и др. Численные значения подобных параметров для задач механики композитов приведены в работе [1]. Применительно к задачам фундаментостроения в работе [2] приведена геомеханическая модель основания из крупнообломочных грунтов с заполнителем, позволяющая учитывать изложенные выше особенности расчетов, а также требования механики композитных материалов.

Целью данной работы, является исследование влияния ряда структурно-фазовых особенностей пылевато-глинистых грунтов с крупнообломочными включениями на осадку ленточных фундаментов различной ширины с применением указанной геомеханической модели основания. Решение этих задач осуществлялась путем математического модели-

рования взаимодействия фундамента с крупнообломочным основанием. Численные расчеты проводились методом конечных элементов (МКЭ) по лицензионной программе SCAD.

Методика исследований. В качестве основания рассматривался неоднородный грунт, механические свойства которого приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1

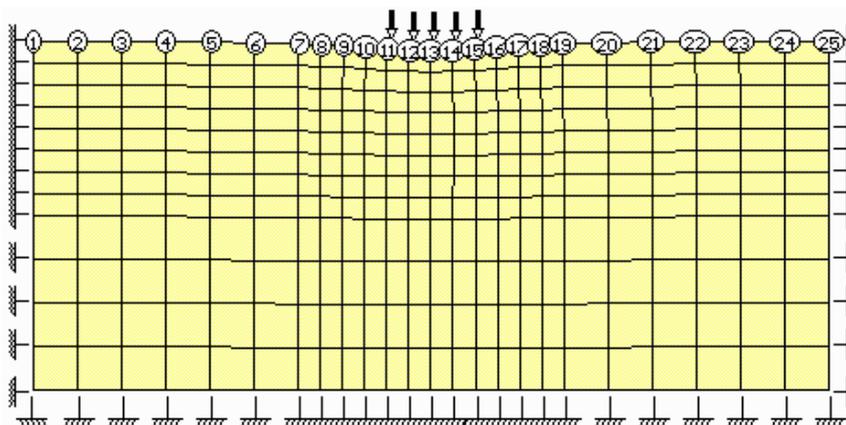
Механические характеристики грунтов

Механические характеристики	Компоненты модели		Эффективные (средние) параметры	
	Мергель	Суглинок	n = 0,2	n = 0,4
Модуль сдвига G, КПа	86436	2148	4831	6079
Модуль деформации E, КПа	195000	5800	13430	16780
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,128	0,35	0,39	0,38
Сцепление, КПа	600	46	45	50
Угол внутреннего трения, град.	29	32	27	33

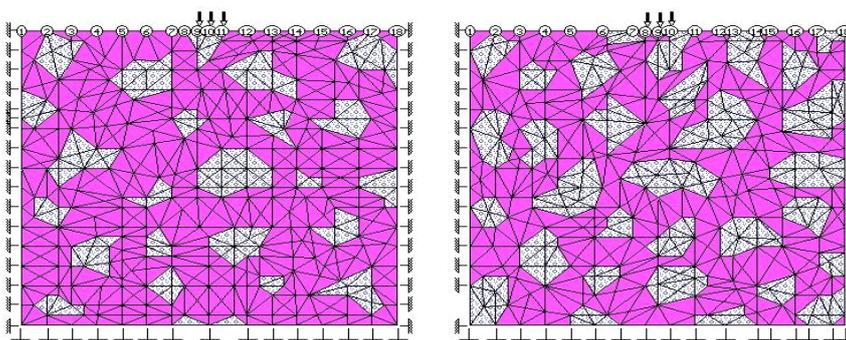
Механические характеристики включений и заполнителя описывались моделью бездилатансионной упругоидеальнопластической среды. Условие прочности описывалось критерием Кулона – Мора. Сетка разбивки содержала до 410 конечных элементов.

Математическое моделирование проводилось на трех типах расчетных моделей основания, представленных на рисунке 1.

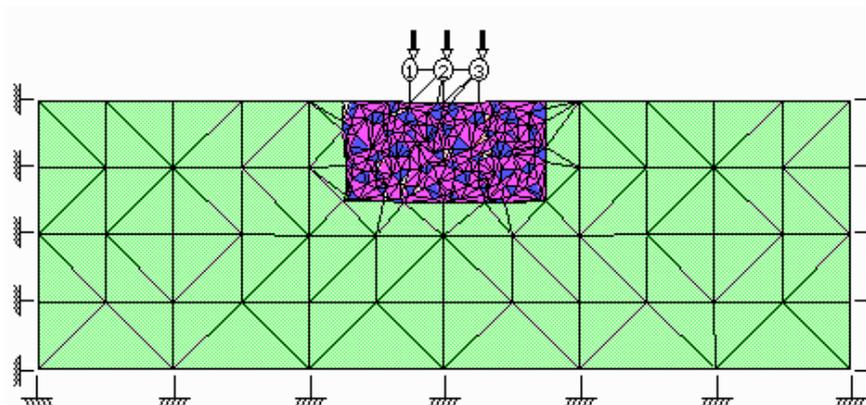
а)



б)



в)



а - квазиоднородное основание (схема А); б – дискретно-неоднородное основание с соотношением  $d/b=1,0 \dots 3,0$  (схема Б); в – дискретно-континуальное основание с соотношением  $d/b=0,1 \dots 0,3$  (схема В)

Рисунок 1 – Расчетные схемы оснований из глинистых грунтов с крупнообломочными включениями

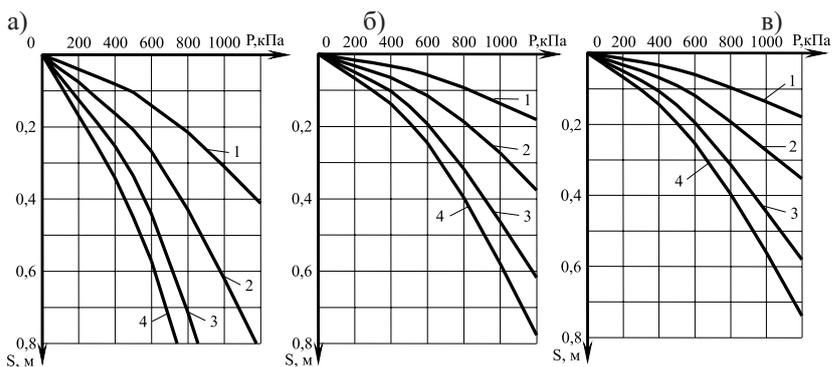
Схема А – квазиоднородное основание для расчета осадок фундаментов по механическим свойствам заполнителя и усредненным параметрам включений мергеля и заполнителя из суглинка (рисунок 1а, таблица 1).

Схема Б – дискретно-неоднородное основание с отношением размеров включений к ширине подошвы ленточного фундамента  $d/b=1,0 \dots 3,0$  (рисунок 1б).

Схема В – дискретно-континуальное основание (наличие на макроуровне зон неоднородности и квазиоднородности) при  $d/b=0,1 \dots 0,3$  (рисунок 1в).

Все расчеты МКЭ проводились для вариантов содержания включений  $n = 0\%, 20\%$  и  $40\%$  при размерах ширины подошвы фундамента  $b = 1, 2, 3$  и  $4$  м.

Анализ результатов численных экспериментов. Рассмотрим, первоначально, особенности осадок фундаментов для оснований, моделируемых квазиоднородной средой (рисунок 1а – схема А). Зависимости осадок фундаментов  $S$  от среднего давления по их подошве  $P$ , т.е.  $S = f(P)$ , приведены на рисунке 2.



а) –  $n = 0$ ; б) –  $n = 0,2$ ; в) –  $n = 0,4$ ; 1 –  $b = 1$  м; 2 –  $b = 2$  м; 3 –  $b = 3$  м; 4 –  $b = 4$  м  
Рисунок 2 – Графики  $S = f(P)$  для квазиоднородных оснований по схеме А

Из рисунка 2 следует, что графики  $S = f(P)$  имеют нелинейный характер и существенно зависят как от содержания включений, так и ширины подошвы фундамента. Учет крупнообломочных включений может уменьшить расчетную осадку фундамента до 56%. Для аппроксимации графиков  $S = f(P)$  использована формула [4]

$$S = \frac{(1-\nu^2)\omega \cdot b}{A_z^{1/m}} P^{1/m}, \quad (1)$$

где  $A_z$  и  $m$  – коэффициент деформируемости и параметр упрочнения;

$\omega$  – коэффициент формы и жесткости фундамента;

$\nu$  – коэффициент относительной поперечной деформации грунта.

Определение параметров  $A_z$  и  $m$  осуществлялось по компьютерной программе. Результаты их вычислений для схемы А приведены в таблице 2.

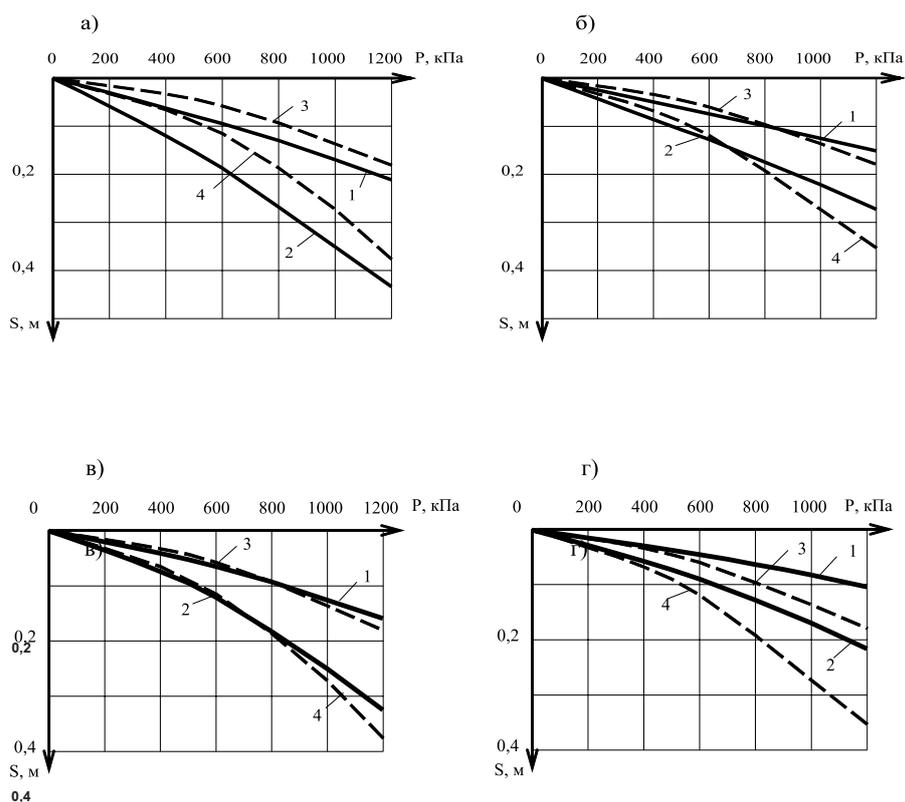
Таблица 2

Параметры нелинейного деформирования основания

Показатели	Значения параметров $A_z$ и $m$					
	$b = 1$ м			$b = 2$ м		
	Схема А	Схема Б	Схема В	Схема А	Схема Б	Схема В
$n=0,0$						
$A_z$	0,186	0,186	0,186	0,470	0,470	0,470
$m$	1,21	1,21	1,21	1,23	1,23	1,23
$n=0,2$						
$A_z$	0,156	0,212	0,195	0,413	0,474	0,432
$m$	1,27	1,06	1,09	1,27	1,09	1,18
$n=0,4$						
$A_z$	0,158	0,218	0,192	0,414	0,467	0,432
$m$	1,26	1,01	1,07	1,27	1,02	1,11

Анализ таблицы 2 показывает, что для исследованных квазиоднородных схем крупнообломочных оснований параметр упрочнения  $m$  несущественно зависит от ширины подошвы фундамента и содержания включений, тогда как различие в коэффициентах  $A_z$  для фундаментов шириной  $b=1$  м и  $b=2$  м достигает 60,4%.

Рассмотрим далее особенности расчетных осадок фундаментов, полученных путем учета дискретности строения оснований в соответствии со схемами, приведенными на рисунках 1б (схема Б) и 1в (схема В). Характерные результаты вычислений, представленные в форме графиков  $S = f(P)$ , приведены на рисунке 3.



а, в – для  $n = 0,2$ ; б, г – для  $n = 0,4$ ; 1 – однородная среда  $b=1\text{м}$ ; 2 – однородная среда  $b=2\text{м}$ ; 3 – квазиоднородная среда  $b=1\text{м}$ ; 4 – квазиоднородная среда  $b=2\text{м}$

Рисунок 3 – Графики  $S = f(P)$  для неоднородных оснований по схемам Б и В

Результаты вычислений параметров нелинейного деформирования  $A_z$  и  $m$  для схем оснований Б и В приведены в таблице 2.

Обобщенный анализ полученных результатов показывает, что учет крупнообломочных включений в основании фундаментов снижает их осадку для всех рассмотренных расчетных схем. Зависимость параметров  $A_z$  и  $m$  от содержания включений ширины фундамента, расчетной схемы основания имеет сложный характер. Для однотипных схем при одинаковой ширине подошвы фундамента величины  $A_z$  и  $m$  несущественно зависят от содержания включений в интервале  $n=0,2 \dots 0,4$ . Вариации параметра  $m$  независимо от использованных величин  $b$  и  $n$  для схем Б и В составляют  $1,01 \dots 1,18$ . Изменения параметра  $A_z$  при фиксированной ширине фундамента для схем оснований Б и В в интервале  $n=0,2 \dots 0,4$  также не столь значительны. В то же время, параметр  $A_z$  существенно зависит от ширины подошвы фундамента.

Рассмотрим соотношения между осадками фундаментов, рассчитанных для рассмотренных выше моделей оснований на примере фундамента шириной  $b = 2 \text{ м}$  при значении  $n = 0,4$ . Данные вычислений приведены в таблице 3.

Осадки фундаментов для различных моделей основания

Ступень давления Р, кПа	Осадки фундаментов, м для моделей основания			
	однородное по заполнителю	среднее по схеме А	неоднородное по схеме Б	неоднородное по схеме В
100	0,0404	0,0160	0,0208	0,0137
200	0,0754	0,0326	0,0424	0,0280
300	0,1210	0,0486	0,0640	0,0423
400	0,1628	0,0678	0,0856	0,0573
600	0,2680	0,1188	0,1274	0,0970

Из таблицы 3 следует, что адекватности осадок не наблюдается ни для одной из рассмотренных моделей оснований. Например, при нагрузке на фундамент  $P=400$  кПа различие в осадках составляет 15,5...33,1%. При этом важно отметить, что наименьшее различие в осадках фундаментов наблюдается для моделей оснований в виде осредненной (рисунок 1а) и дискретно-континуальной (рисунок 1в) сред. Это подтверждает положение о том, что с увеличением отношения  $b/d$  ( $b$  – ширина фундамента,  $d$  – размер неоднородности основания) расчет осадок фундаментов с использованием осредненной модели основания будет лучше соответствовать их фактическим значениям.

При определении осадок фундаментов на пылевато-глинистых грунтах с крупнообломочными включениями необходимо учитывать не только размер и содержание включений, но и величину соотношения между размерами подошвы фундамента и скальных обломков. Учет данного требования можно осуществить путем использования для указанных типов грунтов, рассмотренной дискретно-континуальной модели основания и формулы (1).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В.В. Механика композитных материалов и конструкций из них // В кн. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития. – М. : Стройиздат, 1972. – 191 с.
2. Козионов В.А. Расчетная модель взаимодействия фундаментов с дискретно-неоднородным основанием // Материалы научно-практической конференции «Социально-экономические и исторические предпосылки и приоритеты развития Павлодарского Прииртышья». – Том 3. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова, 2008. – С. 70 – 76.
3. Козионов В.А., Тарасова О.В. Расчетная оценка влияния формы и содержания включений на механические свойства обломочно-глинистых грунтов // Материалы международной научной конференции «VII Сатпаевские чтения». Т.6, Ч. 1. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова, 2009. – С. 120 – 126.
4. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М. : Высшая школа, 1978. – 447 с.

С.Х. Койбагаров, Д.Т. Жайлаубаев  
 Семипалатинский государственный  
 университет им. Шакарима

УДК 637.312.7

## ТЕПЛОМАССОБМЕН В НЕОДНОРОДНОМ СЛОЕ КАПИЛЛЯРНО – ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

*Бір қатар технологиялық процесстердің негізі болатын керекті ортада тасмалдау құбылысын сипаттау, тәртіпсіз орналасқан қозғалмайтын сфералық бөлшектердің біртекті жүйесі ретінде моделденеді. Бұндай статикалық модель шексіз кеудік деңдегі жылу ағынын сипаттау үшін қолданылады.*

*Жылу беру бетінен булану механизме анализ жасау және осы негізде буландырғыш жылуық құбырлардан жылу беру әдісін есептеуді жетілдіру осы жұмыстың өзегі болды. Алынған нәтижелер бос молекулярлы және аралық ағыс тәртібінде еркін кеудік қабаттан булану кезінде масса тасмалдау жылдамдығын есептеу үшін пайдалануға болады.*

*The description of the phenomena of carry in porous environments making a basis of a number of technological processes, is simulated by homogeneous system of the randomly distributed (randomly allocated) motionless spherical particles. Such statistical model is applied to the description of a flow of heat in a unlimited porous body.*

*The analysis of the mechanism of evaporation from a porous surface and development on his (its) basis of a method of account of a heat transfer of thermal pipes were by a subject of the present research. The received results can be used for account of speed of carry at evaporation in a porous layer of any thickness molecular and intermediate modes of current.*

Обеспечение соответствующей температурой обрабатываемого материала ускоряет процессы тепломассообмена в капиллярно – пористых телах.

Известно также, что каждой определенной величине температуры и давления соответствует определенная интенсивность протекания процесса тепломассообмена. Поэтому, изменяя режимы температуры и давления, регулируют движущую силу той или иной технологической операции.

Описание явлений переноса в пористых средах, составляющих основу ряда технологических процессов, во многих случаях целесообразно проводить с помощью методов кинетической теории газов, которые позволяют исследовать течения при различных степенях разрежения.

Например, материалов осуществляется в большинстве случаев в условиях, когда режим течение водяного пара через материал является переходным молекулярно - вязкостным. Кроме того, при сушке, когда длина свободного пробега молекул сравнима с толщиной пленки.

В настоящей работе пористое тело моделируется однородной системой беспорядочно распределенных неподвижных сферических частиц. Такая статистическая модель применяется для описания потока теплоты в неограниченном пористом теле. При этом выражение для потока тепла, пригодное во всем диапазоне изменения чисел Нуссельта записывалось в виде, вязкого потоков.

Рассматриваем медленное изотермическое течение пара через пористый слой толщиной  $L$ , ограниченный с одной стороны поверхностью испаряющей жидкости, а с другой - ее паром, давление которого  $p_1$  при  $x = L$  заодно  $p_1 = p_0$ , где  $p_0$  - давление насыщенного пара. Предлагаемый ниже подход позволил также учесть абсорбцию молекул на частицах; моделирующих остов пористого тела.

Рассмотрим случай отсутствия абсорбции. Для функции распределения молекул газа  $f$  внутри пористого тела записываем уравнение с учетом, эффективной внешней силы  $F$ , являющейся результатом коллективного взаимодействия молекул газа с подвижными частицами:

$$\xi_x = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{F}{m} \frac{\partial f}{\partial \xi_x} = 0.$$

Тем самым задача о течении газа в пористой среде со сложным характером границы раздела и с учетом сопротивления частиц заменяется одномерным кинетическим уравнением с внешней силой  $F$ . Из решения граничной кинетической задачи отдельной сферической частицы радиуса  $R$  в 1 найдена сила, действующая на эту частицу, которая в случае диффузного отражения молекул имеет вид:

$$F_d = F_g \cdot A_1(Nu),$$

где  $F$  – сила Стокса,

$$A_1(Nu) = \frac{15 - 3Nu + 3(8 + \pi)Nu^2}{15 + 12Nu + 18Nu^2 + 54Nu^3}.$$

Значение силы  $F$  получаем из соотношения

$$\varepsilon \cdot n \cdot F = n_d \cdot F_d (\varepsilon - n),$$

( $\varepsilon$ - пористость).

В результате решения уравнения [1] с соответствующими граничными условиями находятся выражения для безразмерной скорости потока тела над пористым телом  $U_L$ , а также для скачка плотности теплового потока на границе пористое тело  $n/1-n$  в случае испарения. При этом скачок плотности давления в отличие от скачков макроскопических величин в кинетической теории теплового потока растет с уменьшением  $Nu$ . Наличие этого скачка обусловлено условиями сопряжения при  $x=L$ .

Для скорости  $U_L$  при испарении получаем выражение:

$$U_L = \frac{-\varepsilon^2 \cdot v_L}{\pi^{\frac{1}{2}} (4 - 2\varepsilon - \varepsilon^2 + A)},$$

где  $v_L = \frac{n_1 - n_0}{n_0}$ ;  $A = \frac{9(1-\varepsilon)}{\pi} \cdot \frac{L}{R} \cdot Nu \cdot A_1(Nu)$

В случае  $L \cdot R^{-1} \gg 1$  скорость, как при испарении, так и при фильтрации имеет вид:

$$U_L = -\varepsilon^2 \cdot v_L / \pi^{1/2} \cdot A.$$

Из [2] на основании соотношения  $nu_L(2kT/m) = -N \frac{dn}{dx}$  определяем проницаемость. В свободномолекулярном режиме находим:

$$N_\infty = \frac{2}{8+\pi} \left( \frac{2\pi kT}{m} \right)^{1/2} \frac{\varepsilon^2 R}{1-\varepsilon}.$$

Что хорошо совпадает с имеющимися теоретическими результатами [3].

Полученные значения сравниваются также с экспериментальными данными, приведенными в [8, 9], где с целью определения характеристик пористых материалов измеряется их проницаемость. В экспериментах использовались различные и разные приготовления лабораторно при  $20 < p < 190$  кПА, что позволило осуществить течение в широком диапазоне К ( $1 < Nu < 90$ ). Для трех ( $\varepsilon \approx 0,7$ ) теоретические и экспериментальные значения  $\chi$  совпадают с хорошей точностью.

Анализ механизма испарения с пористой поверхности и разработка на его основе метода расчета теплоотдачи испарительных тепловых труб явились предметом настоящего исследования.

Пористая структура моделируется системой цилиндрических капилляров с заданной температурой стенки  $T_{cm}$ . Для определения  $\alpha_s$  необходимо знать количество теплоты  $\Delta Q$ , поглощаемой при испарении с поверхности мениска одиночного капилляра:

$$\alpha_s = \frac{\Pi}{T_{cm} - T_k} \int \frac{\Delta Q_f(R)}{\pi \cdot R_k^2} dR_k.$$

Степень воздействия адгезионных и капиллярных сил на интенсивность испарения с поверхности мениска зависит от толщины слоя жидкости. Мениск разбивается на четыре области:

Область равновесной пленки,  $0 < \delta < \delta_0$  ( $T_{cm}$ ),

где

$$\delta_0 = \left[ \frac{1}{\alpha} \left( 1 - \frac{(T_{cm} - T_s) \rho_n r}{T_s P_s} \right) \right]^{1/6}.$$

Здесь адгезионные силы велики и практически исключают испарение.

Область частично испаряющейся пленки,  $\delta_0 < \delta \leq \delta_*$ . Здесь действие адгезионных сил несколько ослабляется, подтекание жидкости происходит за счет градиента расклинивающего давления.

Область испаряющейся пленки  $\delta_* < \delta \leq \delta_{**}$ . Здесь влияние адгезионных сил несущественно, подтекание жидкости происходит за счет градиента капиллярного давления.

Область собственно мениска,  $d > d_{**}$ . Здесь перепады давления в подтекающей жидкости много меньше капиллярного давления и форму мениска можно считать совпадающей с изотермической, т.е. сферической с радиусом  $RM$ .

Для определения интенсивности испарения решалась система уравнений неразрывности, движения и теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0;$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} + \nu_{жс} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2},$$

с граничными условиями:

$$y = 0; \quad u = v = 0; \quad T = T_{cm};$$

$$y = \delta; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad T_{cm} - T_a(\delta) = \frac{3,2 \sqrt{RT_s P_s} \delta \ln(\delta/\delta_0)}{\rho_n r}.$$

Таким образом, полученные в работе теоретические результаты и согласующие с ними экспериментальные данные показывают, что с увеличением  $1/Ru$  скорость  $U_L$  вначале растет медленно, затем примерно в  $Nu = 1$  начинается более резкое возрастание переходящее в линейную зависимость, характерную для низкого оттока тепла. Наконец, при дальнейшем убывании  $Nu$  скорость  $U_L$  в случае испарения выходит на постоянное значение, зависящее лишь от  $S$  и  $V_v$ , которое при  $\epsilon \rightarrow 1$  стремится к величине, соответствующей испарению с открытой поверхности.

Следовательно, найденные результаты могут быть использованы для расчета скорости массопереноса при испарении в пористом слое произвольной толщины для  $1 \leq Nu < \infty$  т.е. в свободномолекулярном и промежуточном режимах течения.

Что же касается течения при наличии слабой абсорбции, то здесь для свободномолекулярного режима в симметричном случае получено достаточно хорошее совпадение с результатами, найденными другим методом [3].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуйко Э.И., Цветков Ц.Д. Аналитическое исследование процесса внутреннего массопереноса при вакуумной сублимационной сушке материалов. – ИФЖ, 1972, №5. - с. 868-870.
2. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 506 с.
3. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1985. - 336 с.

**В.С. Копырин**

УДК 621.313.333.1

*Научное производственное предприятие*

*«Энергоэкология», г. Екатеринбург*

**Б.Б. Утегулов, С.С. Исенов**

*Павлодарский государственный*

*университет им. С.Торайгырова*

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ В ДВУХДВИГАТЕЛЬНОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

*Жұмыста екі қозғалтқышты асинхронды электржетекпен функционалды сұлбасы және әрекет ету қағидасы, жұмыс алгоритмдары, шектердің кесте және жоңге салу облыстары оңделіп келтірілген.*

*In article are brought designed functional scheme and principle of the action, algorithms of the work, table limit and area of the regulation double-motor anisochronous electric drive.*

Для ряда подъемно-транспортных механизмов, используется двухдвигательный асинхронный электропривод (ДАЭП), регулирование координат которого осуществляется изменением добавочных сопротивлений в цепи роторов. Однако такой способ регулирования координат электропривода, в настоящее время, не может удовлетворить возросшим требованиям. Следовательно, необходимо перейти к другому способу, в котором требуемые характеристики обеспечиваются минимальными затратами, и особенно важно использовать существующие двигатели с фазным ротором, внося изменения только в электрическую часть привода.

Одной из возможных реализаций, при решении этой задачи, может удовлетворить система асинхронного электропривода с импульсным регулированием в цепи ротора, учитывая также на современном этапе развитие и использование полупроводниковых систем управления и преобразователей, в системах электропривода, позволит не только улучшить некоторые технико-экономические показатели, при разработке двухдвигательного асинхронного электропривода, но и применить новые принципы регулирования, реализация которых ранее была экономически неоправданной или технически невозможной.

Одним из основных критериев при проектировании автоматической системы управления двухдвигательным асинхронным электроприводом, является рациональное использование и органическое сочетание возможностей, даваемых микропроцессорной техникой со свойствами управляемых объектов. Однако наиболее эффективной в каждом

случае, очевидно, будет микропроцессорное средство, архитектура которой соответствует классу решаемых задач и динамическим характеристикам объекта управления [1].

На основе вышеизложенного для обеспечения точности регулирования электропривода, расширения диапазона и согласованного вращения скорости электродвигателей разработано устройство автоматического регулирования скорости двухдвигательного асинхронного электропривода [2].

Функциональная схема разработанного устройства автоматического регулирования скорости двухдвигательного асинхронного электропривода приведена на рисунке 1.

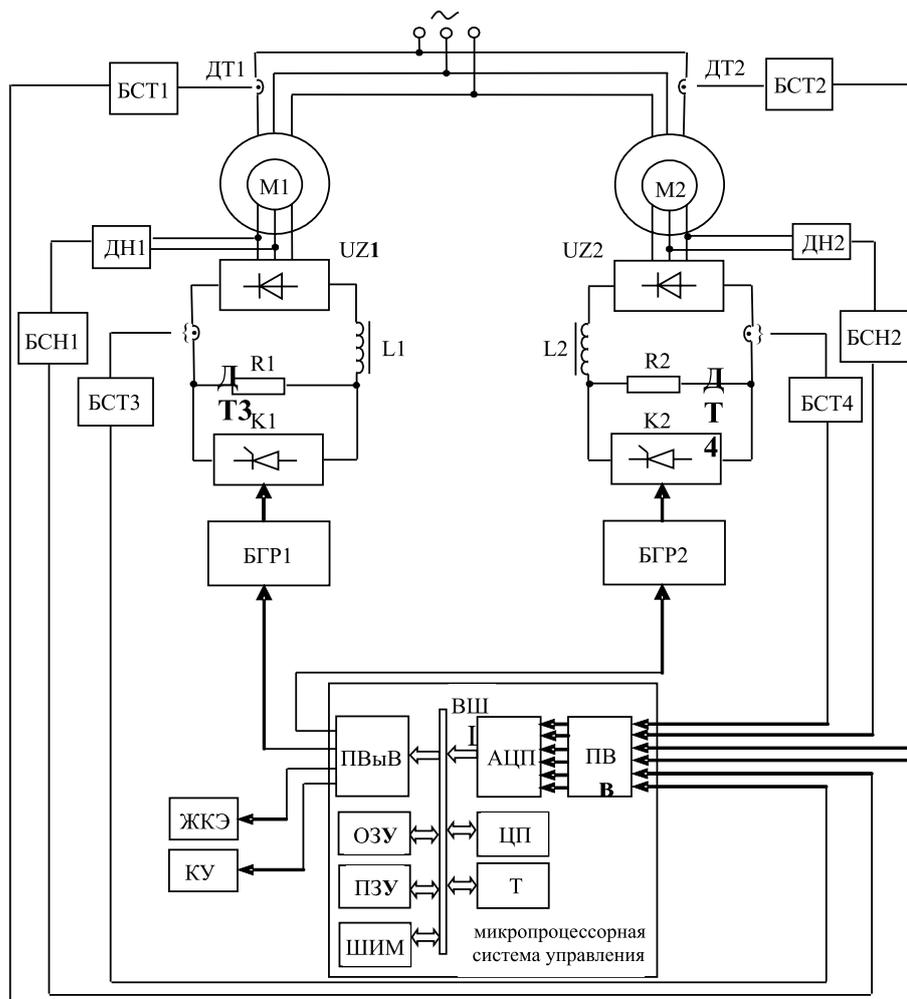


Рисунок 1 – Функциональная схема устройства автоматического регулирования скорости двухдвигательного асинхронного электропривода

Разработанная функциональная схема содержит: трехфазную электрическую сеть; асинхронные электродвигатели с фазным ротором – М1, М2; выпрямители – UZ1, UZ2; сглаживающие пульсации дроссели – L1, L2; сопротивления – R1, R2; коммутаторы – K1, K2; блоки гальванической развязки – БГР1, БГР2; порт ввода – ПВВ; аналого-цифровой

преобразователь – АЦП; центральный процессор – ЦП; таймер – Т; порт вывода – Пвыв; оперативное запоминающее устройство – ОЗУ; постоянное запоминающее устройство – ПЗУ; широтно-импульсный модулятор – ШИМ; внутренняя двунаправленная шина – ВШ; жидкокристаллический экран – ЖКЭ; кнопки управления – КУ; датчики тока цепи статора – ДТ1, ДТ2; блоки согласования токов статора – БСТ1, БСТ2; датчики напряжения – ДН1, ДН2; блоки согласования напряжений – БСН1, БСН2.

Принцип действия разработанного устройства заключается в том, что в соответствии с полученной информацией, от датчиков тока статора и датчиков напряжения, текущие параметры модулей тока статора и напряжения преобразовывают в цифровые коды, на основе которых вычисляют и формируют импульс, обеспечивающий изменение скорости, в соответствии с заданным законом регулирования, импульс через блоки гальванической развязки подается к силовым вентилям управляющих коммутаторов.

Следующим шагом после разработки функциональной схемы, должен быть разработан алгоритм работы ДАЭП, в котором все необходимые действия будут реализованы последовательным методом. Для алгоритма управления исходными данными являются сигналы, поступающие от датчиков; искомым результатом – сигналы управления, выдаваемые на объект. Таким образом, разработка алгоритма регулирования определенной координаты заключается в выработке последовательности операций, направленных на достижение поставленной цели. Действия, используемые в алгоритме, должны по возможности ориентироваться на технические средства, которыми будут реализовываться алгоритм.

На основе функциональной схемы ДАЭП, разработан алгоритм работы системы привода показанный на рисунке 2.

В начале работы считывается текущее значение параметра (входного слова) и сравнивается с номинальными значениями. В связи с чем необходимо сохранение в системе последовательности символов, представляющих каждое входное слово.

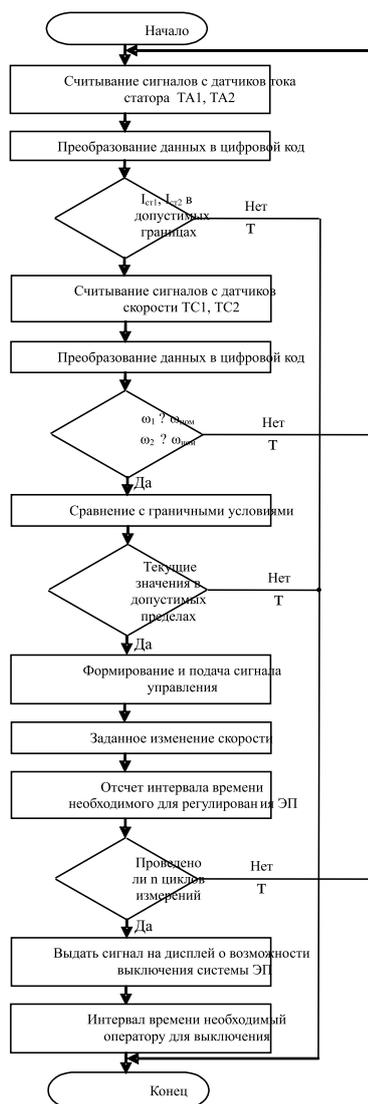


Рисунок 2 – Алгоритм работы устройства автоматического регулирования скорости ДАЭП.

Шаг сравнения, показанный как блок на рисунке 2, подразумевает, что текущее слово-значение, снимаемое с датчиков нужно сравнить с номинальными значениями-словами, хранящимися в памяти, и результат представить в виде сигнала состояния, выведенное на индикатор.

Если различие отсутствует, то содержимое входного счетчика увеличивается на 1 и проверяется, все ли значения-слова уже испытаны. Далее следует программное возвращение к начальной точке для считывания следующего входного слова. Если же имеется

различие между данным входным словом и предыдущим отчетом, то надо исследовать каждый момент времени, чтобы определить, в каком именно отрезке или группе разрядов различаются между собой биты. После этого нужно выполнить соответствующее воздействие.

Разрабатывая алгоритм необходимо, чтобы все операции, выполняемые в соответствии с алгоритмом, расширить, т.е. детализировать до такой степени, чтобы показать отдельные шаги, которые требуется совершить для достижения желаемого результата. Детализированная схема алгоритма (рисунок 3) функционирует на основе пределов показанных в таблице 1 и области регулирования приведенной на рисунке 4 [3].

Работа происходит следующим образом, при соотношении системы электропривода когда первый электродвигатель М1, находится в зоне по току статора  $I_{MIN11}$ ,  $I_{MIN11}$  – и скорости вращения  $I_{MIN1}$ ,  $I_{MIN1}$ , необходимо положительное регулирование, т.е. двигателю М1 не хватает определенного числа оборотов до номинального уровня, вследствие этого микропроцессорная система управления увеличивает время открывания, главного тиристора VS1, тиристорного коммутатора, путем подачи импульса управления, за счет этого двигатель М1 набирает обороты.

Микроконтроллер пытается вывести двигатель М1 на номинальный режим работы, если текущие значения снимаемые с датчиков находятся в зоне по току статора  $I_{MIN11}$ ,  $I_{MIN11}$  и скорости вращения  $I_{MIN1}$ ,  $I_{MIN1}$ , необходимо отрицательное регулирование – т.е. число оборотов превышает номинальный уровень, но находится в пределах возможного регулирования, вследствие этого микроконтроллер уменьшает время открывания тиристорного коммутатора, за счет чего двигатель М1 снижает обороты.

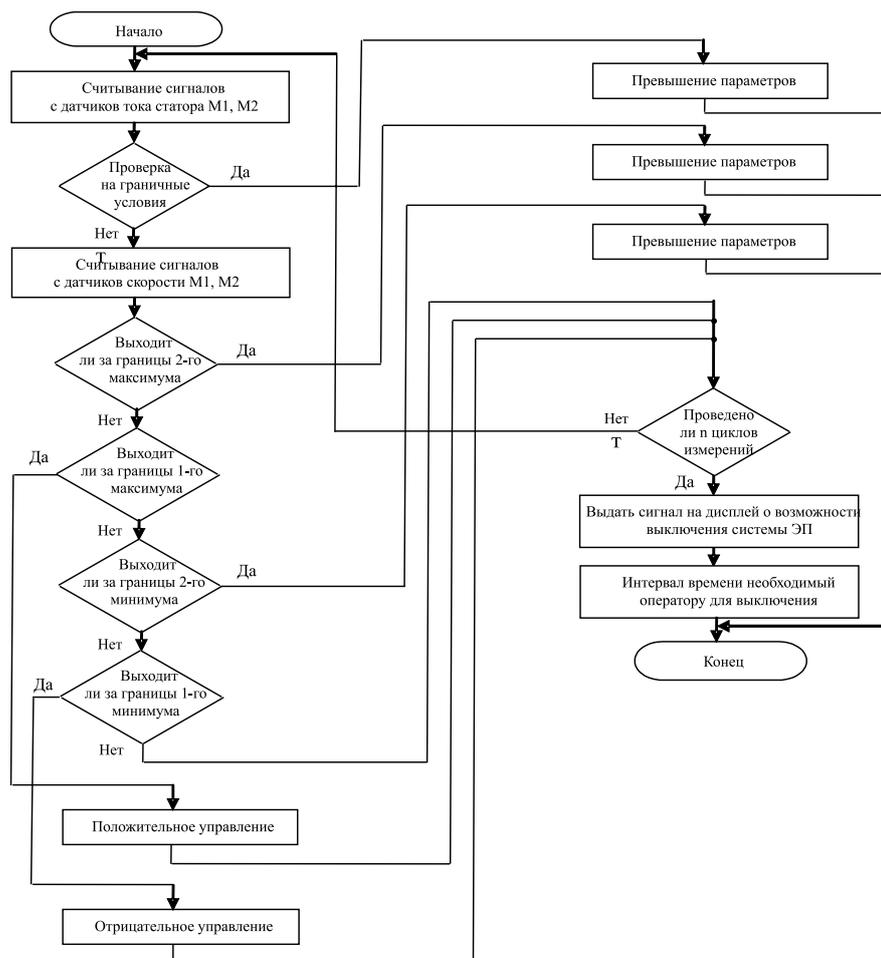


Рисунок 3 – Расширенный алгоритм работы устройства автоматического регулирования скорости ДАЭП.

Система управления автоматически, в соответствии с заданной программой старается вывести двигатель к номинальному режиму работы, если же значения выходят за минимальный по току статора  $I_{MIN11}$ , и скорости вращения  $n_{MIN11}$  предел, или за максимальный по току статора  $I_{MAX11}$ , и скорости вращения,  $n_{MAX11}$  предел, то микропроцессорная система выдает сигнал на дисплей о превышении допустимой нормы текущих значений и отключает ДАЭП.

Таблица 1

Пределы регулирования ДАЭП

№ п/п	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Примечание (величина)
1)	Токи статоров 1 и 2 двигателей	I11, I12	А	Переменные
2)	Скорость вращения 1 и 2 двигателей	W1, W2	об/мин	Переменные
3)	Максимальное значение токов статоров 1 и 2 двигателей	IMAX11, IMAX12	А	Постоянные
4)	Максимальное значение скорости вращения 1 и 2 двигателей	W IMAX11, W IMAX12	об/мин	Постоянные
5)	Минимальное значение токов статоров 1 и 2 двигателей	IMIN11, IMIN12	А	Постоянные
6)	Минимальное значение скорости вращения 1 и 2 двигателей	W MIN1, W MIN2	об/мин	Постоянные
7)	Максимальное значение токов статоров 1 и 2 двигателей не подлежащих регулировке	I1MAX11, I2MAX12	А	Постоянные
8)	Минимальное значение токов статора 1 и 2 двигателей не подлежащих регулировке	I1MIN11, I2MIN12	А	Постоянные
9)	Максимальное значение скоростей 1 и 2 двигателей не под-дающихся регулировке	W 1MAX1, W 2MAX1	об/мин	Постоянные
10)	Минимальное значение скоростей 1 и 2 двигателей не под-дающихся регулировке	W 1MIN1, W 2MIN1	об/мин	Постоянные

Одновременно происходит регулирование двигателя M2, если он находится в зоне по току статора I1MIN12, I2MIN12 и по скорости вращения W MIN2, W 2MIN2, то система автоматического управления в соответствии с заданной программой выдает положительное управление, вследствие чего время открывания главного тиристора VS2 увеличивается, что приводит к увеличению числа оборотов электродвигателя M2 и система управления подводит работу привода к номинальной, если текущие значения находятся в зоне по току статора – I1MAX12, I2MAX12 и скорости вращения – W MAX2, W 2MAX2, тогда необходимо регулирование по отрицательному воздействию, так как число оборотов двигателя M2 превышает номинал, но находится в пределах регулирования, вследствие чего время открывания главного тиристора VS2 уменьшается, привод сбавляет скорость вращения и система автоматического управления подводит ее к номинальной.

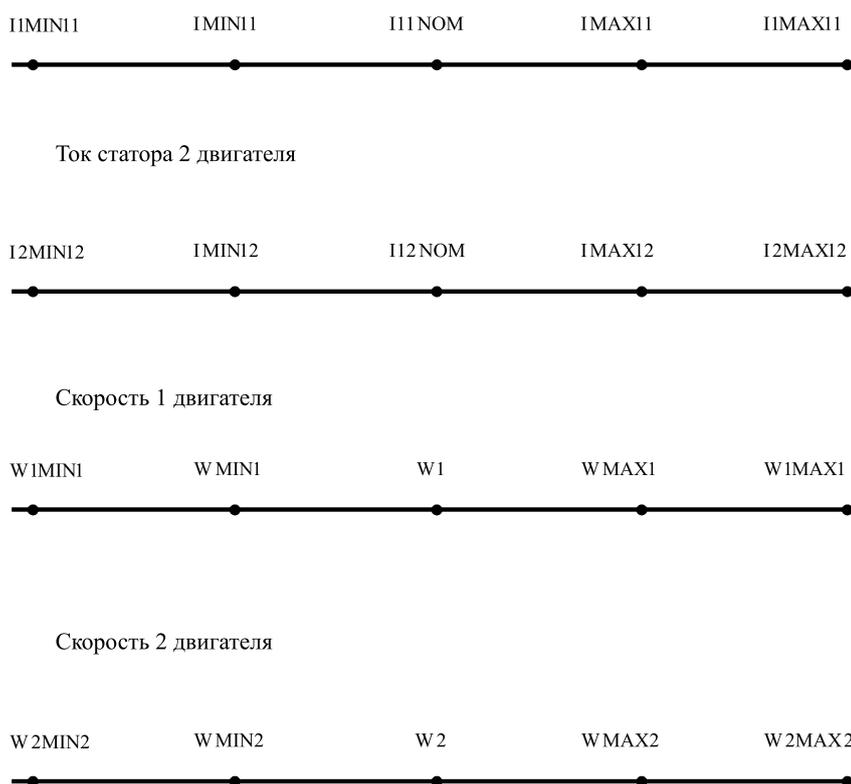


Рисунок 4 – Области регулирования ДАЭП

Если же текущие значения электродвигателя M2 выходят за зону регулирования, т.е. по току статора  $I_{2MIN12}$  и скорости вращения  $W_{2MIN2}$  – выходят за минимальный предел, или по току статора  $I_{2MAX12}$  и скорости вращения  $I_{2MAX2}$  – выходят за максимальный предел, в соответствии с этим на индикатор поступает сигнал оператору о превышении заданных параметров и система отключается.

Если электродвигатель M1 лежит в пределах по току статора  $I_{1MIN1} \leq I_{11NOM} \leq I_{1MAX1}$  и по скорости вращения  $W_{1MIN1} \leq W_1 \leq W_{1MAX1}$ , а электродвигатель M2 в пределах по току статора  $I_{2MIN12} \leq I_{12NOM} \leq I_{1MAX12}$  и по скорости вращения  $W_{2MIN2} \leq W_2 \leq W_{2MAX2}$  данные пределы соответствуют допустимым значениям работы ДАЭП и микропроцессорная система управления, работает в режиме диагностики и управляющий сигнал на тиристорные коммутаторы, соответствующий поддержанию заданной скорости электро-двигателей одинаков. Двигатели системы вращаются синхронно и синфазно, что наблюдается крайне редко.

Вывод: Разработанные в статье функциональная схема и принцип действия, алгоритмы работы, таблица пределов и области регулирования двухдвигательного асинхронного электропривода, позволяют повысить надежность, уровень автоматизации и расширить диапазон регулирования.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Файнштейн В.Г, Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами. // Энергоатомиздат. – Москва, 1986. - 240 с.
2. Утегулов Б.Б., Марковский В.П., Исенов С.С. Разработка автоматического устройства импульсного регулирования скорости в двухдвигательном асинхронном электроприводе // Вестник КазАТК им. М. Тынышпаева, 2007. – №6. – С. 110-113.
3. Исенов С.С. Разработка алгоритма работы устройства автоматического импульсного регулирования скорости в двухдвигательном асинхронном электроприводе // Вестник СГУ им. Шакарима, 2008. – №2. – С. 146-155.

М.К. Кудерин, В.А. Козионов,  
Б.А. Нуркин

УДК 691.32:539.4:620.179.1

*Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова*

## ОПЫТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ

*Жаңа дәуір құралдарын Оникс 2,5 және Пульсар 1,0 қолдануымен бетон беріктігін анықтаудың кешенді әдістер мен олардың анализі келтірілген.*

*Complex methods of concrete strength assessment with the usage of sophisticated new-generation equipment Onyx 2.5 and Pulsar 1.0 and their analysis are introduced in the article.*

**Введение.** Неразрушающие методы контроля прочности бетонов широко используются в практике строительства. Современный этап их применения характеризуется широким использованием приборов нового поколения, изготавливаемых в малогабаритных корпусах с большим набором сервисных функций и имеющих удобные датчики оригинальных конструкций [1]. Данные приборы выполняют интеллектуальную обработку измеряемых параметров с выводом результатов на графический дисплей. Они имеют канал инфракрасной связи с компьютером, долговременную память результатов и обеспечивают высокую достоверность измерений. К их числу относятся приборы, основанные на принципе упругого отскока (молоток Шмидта), импульсном методе (Пульсар 1.0 и его модификации), ударно-импульсном методе (Оникс 2.3 и его модификации).

Приборы типа Оникс 2.3 и Пульсар 1.0 используются в практике исследований на архитектурно-строительном факультете Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова. Накопленный опыт проведения испытаний показал, что использование одного метода, как бы он ни был удачно выбран, не дает возможности повысить точность определения прочности бетонов сверх определенного предела. Отсюда возникает потребность в комплексном использовании, т.е. сочетании различных неразрушающих методов, имеющих определенную физическую основу. Методики комбинированного определения прочности бетона разработаны в настоящее время для испытаний традиционными приборами [2]. Применительно к приборам нового поколения подобные методики находятся в стадии пробной разработки и адаптации к условиям потребителя.

**Цель работы.** Целью работы являлась разработка комбинированных методик испытаний с использованием комплекса современных неразрушающих приборов, позволяющих повысить точность определения прочности бетонов.

**Программа экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования проводились на образцах-кубах бетона размером 100х100х100 мм. Изготовление образцов производилось на заводе СК «Атамура» для 4 серий экспериментов по 6...8 образ-

цов в каждой из них. Состав бетона: портландцемент, щебень фракции 20-40 мм, песок ,8 -2 мм, вода. Соотношения состава бетона на 1 м<sup>3</sup>: первых пяти образцов – цемент 220кг, песок 760 кг, щебень 1160 кг, вода 200 л; вторых – цемент 300 кг, песок 700 кг, щебень 1100 кг, вода 220 л; третьих – цемент 400 кг, песок 760 кг, щебень 1160 кг, вода 240 л; четвертых – цемент 520кг, песок 790 кг, щебень 1100 кг, вода 280 л.

Исследования включали испытания образцов бетона приборами Оникс 2.5, Пульсаром 1.0 и молотком Кашкарова. После проведения этих испытаний производилось разрушение образцов на прессе. Повторность опытов составляла: прибором Оникс 2.5 – по 5 ударов по противоположным сторонам образца-куба, прибором молоток Кашкарова – 5 ударов, прибором Пульсар 1.0 – прозвучивание в 3 местах каждого образца. До начала испытаний проводились измерения фактических размеров и массы образцов бетона.

**Установление градуировочных зависимостей.** Установление данных зависимостей для приборов Оникс 2.5 и Пульсар 1.0 осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 22690-88 по уравнению

$$R_H = A_0 + A_1 * H, \quad (1)$$

где  $R_H$  - кубиковая прочность бетона, МПа;

$H$  - показания прибора при  $A_0=0$  и  $A_1 = 1$ ;

$A_0$  и  $A_1$  - коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Величины коэффициентов  $A_0$  и  $A_1$  определялись путем статистической обработки экспериментальных данных на ПЭВМ с учетом предъявляемых ГОСТ 22690-88 требований к отбраковке результатов.

По данным вычислений получены следующие значения параметров:

- для прибора Оникс 2.5 -  $A_0 = 7,983$  и  $A_1 = 0,638$ ;

- для прибора Пульсар 1.0 -  $A_0 = -173,5$  и  $A_1 = 0,052$  (за величину  $H$  в формуле (1) принималась скорость распространения ультразвуковых волн, м/с).

Результаты ряда определений прочности исследованных бетонов рассматриваемыми неразрушающими методами приведены в таблице 1.

Результаты определений прочности образцов бетона

Серия (№ образца)	Прочность бетона, определенная путем испытания, МПа		
	молотком Кашкарова	прибором Пульсар 1.0	прибором Оникс 2.5
1 (1)	25,4	25,97	24,16
1 (2)	24,9	25,30	23,84
1 (3)	28,9	27,01	26,39
2 (1)	40,6	39,39	27,03
2 (2)	28,7	28,78	25,21
2(3)	28,9	29,40	26,26
2 (4)	26,9	28,10	25,72
2 (5)	27,2	28,99	25,34
3 (1)	27,4	28,78	25,40
3 (2)	35,5	35,12	30,60
3 (3)	33,4	34,29	29,30
3 (4)	35,4	35,64	30,50
4 (1)	27,0	27,01	25,20
4 (2)	25,0	24,05	23,90
4 (3)	22,0	22,23	22,00
4 (4)	23,8	22,80	23,10

Примечание: прочность бетона по молотку Кашкарова принята по тарифовочному графику.

**Определение прочности бетонов комбинированными методами.** Используем для анализа полученных результатов прием, предложенный Б.Г. Скрамтаевым и М.Ю. Лещинским [2, с. 178], [3, с. 254], называемый методом наложения. Его сущность состоит в следующем. Пусть по результатам испытаний первым методом получено значение прочности бетона  $R_1$  с возможными изменениями от  $R_3$  до  $R_4$  (где  $R_3 = R_1 - \Delta R^1$ ,  $R_4 = R_1 + \Delta R^1$ ,  $\Delta R^1$  - интервал значений прочности  $R_1$  в которых может оказаться с данной вероятностью действительная прочность бетона). Обозначим через  $R_2$  прочность бетона и  $R_5$ ,  $R_6$  - интервалы изменения прочности бетона по второму методу. Тогда, в соответствии с методом наложения, наиболее вероятное значение прочности бетона  $R$  должно находиться в пределах как между значениями  $R_3$  и  $R_4$ , так и между величинами  $R_5$  и  $R_6$ .

Рассмотрим реализацию данного приема на примерах определения прочности бетона на сжатие во второй серии испытаний (таблица 1). На рисунках 1...3 приведены графики к определению прочности бетона комбинированными методами с использованием приборов Пульсар 1.0, Оникс 2.5 и молотка Кашкарова. На графиках обозначены:  $V$  - скорость распространения ультразвука;  $R_{OH}$  - показания на дисплее прибора Оникс 2.5;  $d_{\dot{y}} / d_{\dot{a}}$  - отношение диаметров отпечатков на эталоне и на бетоне при испытаниях молотком Кашкарова.

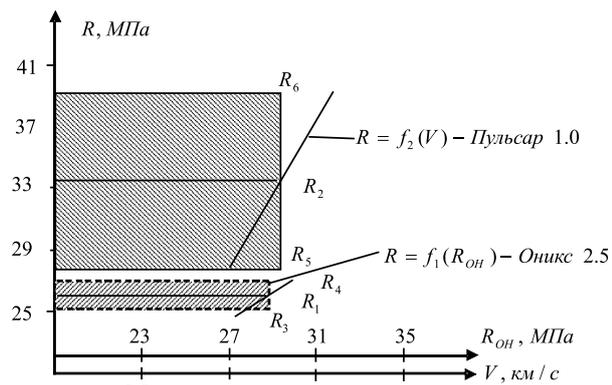


Рисунок 1 – Определение прочности бетона приборами Оникс 2.5 и Пульсар 1.0

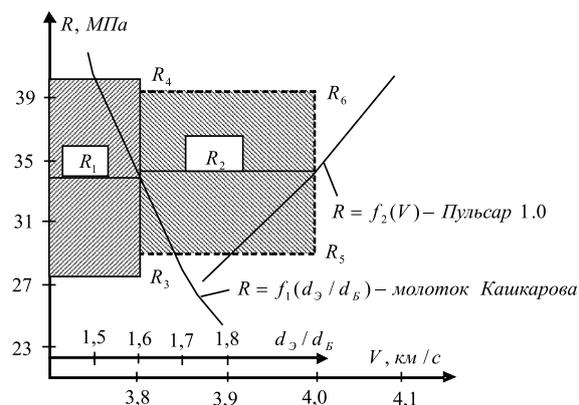


Рисунок 2 – Определение прочности бетона прибором Пульсар 1.0 и молотком Кашкарова

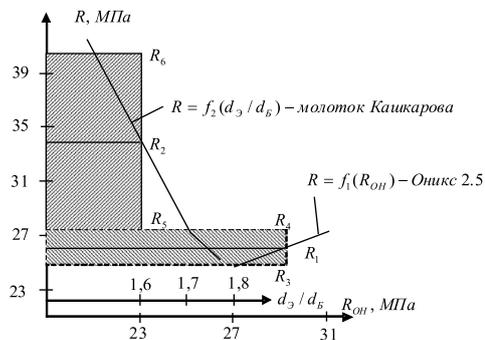


Рисунок 3 – Определение прочности бетона приборами Оникс 2.5 и молотком Кашкарова

Произведем вычисления наиболее вероятных значений прочности бетона комбинированными методами.

1. Прибор Оникс 2.5 и Пульсар 1.0 (рисунок 1). Пределы возможных колебаний величин  $R$ , полученных обоими методами, не совпадают. В этом случае рекомендуется выполнить повторные испытания. Дополнительным исследованием установлена возможность принять значение  $R = 27 \text{ МПа}$ .

2. Молоток Кашкарова и прибор Пульсар 1.0 (рисунок 2). Из рисунка 2 следует, что возможные колебания значений  $R$ , полученных по прибору Пульсар 1,0, меньше чем с использованием молотка Кашкарова и укладывается в его пределах. При этом  $R_4 > R_5 > R_3$ ;  $R_4 > R_6$ . Тогда прочность бетона можно принять равной  $R = R_2 = 34,19 \text{ МПа}$ .

3. Приборы Оникс 2.5 и молоток Кашкарова (рисунок 3). В данном случае выполняется условие  $R_6 > R_4 \approx R_5 > R_3$ , поэтому в соответствии с используемой методикой, получаем  $R = (R_4 + R_5) / 2 = (27,027 + 27,2) / 2 = 27,11 \text{ МПа}$ .

Среднее значение прочности бетона на одноосное сжатие, полученное на прессе, составило 30,46 МПа. Таким образом, лучшее соответствие результатам разрушающего испытания бетона на прессе получено комбинированным методом с применением двух приборов: Оникс 2.5 и молотка Кашкарова.

**Практика обследования конструкций зданий и сооружений комбинированными методами.** С целью апробации рассмотренных выше методик был проведен ряд контрольных испытаний на ряде объектов Павлодарской области. Так, по результатам обследования высотных радиотрансляционных башен Жолболды и Акколь высотой 75 м был отмечен ряд дефектов и разрушений в опорных фундаментных столбах (рисунок 4). Комбинированным методом с применением приборов Оникс 2.5 и молотка Кашкарова определена прочность бетона  $R = 30,4 \dots 30,8$ , что практически соответствовало прочности бетона, определенной в заводских условиях. Причиной возникновения дефектов в фундаментных столбах в данном случае стала использованная технология работ по устройству башен.

Пробное применение комбинированных методик на ряде других объектов (массив Усольского микрорайона, ряд зданий и сооружений в г. Павлодаре и г. Аксу) показало возможность и эффективность их использования в практике строительства.



Рисунок 4 – Дефекты опорного фундаментного столба башни Акколь

**Выводы**

1. По результатам выполненных исследований установлены:
  - индивидуальные градуировочные зависимости «косвенная характеристика – прочность бетона» для приборов «молоток Кашкарова», Оникс 2.5 и прибора Пульсар 1.0;
  - зависимости для определения прочности бетона в комплексе двумя методами: прибор Оникс 2.5 – Пульсар 1.0; прибор Оникс – 2.5 – Молоток Кашкарова; прибор Пульсар 1.0 – молоток Кашкарова.
2. Изложенные в работе методики могут быть использованы при решении задач обеспечения безопасности строительных конструкций, контроля качества бетона на предприятиях стройиндустрии, при обследовании зданий и сооружений.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Котов В.И., Кунин Ю.С., Рощин А.И., Фролова Ю.И. Современные методы и аппаратура неразрушающего контроля строительных конструкций // Современные методы инженерных изысканий в строительстве. – М.: МГСУ, 2001. – С. 76 – 116.
2. Лещинский Ю.М. Испытание бетона: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1980. – 360 с.
3. Джонс Р., Фэкзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов. – М.: Стройиздат, 1974. – 292 с.

**В.И. Петуров**

**УДК: 614.825:622**

*Читинский государственный  
университет, г. Чита*

## **СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6, 10 КВ Г. ЧИТЫ**

*Мақалада 6, 10 кВ тарату электрлік тораптың істен шығу  
және бұзылыстардың талдауы жасалған.*

*In article is made analysis of the damages and mortality element  
to distributing electric network by voltage 6, 10 kV.*

В основу исследований надёжности, безопасности и эффективности эксплуатации городских распределительных электрических сетей напряжением 6, 10 кВ положены статистические данные за 2009 год по г. Чита об имевших место за указанный период эксплуатации случаях отказов в работе электрооборудования, повлекших за собой срабатывание защит, зафиксированное диспетчерскими службами. Данные службы, наряду с функциями оперативного управления электроснабжением, выполняют и функции контроля, но при этом у них фактически отсутствует система анализа фиксируемых отказов и аварийных отключений. В связи с этим снижается возможность принятия оперативных решений и более полная реализация комплекса мероприятий, направленных на повышение устойчивости работы сетей, надёжности и безопасности работы электрооборудования.

В результате проведённого анализа причины отключений можно классифицировать по виду и месту возникновения аварийной ситуации следующим образом:

- кабельные линии (КЛ);
- приключательные пункты, трансформаторные подстанции, распределительные устройства;
- воздушные линии (ВЛ);
- запуск мощных насосов и приводов;
- прочие.

Статистические данные по отключениям в Читинских городских электрических сетях в период с 01.01.2009 по 31.12.2009 приведены в таблице 1.

Анализ выявленных причин показал, что наибольшее число отключений, недоотпуск электроэнергии и время простоя приходится на кабельные линии. Это говорит о большой их изношенности. Об этом также можно судить по тому факту, что недоотпуск электроэнергии и время простоя вследствие повреждения КЛ превышает долю отключений, приходящуюся на данный элемент сетей. Основными причинами отказов в КЛ являются пробой кабельных разделок и короткие замыкания в кабелях. Также большая доля отключений приходится на повреждения сторонними организациями при проведении земляных работ. Небольшая доля приходится на воздушные линии (схлёстывание проводов) и включение мощных насосов и приводов.

Таблица 1

Сводная ведомость по отключениям

№ п/п	Тип объекта	Количество отключений, %	Недоотпуск электроэнергии, %	Время простоя, %
1	КЛ	47,2	64,5	55,7
2	ВЛ	5,6	6,4	5,2
3	Оборудование ТП - РП	2,8	5,90	7,4
4	Повреждения сторонними организациями	44,4	23,2	31,7
5	Невыясненные причины	0	0	0
	Итого	100	100	100

Анализ динамики отключений позволяет определить характер их распределения. Исходные данные представлены в виде временных рядов.

В качестве математического аппарата при обработке исходных материалов использованы методы спектрального и статистического анализа [1].

На основании фактических временных рядов методами спектрального анализа получены аппроксимирующие аналитические уравнения динамики отключений в виде временных рядов Фурье в течение суток, а также по отдельным месяцам года.

Анализ по времени суток показал что, характерным является увеличение числа отключений в интервалы времени 800...1200, 1400...1500, 1800...2000, т.е. происходящие на периоды наиболее интенсивного введения работ либо на вечерний максимум электропотребления. Анализ уравнений динамики по отдельным месяцам показал, что наибольшее число отключений приходится на период с июля по ноябрь. Это свидетельствует о явном сезонном характере распределения числа аварийных отключений в течение года.

Из-за большого числа отключений увеличивается время простоя и недоотпуск электроэнергии, что ведёт снижению эффективности деятельности энергоснабжающей организации.

Результаты анализа причин отключений показывают, что в основе их возникновения лежит целый комплекс факторов: технических, технологических, организационных, эксплуатационных, природно-климатических и т.д. В связи с этим необходимо проведение дальнейших исследований в области установления закономерностей развития таких ситуаций, их анализа и последующей разработки комплекса мероприятий, направленных на снижение аварийности в процессе эксплуатации электроустановок.

Полученные в результате математического анализа зависимости могут быть положены в основу определения и последующего анализа интерполирующих функций для построения прогнозных моделей, анализа динамики аварийных отключений в электрических сетях, оценки надежности и безопасности работы электрооборудования, а также оценки эффективности мероприятий, направленных на снижение числа аварийных отключений в процессе эксплуатации систем электроснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров, А.И. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения [Текст] / А.И. Сидоров, В.И. Петуров, А.В. Пичуев, И.Ф. Суворов. – Чита: ЧитГУ, 2009. – 268 с.

**В.И. Петуров**

**УДК 621.3**

*Читинский государственный  
университет, г. Чита*

## **ПРОБЛЕМЫ КАДРОВОГО И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ**

*Мақалада Ресей энергетикасының тұрақты дамуына  
байланысты шаралар және кадрларды дайындау бойынша жалпы  
талдау жасалған.*

*In article is made overview analysis of preparing the personnel  
and is brought actions for ensuring the firm development of energy to*

Одной из наиболее острых проблем, стоящих на пути инновационного развития электроэнергетики Российской Федерации, является нехватка квалифицированного инженерно-технического персонала и деградация системы подготовки кадров для отрасли, являющиеся следствием кризисных процессов, происходивших в экономике и социальной жизни страны в последние годы.

Фактором успешного функционирования любой отрасли экономики, в том числе и электроэнергетики, является создание эффективной системы подготовки и последующего повышения квалификации персонала на всех уровнях деятельности, включающей в себя систему взаимодействия с профильными учебными заведениями, а также механизмов, стимулирующих приток кадров в отрасль и развитие профессиональных компетенций, знаний умений и навыков.

Разработанная в 2008 г. РАО «ЕЭС России» Концепция технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. представляет собою содержательную часть государственной политики в электроэнергетике, ее практическая реализация потребует проведения серьезных мер, которые охватывают следующие задачи [1]:

- разработка системы экономических, правовых, институциональных механизмов;
- создание финансового, кадрового, организационного инструментария ее проведения;
- обеспечение социально-экономической стратегической цели – гарантированного и доступного в ценовом отношении электроснабжения;
- научно-техническое сопровождение реализации предложенной технической политики;
- сохранение и развитие кадрового потенциала энергетики, поддержка и развитие системы высшего и среднего специального образования, как необходимого условия реализации технической политики;
- восстановление строительного-монтажного и энергомашиностроительного комплексов отрасли;
- разработка новых технологий проектирования и управления строительством.

За всем этим стоит, пожалуй, главная уже упомянутая стратегическая проблема кадрового обеспечения реализации технической политики.

Для ее решения на федеральном и в отдельных случаях на региональном уровне должна быть разработана инновационная кадровая и образовательная политика, в составе которой будут определены подробные меры по решению в учебных заведениях таких задач как:

- совершенствование учебных планов, программ обучения и повышения квалификации;
- развитие материально-технической базы среднеспециальных и высших учебных заведений;
- увеличение набора на инженерно-технические специальности в условиях демографического кризиса относительно гуманитарных специальностей;
- увеличение зарплаты преподавателям и стипендий студентам, преодоление тенденции старения преподавателей.

В свою очередь на предприятиях энергетики должны быть выполнены следующие меры:

- создание на всех предприятиях отрасли регулярно обновляемых банков вакансий;
- развитие баз практики на предприятиях отрасли;
- поддержка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- постепенное обновление кадрового резерва, создание условий к карьерному росту молодежи;
- совершенствование механизма обучения персонала и повышение его квалификации;
- сочетание материального и морального стимулирования;
- преодоление оттока молодых специалистов из энергетики.

Выполнение данных мер позволит существенно повысить уровень образования, создаст стимул для участия студентов в научно-исследовательских мероприятиях и автоматически изживет себя всем известная проблема трудоустройства молодых специалистов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Основные положения (концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. - М.: РАО «ЕЭС России», 2008. – 91 с.

**В.В. Рындин**

**УДК 532.533**

*Павлодарский государственный университет*

*им. С. Торайгырова*

## **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ТЕРМИНОВ И ОБОЗНАЧЕНИЙ ВЕЛИЧИН, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКОВ ВЕЩЕСТВА И ДВИЖЕНИЯ (ЭНЕРГИИ)**

*Тасымал теориясының олардың белгілерінің және физикалық шамаларының терминдерінің жүйеленуі өткізілді. Шамалар ағындары мен векторларының скалярлық ағындары арасында бір мағыналы байланыс анықталды. Ашық қозғалмайтын жүйе және жылжымалы жабық жүйе үшін тасымалдың баланстық теңдеулерін алды.*

*The systematization of the terms of physical magnitudes of the theory of transposition and their labels is conducted. The unique relation between streams of magnitudes and scalar streams of vectors is established (installed). The balance equations of transposition for an open fixed system and for moving closed system in a generalized aspect are obtained.*

Введение. Все явления, протекающие в природе, связаны с потоками материи и её свойства – движения. Потоки вещества рассматриваются в механике жидкости и газа [1 – 4], потоки тепла (хаотического движения) – в теории теплообмена [5], а всевозможные процессы обмена веществом и движением – в термодинамике необратимых процессов (термодинамике неравновесных систем) [6].

Для описания реальных потоков вводятся понятия *потоков физических величин* и *скалярных потоков векторов*. Однако связь между этими характеристиками реальных потоков раскрывается лишь для отдельных случаев и не всегда должным образом. В настоящее время отсутствует унификация терминов и буквенных обозначений величин, используемых для описания реальных потоков. Так, в частности, величина, используемая для характеристики интенсивности источников массы, получила следующие наименования и обозначения:  $J$  – «отнесённая к единице объёма секундная массовая скорость» [2];  $\dot{m}_e$  – «масса, подаваемая на единицу объёма в единицу времени» [3];  $K$  – «изменение массы в единицу времени на единицу объёма» [4];  $\sigma$  – «плотность источника или стока» [6].

Заметим, что данная величина не является массой ( $m$ , кг), а является производной величиной от массы (кг/(м<sup>3</sup>·с). Поэтому называть эту величину массой (в единице объёма в единицу времени) некорректно. Аналогичным образом обстоит дело с наименованиями и обозначениями других величин теории переноса. Это создаёт значительные трудности при изучении соответствующих дисциплин, особенно это касается термодинамики неравновесных систем (ТНС). Цель данной работы – дать основы теории переноса, сис-

тематизировать термины и обозначения величин в соответствии с уравнениями связи для них.

Основные величины теории переноса. Обозначим общим символом  $B$  величины, характеризующие запас (количество) вещества ( $B = m, N, \mu \dots$ ) или движения ( $B = E, m\vec{c}, \vec{L} \dots$ ) в некоторой области пространства. Производные величины, получаемые от деления основной величины на массу, объём, количество вещества, принято называть соответственно *удельными, объёмными, молярными* величинами:

$$b \equiv B_m = \delta B / \delta m; \quad b' \equiv B_V = \delta B / \delta V = \rho b; \quad B_i = \delta B / \delta \mathbf{i},$$

где  $\delta B$  – элементарная величина  $B$ , характеризующая некоторое свойство среды (системы) объёмом  $\delta V$ , массой  $\delta m = \rho \delta V$  и количеством вещества  $\delta \mu$ .

Например,  $e \equiv E_m = \delta E / \delta m$  – удельная энергия, Дж/кг;  $h = \delta H / \delta m$  – удельная энтальпия, Дж/кг;  $s = \delta S / \delta m$  – удельная энтропия, Дж/(кг·К);  $\tilde{\delta} = \delta V / \delta m = 1 / \rho$  – удельный объём, м<sup>3</sup>/кг;

$\rho \equiv m_V = \delta m / \delta V$  – плотность (объёмная масса), кг/м<sup>3</sup>;  $h' = \delta H / \delta V = \rho h$  – объёмная энтальпия, Дж/м<sup>3</sup>;  $s' \equiv S_V = \delta S / \delta V = \rho s$  – объёмная энтропия, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $e' \equiv E_V = \delta E / \delta V = \rho e$  – объёмная энергия, Дж/м<sup>3</sup>;  $e'_k = \delta E_k / \delta V = \rho c^2 / 2$  – объёмная кинетическая энергия, Дж/м<sup>3</sup>;  $\vec{K}_V \equiv \delta \vec{K} / \delta V = \rho \vec{c}$  – объёмный импульс, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $V_V = \delta V / \delta V = 1$  – «объёмный объём» – безразмерная величина, равная единице;

$$H_\mu = \delta H / \delta \mu \text{ – молярная энтальпия, Дж/моль.}$$

Если через поверхность переносится свойство, характеризуемое величиной  $B$ , в количестве  $\delta B$  за время  $dt$ , то их отношение

$$J_B \equiv \dot{B} = \delta B / dt \tag{1}$$

характеризует интенсивность потока субстанции и называется *потоком величины  $B$*  (слово «поток» в термине и точка в символе  $\dot{B}$  указывают на то, что эта величины получена от деления основной величины  $B$  на время). Например,  $J \equiv \dot{m} = \delta m / dt$  – *поток массы*, кг/с;  $\dot{V} = \delta V / dt$  – *поток объёма*, м<sup>3</sup>/с;  $J_S \equiv \dot{S} = \delta S / dt$  – *поток энтропии*, Вт/К;  $J_E \equiv \dot{E} = \delta E / dt$  – *поток энергии*, Вт;  $J_w \equiv P \equiv N \equiv \dot{E}_{\text{уф}} = \delta E_{\text{уф}} / dt = \delta W / dt = \dot{W}$  – *мощность, поток работы* ( $\dot{W}$ , Вт) – *поток энергии в упорядоченной форме (УФ)*;  $J_Q \equiv \Phi \equiv \dot{E}_{\text{хф}} = \delta E_{\text{хф}} / dt \equiv \delta Q / dt = \dot{Q}$  – *тепловой поток, поток теплоты* ( $\dot{Q}$ , Вт) – *поток энергии в хаотической форме (ХФ)*.

Отношение потока  $\dot{B}$  к длине, площади, объёму тела принято называть соответственно *линейной, поверхностной, объёмной плотностью потока величины  $B$* :

$$\dot{B}_l = \delta \dot{B} / \delta l, \quad j_B = \delta J_B / \delta A_\perp \equiv \dot{B}_A = \delta \dot{B} / \delta A_\perp, \quad J_V \equiv J_V^B = \delta J_B / \delta V \equiv \dot{B}_V = \delta \dot{B} / \delta V,$$

где  $\delta A_{\perp}$  – проекция площади  $\delta A$  на плоскость, перпендикулярную направлению потока.

Например, если внутри цилиндрической трубы длиной  $l$ , площадью боковой поверхности  $A$  и объёмом  $V$  выделяется тепловой поток  $\dot{Q} = \delta Q / \delta t$ , то *линейная, поверхностная и объёмная плотности теплового потока* определяются выражениями:

$$\Phi_l \equiv \Phi / l, \text{ Вт/м}; j_Q \equiv \varphi \equiv \Phi_A = \Phi / A, \text{ Вт/м}^2; J_V^Q \equiv \Phi_V \equiv \Phi / V, \text{ Вт/м}^3.$$

Поверхностная плотность потока массы  $j \equiv j_m = \delta J / \delta A_{\perp} = \delta \dot{m} / \delta A_{\perp}$ , кг/(с·м<sup>2</sup>).

Объёмную плотность потока, создаваемого источником (поглощаемого стоком), принято называть *интенсивностью внутренних источников* (стоков)

$$J_V \equiv J_{V_{\dot{a}, \dot{e}}} = \delta J_{\dot{a}, \dot{e}} / \delta V \equiv \dot{B}_{V_{\dot{a}, \dot{e}}} = \delta \dot{B}_{\dot{a}, \dot{e}} / \delta V. \quad (2)$$

Поверхностная плотность потока (плотность потока) рассматривается как вектор  $\vec{j}_B \equiv \vec{B}_A$ , что позволяет определять знак и значение потока  $\dot{B}$  в зависимости от угла между этим вектором и направлением нормали к поверхности  $\vec{n}$ :

$$\delta J_B \equiv \delta \dot{B} = \vec{j}_B \cdot \delta \vec{A} = \vec{j}_B \cdot \vec{n} \delta A = j_B \delta A_{\perp}, \quad (3)$$

где  $\delta A_{\perp} = \cos(\vec{j}_B, \vec{n}) \delta A$  – проекция площади  $\delta A$  на плоскость, перпендикулярную вектору поверхностной плотности потока  $\vec{j}_B$ .

Отсюда определяется модуль вектора  $\vec{j}_B$  (знаки  $\delta J_B$  и  $\delta A_{\perp}$  совпадают)

$$|\vec{j}_B| = j_B = \delta J_B / \delta A_{\perp}. \quad (4)$$

Таким образом, модуль вектора поверхностной плотности потока какой-либо величины  $B$  равен отношению потока этой величины к площади площадки, расположенной перпендикулярно направлению потока.

Интегрируя (3), получим выражение для потока  $J_B \equiv \dot{B}$  через всю площадку  $A$

$$J_B \equiv \dot{B} = \int_A \vec{j}_B \cdot \delta \vec{A} = \int_A \vec{j}_B \cdot \vec{n} \delta A = \int_A j_B \delta A_{\perp}. \quad (5)$$

Перенос движения (импульса, энергии) через поверхность может осуществляться как совместно с переносом вещества ( $J_B^{\dot{a}, \dot{a}\dot{a}} \equiv J_B^{\dot{e}\dot{e}\dot{e}}$ ), так и без переноса вещества ( $J_B^{\dot{a}, \dot{a}\dot{a}}$ ):

$$J_B = J_B^{\dot{a}, \dot{a}\dot{a}} + J_B^{\dot{a}, \dot{a}\dot{a}, \dot{a}\dot{a}} \equiv J_B^{\dot{e}\dot{e}\dot{e}} + J_B^{\dot{a}, \dot{a}\dot{a}, \dot{a}\dot{a}}.$$

Например, перенос тепла (ХД) в жидкой среде может осуществляться как за счёт переноса самой жидкой среды из области с одной температурой в область с другой температурой (такой перенос тепла называется *конвекцией*), так и без переноса вещества в неподвижной жидкости и в твёрдых телах (такой процесс переноса тепла называется *теплопроводностью*); изменение энергии системы может происходить как за счёт переноса массы, так и за счёт подвода тепла и совершения работы. Следовательно, поток энергии  $J_E$  будет складываться из потока переноса энергии конвекцией  $J_E^{\dot{e}\dot{e}\dot{e}}$ , потока

энергии за счёт совершения работы  $J_E^{\text{нiá. óáá}} \equiv J_W$  и потока энергии за счёт теплообмена

$$J_E^{\text{óááé}} \equiv J_Q:$$

$$J_E = J_E^{\text{iáó. ááú}} + J_E^{\text{á. iáó. ááú}} \equiv J_E^{\text{éiá}} + J_W + J_Q.$$

Аналогичным образом, вектор поверхностной плотности потока  $\vec{j}_B$  будет складываться из векторов, характеризующих перенос субстанции с переносом вещества и без переноса вещества,

$$\vec{j}_B = \vec{j}_B^{\text{iáó. ááú}} + \vec{j}_B^{\text{á. iáó. ááú}} \equiv \vec{j}_B^{\text{éiá}} + \vec{j}'_B, \quad (6)$$

где  $\vec{j}'_B$  – вектор поверхностной плотности потока без переноса вещества.

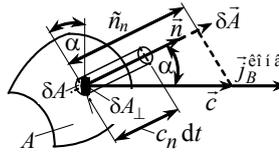


Рисунок 1

Определим конвективную составляющую вектора поверхностной плотности потока, связанную с переносом вещества. Для этого выделим в подвижной среде малый элемент поверхности, характеризуемый вектором площади  $\vec{\delta A} = \vec{n} \delta A$  (рис. 1).

Пусть подвижная среда протекает через эту площадку со скоростью  $\vec{c}$  под углом  $\alpha$  к направлению единичного вектора  $\vec{n}$  нормали. Скорость среды в направлении нормали определится проекцией скорости  $\vec{c}$  на нормаль:  $c_n = c \cos \alpha = \vec{c} \cdot \vec{n}$ . За время  $dt$  через элементарную площадку пройдёт среда объёмом

$$\delta^2 V = c_n dt \delta A = \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A dt = \vec{c} \cdot \vec{\delta A} dt$$

и перенесёт с собой свойство, характеризуемое величиной  $B$ , в количестве

$$\delta^2 B = B_V \delta^2 V = B_V c_n \delta A dt = B_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A dt = B_V \vec{c} \cdot \vec{\delta A} dt. \quad (7)$$

Элементарный поток свойства, характеризуемого величиной  $B$  (кратко *поток свойства B*), за счёт конвекции определится выражением (1) с учётом (7)

$$\delta J_B^{\text{éiá}} \equiv \delta \dot{B}_{\text{éiá}} = \delta(\delta B dt) = B_V c_n \delta A = B_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = B_V \vec{c} \cdot \vec{\delta A}.$$

Поскольку для конвективного потока справедлива и общая формула (3), то получим окончательно

$$\delta J_B^{\text{éiá}} = B_V c_n \delta A = B_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \rho b \vec{c} \cdot \vec{\delta A} = \vec{j}_B^{\text{éiá}} \cdot \vec{\delta A} = \vec{j}_B^{\text{éiá}} \cdot \vec{n} \delta A = j_B^{\text{éiá}} \delta A_{\perp}, \quad (8)$$

где  $\delta A_{\perp} = \delta A \cos \alpha$  – проекция площади  $\delta A$  на плоскость, перпендикулярную направлению потока.

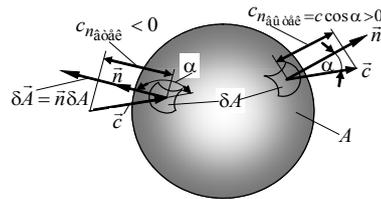


Рисунок 2

Как следует из формулы (8)  $\delta J_B^{\vec{e}\vec{i}\vec{i}\vec{a}}$  [как и  $\delta \dot{B} \equiv \delta J_B$  в (3)] – алгебраическая величина, знак которой «автоматически» определяется скалярным произведением вектора скорости  $\vec{c}$  и вектора единичной нормали  $\vec{n}$  к поверхности переноса. Чаще всего рассматривается внешняя нормаль, направленная наружу от поверхности (рис. 2). В этом случае скалярное произведение векторов скорости и нормали  $\vec{c} \cdot \vec{n} = c \cos \alpha = c_n$  положительно для вытекающей жидкости (в этом случае угол  $\alpha$  между направлением скорости и нормали острый и косинус угла положителен), а втекающей жидкости – отрицательно (в этом случае угол  $\alpha$  тупой и косинус угла отрицателен). Следовательно,  $\dot{B}_{\vec{a}\vec{a}\vec{a}\vec{e}} < 0$ , а  $\dot{B}_{\vec{a}\vec{a}\vec{a}\vec{e}} > 0$ .

Из (8) следует выражение для вектора поверхностной плотности конвективного потока

$$\vec{j}_B^{\vec{e}\vec{i}\vec{i}\vec{a}} = B_V \vec{c} = \rho b \vec{c}. \quad (9)$$

Тогда выражение (6) с учётом (9) может быть записано в виде

$$\vec{j}_B = \vec{j}_B^{\vec{i}\vec{a}\vec{a}\vec{a}\vec{a}} + \vec{j}_B^{\vec{a}\vec{i}\vec{a}\vec{a}\vec{a}\vec{a}} \equiv \vec{j}_B^{\vec{e}\vec{i}\vec{i}\vec{a}} + \vec{j}_B' = B_V \vec{c} + \vec{j}_B' = \rho b \vec{c} + \vec{j}_B'. \quad (10)$$

Откуда находится вектор поверхностной плотности потока свойства  $B$  без переноса вещества

$$\vec{j}_B' \equiv \vec{j}_B^{\vec{a}\vec{i}\vec{a}\vec{a}\vec{a}\vec{a}} = \vec{j}_B - B_V \vec{c} = \vec{j}_B - \rho b \vec{c}.$$

Интегрируя (8), получим выражение для конвективного потока свойства  $B$  через всю площадь поверхности  $A$

$$J_B^{\vec{e}\vec{i}\vec{i}\vec{a}} = \int_A \vec{j}_B^{\vec{e}\vec{i}\vec{i}\vec{a}} \cdot \delta \vec{A} = \int_A B_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \rho b \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \rho b_n \delta A. \quad (11)$$

В векторном анализе вводится понятие **потока вектора**  $\vec{a}$  (в нашем случае это  $\vec{j}_B$  и  $\vec{j}_B^{\vec{e}\vec{i}\vec{i}\vec{a}}$ ) *сквозь поверхность*  $A$  (вообще говоря, незамкнутую), определяемого как **скалярную величину**

$$F(\vec{a}) = \int_A \vec{a} \cdot \vec{n} dA = \int_A a \cos(\vec{a}, \vec{n}) dA = \int_A a_n dA = \int_A (n_x a_x + n_y a_y + n_z a_z) dA, \quad (12)$$

где  $n_x, n_y, n_z$  – направляющие косинусы нормали к площадке  $A$ .  
Формула Гаусса-Остроградского устанавливает связь поверхностного интеграла

по замкнутой поверхности с объёмным интегралом

$$\oint_A \vec{a} \cdot \vec{n} dA = \oint_A a_n dA = \int_V \operatorname{div} \vec{a} dV \quad (13)$$

Переходя от поверхностного интеграла к объёмному интегралу по формуле Гаусса-Остроградского (13) выражения для полного потока (5) и конвективного потока (11) через замкнутую поверхность (см. рис. 2) примут соответственно вид:

$$J_B \equiv \dot{B} = J_B^{\text{ia}\ddot{\text{a}}\ddot{\text{a}}\ddot{\text{a}}} + J_B^{\text{a}\ddot{\text{a}}\ddot{\text{a}}\ddot{\text{a}}} = \oint_A \vec{j}_B \cdot \delta\vec{A} = \int_V \operatorname{div} \vec{j}_B \delta V; \quad (14)$$

$$J_B^{\text{eii}\ddot{\text{a}}} = \oint_A \vec{j}_B^{\text{eii}\ddot{\text{a}}} \cdot \delta\vec{A} = \int_V \operatorname{div} \vec{j}_B^{\text{eii}\ddot{\text{a}}} \delta V = \int_V \operatorname{div}(B_V \vec{c}) \delta V = \int_V \operatorname{div}(\rho b \vec{c}) \delta V. \quad (15)$$

Согласно этим выражениям скалярные потоки векторов  $\vec{j}_B$  и  $\vec{j}_B^{\text{eii}\ddot{\text{a}}}$  через замкнутую поверхность равны интегралам от дивергенции этих векторов, распространённых на объём внутри этой поверхности.

Приведём примеры применения уравнения (11) к конвективным потокам:

– для потока энергии (Вт) – потока вектора  $\vec{j}_E^{\text{eii}\ddot{\text{a}}} = E_V \vec{c} = \rho e \vec{c}$

$$\dot{E}_{\text{eii}\ddot{\text{a}}} = \delta E_{\text{eii}\ddot{\text{a}}} d t = \int_A \vec{j}_E^{\text{eii}\ddot{\text{a}}} \cdot \delta\vec{A} = \int_A E_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \rho e \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A E_V c_n \delta A,$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $e$  – удельная энергия;

– для потока кинетической энергии (Вт)

$$\dot{E}_k = \int_A E_{V_k} c_n \delta A = \int_A (\rho c^2/2) c_n \delta A;$$

– для потока волновой энергии (Вт) – потока вектора Умова  $\vec{U} = w \vec{c} = \vec{j}_E^{\text{âie}\ddot{\text{a}}}$  (вектора поверхностной плотности потока волновой энергии  $\vec{j}_E^{\text{âie}\ddot{\text{a}}}$ )

$$\dot{E}_{\text{âie}\ddot{\text{a}}} = \int_A \vec{j}_E^{\text{âie}\ddot{\text{a}}} \cdot \delta\vec{A} = \int_A E_V^{\text{âie}\ddot{\text{a}}} \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \vec{U} \cdot \delta\vec{A},$$

где  $w \equiv E_V^{\text{âie}\ddot{\text{a}}}$  – объёмная энергия волны;  $\vec{c}$  – скорость переноса энергии волной (согласно этому уравнению, поток волновой энергии через произвольную поверхность, мысленно проведённую в среде, охваченной волновым движением, равен потоку вектора Умова через эту поверхность [7]);

– для потока энтропии (Вт/К) – потока вектора энтропии  $\vec{S} = \rho s \vec{c}$  (вектора поверхностной плотности конвективного потока энтропии  $\vec{j}_S^{\text{eii}\ddot{\text{a}}}$ )

$$\dot{S}_{\text{eii}\ddot{\text{a}}} = \delta S_{\text{eii}\ddot{\text{a}}} d t = \int_A \vec{j}_S^{\text{eii}\ddot{\text{a}}} \cdot \delta\vec{A} = \int_A S_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \rho s \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A s' c_n \delta A;$$

– для потока импульса – для силы (кг·м/с<sup>2</sup> = Н)

$$\vec{F} \equiv \vec{K} \equiv \delta \vec{K} d t = \int_A \vec{K}_V c_n \delta A = \int_A \rho \vec{c} c_n \delta A;$$

– для *потока массы* (кг/с) – *потока вектора массовой скорости*  $\rho \vec{c}$  (вектора поверхностной плотности потока массы  $\vec{j}$ );

$$J \equiv \dot{m} = \delta m d t = \int_A \vec{j} \cdot \delta \vec{A} = \int_A m_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \rho \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \rho c_n \delta A = \int_A \rho c \delta A_{\perp}; \quad (16)$$

– для *потока объёма* (м<sup>3</sup>/с) – *потока вектора скорости*  $\vec{c}$

$$\dot{V} = \delta V d t = \int_A V_V \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A \vec{c} \cdot \vec{n} \delta A = \int_A c_n \delta A = \int_A c \delta A_{\perp}.$$

Термин «поток объёма» в литературе заменяется термином «объёмный расход».

Однако это не эквивалентная замена, так как объёмный расход  $V_t$  и массовый расход

$m_t$ , в отличие от потока объёма и потока массы, являются всегда положительными величинами, определяемыми как абсолютные значения соответствующих потоков:

$$V_t \equiv |\dot{V}|, \quad m_t \equiv |\dot{m}|.$$

*Вектор поверхностной плотности потока массы* (вектор плотности потока массы), определяемый по общей формуле (9) с учётом  $b = m/m = 1$

$$\vec{j} \equiv \vec{m}_A \equiv \vec{J}_A = \rho \vec{c}, \quad (17)$$

в соответствии с общим понятием *потока вектора* (12) называют *вектором массовой скорости*, а его модуль, определяемый в соответствии с (4)

$$|\vec{j}| \equiv |\rho \vec{c}| \equiv j \equiv \rho c = \delta \dot{m} / \delta A_{\perp},$$

– *удельным расходом, плотностью тока, плотностью потока.*

Для потока массы через замкнутую поверхность выражение (16) с учётом формулы Гаусса-Остроградского (13) примет вид

$$\dot{m} = \oint_A \vec{j} \delta \vec{A} \equiv \oint_A (\rho \vec{c}) \delta \vec{A} = \int_V \operatorname{div}(\rho \vec{c}) \delta V \equiv \int_V \frac{\partial(\rho c_i)}{\partial x_i} \delta V,$$

а для потока объёма (потока вектора скорости) –

$$\dot{V} = \oint_A \vec{c} \delta \vec{A} = \int_V \operatorname{div} \vec{c} \delta V \equiv \int_V \frac{\partial c_i}{\partial x_i} \delta V.$$

Из приведённых примеров следует, что понятие *потока* (какой-либо) *величины* ( $B$ ) вытекает из уравнения связи  $\dot{B} = \delta B / \delta t$  и поэтому является менее абстрактным по сравнению с понятием *потока* (какого-либо) *вектора* ( $\vec{a}$ ), наименование и обозначение

которого зачастую является отвлечённым (вектор Умова  $\vec{U}$ , вектор массовой скорости  $\rho\vec{c}$ , и др.), а зачастую своим обозначением и наименованием дезориентируют читателя (например, обозначение вектора энтропии  $\vec{S}$ , Вт/(м<sup>2</sup>/К), совпадает с обозначением энтропии тела, Дж/К).

Примеры применения уравнения (5) к процессам переноса свойства среды без результирующего переноса вещества в каком-либо направлении:

– для *потока тепла* (теплоты), *теплового потока* – потока движения (энергии) в хаотической форме (Вт)

$$J_Q \equiv \Phi \equiv \dot{E}_{\text{хв}} = \delta E_{\text{хв}} / dt \equiv \delta Q / dt = \int \vec{j}_Q \cdot \delta \vec{A} = \int \vec{\varphi} \cdot \delta \vec{A} = \int \varphi \delta A_{\perp},$$

где  $\vec{j}_Q \equiv \vec{\varphi}$  – *вектор поверхностной плотности теплового потока* (Вт/м<sup>2</sup>), направленный по нормали к изотермической поверхности площадью  $\delta A_{\perp}$ ;

– для *потока электрического заряда* (Кл/с) – *силы электрического тока* (А)

$$I \equiv \dot{Q}_y = \delta Q_y / dt = \int_A \vec{j}_y \cdot \delta \vec{A},$$

где  $\vec{j}_y$  – *вектор поверхностной плотности потока заряда* (вектор плотности электрического тока), А/м<sup>2</sup>.

Балансовое уравнение изменения величины  $B$ , характеризующей состояние среды внутри неподвижной области пространства. Пусть некоторая неподвижная область пространства объёмом  $V$  содержит среду со свойством, характеризуемым величиной  $B$ . Количество свойства  $B$  в этом объёме будет

$$B = \int_V B_V \delta V.$$

Изменение этого количества во времени происходит за счёт потока свойства (с переносом и без переноса вещества) через замкнутую поверхность<sup>1</sup> площадью  $A$ , определяемого по формуле (14)

$$J_B \equiv \dot{B} = J_B^{\text{внеш}} + J_B^{\text{внут}} = \oint_A \vec{j}_B \cdot \delta \vec{A} = \int_V \text{div } \vec{j}_B \delta V, \quad (18)$$

а в общем случае и за счёт потока от внутренних источников (стоков), определяемого в виде объёмного интеграла от объёмной плотности потока  $J_V = \dot{B}_{V\text{в.и}}$  (2),

$$J_B^{\text{внут}} = \int_V J_V \delta V \equiv \dot{B}_{\text{в.и}} = \int_V \delta \dot{B}_{\text{в.и}} = \int_V \dot{B}_{V\text{в.и}} \delta V. \quad (19)$$

Поскольку поток через поверхность, определяемый выражением (18), положителен при «вытекании» свойства через неподвижную поверхность, а поток, определяемый выражением (19), положителен в результате «притока» свойства от внутренних источ-

<sup>1</sup> Такую поверхность, выделенную в пространстве и пронизаемую для различных потоков (с переносом и без переноса вещества), принято называть **контрольной поверхностью** (КП).

ников, то балансовое уравнение для скорости изменения величины  $B$ , характеризующей состояние среды внутри неподвижной области пространства, запишется в виде (знак дифференцирования внесён под знак интеграла, так как объём постоянен)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \int_V \frac{\partial B_V}{\partial t} \delta V = -J_B + J_{a,\varepsilon} = -\oint_A \vec{j}_B \cdot \delta \vec{A} + \int_V J_V \delta V = -\int_V \operatorname{div} \vec{j}_B \delta V + \int_V J_V \delta V, \quad (20)$$

Поскольку объём можно выбрать произвольно, то из (20) следует дифференциальное уравнение баланса для величины  $B$  в *неподвижной* области пространства

$$\frac{\partial(\delta B)}{\partial t \delta V} = \frac{\partial B_V}{\partial t} = \frac{\partial(\rho b)}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{j}_B + J_V = -\operatorname{div}(\rho b \vec{c}) - \operatorname{div} \vec{j}'_B + J_V, \quad (21)$$

где вектор поверхностной плотности потока  $\vec{j}_B$  определяется выражением (10).

Уравнение (21), записанное в общем виде, позволяет уточнить запись, используемые в теории переноса уравнений. Так, в работе [6] без вывода приводится аналогичное уравнение в виде

$$\frac{\partial G}{\partial t} = -\operatorname{div} \mathbf{J}_G + \sigma_G \quad (22)$$

и отмечается, что величина  $G$  подчиняется уравнению баланса и даже выполняется закон сохранения свойства  $G$ . В этой же работе вводится величина  $\delta Q = G \delta V$ , следовательно,  $G = Q_V = \delta Q / \delta V$  – объёмная величина, для которой закон сохранения не выполняется (закон сохранения может выполняться для  $Q$ ).

В соответствии с (21) точная запись балансового уравнения (22) для величины  $Q$  будет иметь вид

$$\frac{\partial(\delta Q)}{\partial t \delta V} = \frac{\partial Q_V}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial t} = -\operatorname{div} \mathbf{J}_Q + \sigma_Q.$$

В векторном анализе выводится важная формула дифференцирования по времени интеграла, взятого по подвижному объёму  $V = V(t)$ , которая в дальнейшем используется для получения различных балансовых уравнений для подвижного элемента среды. Рассмотрим метод вывода этой формулы (с некоторыми сокращениями и пояснениями) на примере работы [4].

Рассмотрим в движущейся среде в момент времени  $t$  конечный элемент сплошной среды (систему) объёмом  $V$  и поверхностью  $A$ . В момент  $t + \Delta t$  этот элемент среды займёт область пространства, объёмом  $V'$  и поверхностью  $A'$ . Пусть состояние в любой точке системы и в любой момент времени задано объёмной величиной  $B_V = \delta B / \delta V$ , т. е. задано поле величины  $B_V(x, y, z, t) = B_V(\vec{r}, t)$ . Если разбить всю систему на элементарные подсистемы, состояния которых характеризуются величинами  $\delta B = B_V \delta V$ , то количество свойства, характеризуемого величиной  $B$ , для всей подвижной системы объёмом  $V$

определился интегралом  $B = \int_{V(t)} B_V(x, y, z, t) \delta V = \int_{V(t)} B_V(\vec{r}, t) \delta V$ . Вычислим полную производную от этого интеграла с учётом того, что от  $t$  зависит не только подынтегральная функция, но и область интегрирования  $V$ :

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= \frac{d}{dt} \int_{V(t)} B_V(x, y, z, t) \delta V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V'} B_V(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z, t+\Delta t) \delta V - \int_V B_V(x, y, z, t) \delta V}{\Delta t} = \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[\int_{V'} (B_V(\vec{r}, t+\Delta t) - B_V(\vec{r}, t)) \delta V + \int_{V'} B_V(\vec{r}+\Delta \vec{r}, t+\Delta t) \delta V - \int_V B_V(\vec{r}, t+\Delta t) \delta V]}{\Delta t} = \\ &= \int_V \frac{\partial B_V(\vec{r}, t)}{\partial t} \delta V + \oint_A B_V c_n \delta A = \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)_{\text{лок}} + \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)_{\text{конв}} = \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)_{\text{лок}} + \dot{B}_{\text{конв}} = \frac{\partial B}{\partial t} + J_B^{\text{конв}}, \end{aligned} \quad (23)$$

так как объём состоит из элементарных цилиндров  $\delta V = c_n \delta A \Delta t$ .

Разность первых двух интегралов по объёму  $V$  представляет собой локальное приращение величины  $B$  в этом объёме за время  $\Delta t$ , а предел отношения этого приращения ко времени – локальную производную для начального объёма  $V$ . Разность остальных двух интегралов по объёмам  $V'$  и  $V$  характеризует конвективное приращение  $\Delta B_{\text{конв}}$  для конечного момента времени  $t + \Delta t$ , а предел отношения этого приращения ко времени – конвективную производную.

Преобразуя поверхностный интеграл в (23) по формуле (13), получим формулу для полной производной по времени от интеграла, взятого по подвижному объёму,

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} B_V(x, y, z, t) \delta V = \int_V \frac{\partial B_V}{\partial t} \delta V + \oint_A B_V c_n \delta A = \int_V \left[ \frac{\partial B_V}{\partial t} + \text{div}(B_V \vec{c}) \right] \delta V. \quad (24)$$

Новый метод вывода формулы для производной по времени от интеграла по зависящему от времени объёму. Рассмотрим вывод формулы (24), исходя из производной по времени от величины  $\delta B = B_V \delta V$ , характеризующей количество свойства  $B$  малого подвижного элемента среды,

$$\frac{d(\delta B)}{dt} = \frac{d(B_V \delta V)}{dt} = \frac{dB_V}{dt} \delta V + B_V \frac{d(\delta V)}{dt} = \frac{dB_V}{dt} \delta V + B_V \text{div} \vec{c} \delta V. \quad (25)$$

Здесь использовано известное выражение для дивергенции  $\text{div} \vec{c} = \frac{d(\delta V)}{dt} \frac{1}{\delta V}$ .

Если взять оператор набла ( $\nabla$ ) от произведения вектора на скаляр  $\nabla(B_V \vec{c}) = \vec{c} \cdot \nabla B_V + B_V \nabla \vec{c}$  и использовать оператор индивидуальной производной по времени

$\frac{dB_V}{dt} = \frac{\partial B_V}{\partial t} + \vec{c} \cdot \nabla B_V$ , то можно получить известное *кинематическое равенство*

$$\frac{\partial B_V}{\partial t} + \text{div}(B_V \vec{c}) = \frac{dB_V}{dt} + B_V \text{div} \vec{c}, \quad (26)$$

Тогда производная (25) с учётом (26) может быть записана в таком виде:

$$\frac{d(\delta B)}{dt} = \left[ \frac{dB_V}{dt} + B_V \text{div} \vec{c} \right] \delta V = \left[ \frac{\partial B_V}{\partial t} + \text{div}(B_V \vec{c}) \right] \delta V.$$

Интегрируя это уравнение, сразу приходим к известному интегралу векторного анализа (24). Переходя от объёмного интеграла к поверхностному, получим

$$\frac{dB}{dt} = \int_V \left[ \frac{\partial B_V}{\partial t} + \text{div}(B_V \vec{c}) \right] \delta V = \int_V \frac{\partial B_V}{\partial t} \delta V + \oint_A B_V \vec{c} \delta \vec{A} = \frac{\partial B}{\partial t} + J_B^{\text{конв}}.$$

Заменяя  $\partial B/\partial t$  по уравнению (20)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -J_B + J_{\dot{a},\dot{e}} = -J_B^{\dot{a},\dot{e}} - J_B' + J_{\dot{a},\dot{e}}, \quad (27)$$

получим

$$\frac{dB}{dt} = -J_B + J_{\text{в.и}} + J_B^{\text{конв}} = -J_B' + J_{\text{в.и}}. \quad (28)$$

Уравнения (27) и (28) являются уравнениями баланса для величины  $B$  соответственно для неподвижного контрольного пространства и подвижного элемента среды. Сравнивая эти уравнения, заключаем, что в случае неподвижного контрольного пространства перенос свойства  $B$  через границу открытой системы (27) происходит как совместно с переносом вещества (конвективный перенос), так и без переноса вещества, а в случае подвижного элемента среды (28) перенос свойства  $B$  через границу закрытой системы происходит без переноса вещества.

Выводы:

- 1 Проведена систематизация терминов физических величин теории переноса и их обозначений в соответствии с уравнениями связи. Установлена однозначная связь между потоками величин и скалярными потоками векторов.
- 2 Получены балансовые уравнения переноса для открытой неподвижной системы и подвижной закрытой системы в обобщённом виде.
- 3 Дан упрощённый метод вывода формулы для производной по времени от интеграла, взятого по зависящему от времени объёму.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. Т VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.: ил.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973.– 848 с.: ил.
3. Самойлович Г. С. Газодинамика: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.: ил.
4. Седов А. И. Механика сплошной среды, т. 1. – М.: Наука, 1976.– 536 с.: ил.
5. Теплопередача: Учеб. для вузов /В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд.. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.: ил.
6. Гуров К. П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов (физические основы) / Монография. – М.: Наука, 1978. – 128 с.: ил.
7. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 608 с.: ил.

Г.Г. Таткеева, Б.А. Жаутиков

УДК 622.4133:533.17

Карагандинский государственный технический университет

В.М. Юров

Карагандинский государственный университет

им. Е.А. Букетова

## МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДОБЫЧИ МЕТАНА

*Жұмыста көмір қабат қатты ерітінді ыдыру кезінде метандың эмиссия үлгісі ұсынылған. Уақыт өткеннен кейін газ эмиссиясы тез төмендеме көрсетілген. Метандың эмиссиясын тездету дірілдеу ықпалын пайдалану әдісі ұсынылған.*

*In work the model of issue of methane from coal layers is offered at disintegration of a firm solution. It is shown, that gas issue quickly falls down in due course. The way of an intensification of issue of methane at the expense of vibrating influence on a layer is offered.*

Метан - прекрасное энергетическое топливо и сырье для химической промышленности, запасы которого не меньше запасов природного газа, а возможно, даже больше. Теплота сгорания метана составляет 8400 ккал/м<sup>3</sup>, что соответствует 1,2 кг условного топлива на 1 м<sup>3</sup>. Проблема состоит в том, как взять из недр угольный метан? Оказывается, это не так просто, так как метан растворен в пленках воды угля и породы, находится в газообразном, жидком и твердом состояниях.

Природа шахтного метана. Природа происхождения газов, содержащихся в угленосных отложениях, окончательно не установлена. Основная масса исследователей считает, что метан угольных месторождений образовался при биохимических процессах разложения растительного вещества и не претерпел изменений в течение многих миллионов лет [1].

В соответствии со второй моделью, в процессе дегазации мантии, интенсивные потоки мантийных газов - водород, метан и другие газы сорбировались порами и трещинами угленосных пластов. Насыщение угленосной толщи путем сорбции экзогенных газов так же происходило в далеком историческом периоде [2].

Получившая в последнее время широкое распространение абиогенная модель до сих пор считается спорной, по крайней мере, в отношении абиотической генерации метана в значительных количествах [3]. Однако недавние находки абиогенного метана в мантийных газах и жидкостях, на других планетах, теоретические расчеты и экспериментальные исследования образования и изотопного фракционирования метана делают эту концепцию все более убедительной [4]. Одним из весомых аргументов в пользу абиогенной гипотезы является экспериментальное получение метана на различных катализаторах при очень мягких условиях, соответствующих верхней земной коре.

В работе [5] показана возможность формирования метана и легких углеводородов с составом, близким к природному газу, и содержанием метана свыше 90%, путем гидри-

рования  $\text{CO}_2$  в присутствии железного катализатора  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Это дало возможность авторам предположить добавочный механизм возникновения природного газа в угольных пластах, учитывая протяженность геологических эпох. Каталитическое действие железистых минералов и глин было обнаружено также при искусственном метаморфизме.

Таким образом, шахтный метан может быть представлен несколькими источниками генерации:

1. Метан метаморфогенного происхождения, образовавшийся в угольных пластах и вмещающих породах «in situ» на различных этапах формирования угольного месторождения. Он является наиболее прогнозируемым.

2. Метан глубинного происхождения, мигрирующий по сети тектонических нарушений в осадочной толще в разрабатываемый горный массив. Он разделяется на: а) метан, поступающий из более глубоко залегающих угольных пластов, а также из нефтяных или газовых залежей, залегающих ниже каменноугольных отложений; б) мантийный метан, проникающий в осадочную толщу с угольными пластами непосредственно из мантии по разломам кристаллического фундамента.

3. Метан, генерирующийся как на протяжении времени существования ископаемых углей, так и по настоящее время в результате химических реакций. Он наименее исследован. Его опасность заключается в том, что он образуется в локальной зоне угольного пласта (до нескольких метров) и заранее прогнозировать его наличие средствами газовой защиты невозможно.

Карагандинский угольный бассейн занимает площадь около 3000 квадратных километров и представлен угленосными отложениями карбона в виде трех синклинальных структур: Шерубайнуринской, Карагандинской и Верхнесокурской, которые разделены соответственно Алабасским и Майкудукским поднятиями.

Степень метаморфизма углей возрастает со стратиграфической глубиной от газовых углей тентекской свиты до коксовых и отощенных в карагандинской и ашлярикской свитах. Кроме того, метаморфизм углей возрастает и в южном направлении с ростом мощности угленосной толщи, а также по падению угольных пластов. Это обуславливает разнообразие состава углей от газовых до антрацитов, включительно на юге бассейна. Угли витринитовые (60-80%), среднезольные (10-25 %) в Долинской и Карагандинской свитах, высокозольные (20-35%) в Ашлярикской и Тентекской свитах. Различие в метаморфизме углей сказывается и на распределении метана по формам существования (таблица 1).

Из таблицы 1 следует, что подавляющая часть (около 80%) метана Карагандинского угольного бассейна на глубине свыше 800 м находится в состоянии твердого углеметанового раствора.

Отсюда следует вывод: для эффективного извлечения метана Карагандинского угольного бассейна необходимы энергетические воздействия на угольные пласты, стимулирующие распад углеметанового раствора и соответствующее газовыделение.

Таблица 1

Распределение метана по формам существования в углях Карагандинского угольного бассейна средней стадии метаморфизма на глубине свыше 800 м [6]

Локализация метана в угле	Форма существования метана	Количество метана, %
Внутри макропор, микротрещин, других дефектов сплошности угля в природных условиях	Свободный	2 -12
На угольных поверхностях природных пор и дефектов сплошности, межблочных промежутках (включая объемное заполнение переходных пор и макроскопических дефектов)	Адсорбированный	8-16
В межмолекулярном пространстве угольного вещества	Твердый углеметановый раствор	70-85
В дефектах ароматических слоев кристаллитов	Химически сорбированный метан	1-2
Внутри клатратоподобных структур	Твердый раствор внедрения	1-3

Модель газовыделения углеметановым пластом. В связи со сказанным выше, мы предлагаем следующую модель газовыделения в углеметановых пластах.

Пусть за счет какого – либо внешнего воздействия инициировалась реакция распада углеметанового твердого раствора с выделением метана с объемным количеством  $Q_0$ . Сначала мы рассмотрим этот процесс без участия воды. Выделившийся газ начинает диффундировать сквозь пласт в рабочую скважину.

В такой постановке задачи, фильтрация метана описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q(t)}{hR} \frac{\partial C}{\partial x} = 0; \quad R = m + (1-m)(\rho_0 / \rho^0) \Gamma, \quad (1)$$

$$mv = -\frac{K_{пр}}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$mv = \frac{Q(t)}{hR}, \quad (3)$$

где  $Q$  – объемное количество метана в угольном пласте, возникающего в единицу времени;

$\Gamma$  – константа Генри;

$\rho_0$  – плотность угля;

$\rho^0$  – плотность метана;

$C$  – массовая концентрация метана;

$h$  – толщина пласта;

$mv$  – скорость фильтрации;

$m$  – пористость пласта;

$K_{пр}$  – абсолютная газопроницаемость пласта.

Уравнение (1) описывает изменение концентрации метана в пласте; уравнение (2) является законом Дарси в дифференциальной форме; уравнение (3) связывает объемное количество метана, проходящее через единичную площадь пласта глубиной  $h$  с вектором линейной фильтрации направленном перпендикулярно плоской поверхности пласта.

Граничные условия для задачи сформулируем следующим образом:  
 $p(t_0, h_0) = p_0, p(t_k, h_k) = p_k, C(t_0, h_0) = C_0, C_k(t > 0, h_k) = C_k, Q(t_0) = Q_0, v(t_0, h) = Q_0/hm,$  (4)

где  $Q_0$  - объемное количество метана в пласте в начальный момент времени  $t_0 = 0$ ; здесь индексы 0, k относятся к начальному и конечному состоянию, соответственно.

Уравнение (1) является нелинейным и «в лоб» его не решить, поэтому рассмотрим некоторые приемы, позволяющие снять эту проблему без потери строгости решения.

Прежде всего, будем считать, что распад твердого раствора углеметана описывается кинетикой первого порядка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_p S(C_k - C_0) \quad (5)$$

где  $K_p$  – константа скорости реакции распада твердого раствора;

$C_k$  – конечная концентрация метана (концентрация насыщения), определяемая граничными условиями (4);

$C_0$  – начальная концентрация метана;

$S$  – площадь реакции распада твердого раствора, которую мы будем принимать единичной.

Таким образом, уравнение (1) запишется в виде:

$$K_p C_k + \frac{Q(t)}{hR} \frac{\partial C}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Продифференцируем (6) по времени:

$$\frac{1}{hR} \frac{dQ}{dt} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{Q(t)}{hR} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right) = \frac{dQ}{dt} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + Q(t) \cdot K_p \frac{\partial C}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) не представляет трудностей и имеет вид:

$$Q(t) = Q_0 e^{-K_p t}. \quad (8)$$

Уравнение (3) запишется в виде:

$$mv = \frac{Q_0}{hR} e^{-K_p t}. \quad (9)$$

Уравнение (2) будет иметь вид:

$$\frac{Q_0}{hR} e^{-K_p t} = \frac{K_{np}}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{h}. \quad (10)$$

Для коэффициента газопроницаемости  $K_{np}$  в итоге получим следующее уравнение:

$$K_{np} = \frac{\mu Q_0}{\rho g h R} \cdot e^{-K_p t} = \frac{v Q_0}{g h R} \cdot e^{-K_p t}. \quad (11)$$

В стационарном случае ( $t=0$ ) и при  $R=1$ , уравнение (11) совпадает с известным уравнением Дарси. Здесь  $v = \mu/\rho$  - кинематическая вязкость.

Уравнения (8) и (11) показывают, что при единичном внешнем воздействии на твердый раствор метаноугля газовыделение со временем быстро (по экспоненте) спадает. Это подтверждается работой большинства скважин.

Таким образом, из нашей модели можно сформулировать следующие выводы:

- эффект от внешнего воздействия должен быть максимальным, тогда максимальным будет  $Q_0$ ;

- внешнее воздействие должно быть периодическим, тогда газовыделение будет стремиться к стационарному режиму.

Рассмотрим последний вывод подробнее. В случае механического воздействия на пласт с частотой  $\omega$  и амплитудой  $A$ , уравнение (8) можно переписать в виде:

$$Q(t) = Q_0 e^{-(\omega - K_p)t} \quad (12)$$

Стационарному режиму отвечает равенство  $\omega = K_p$ . Поскольку константы скоростей распада твердых растворов имеют небольшие величины, то мы приходим к еще одному важному выводу:

- для увеличения газовыделения необходимо применять низкочастотные механические воздействия.

Этому случаю отвечают вибрационные воздействия. Действительно, в работе [7] экспериментально показано, что после вибровоздействия метаноотдача возросла, при этом скорость газовыделения из газозамерных скважин выросла в 4-7 раз.

Многие исследователи считают, что в Карагандинском угольном бассейне извлечение метана, не связанное с подземной добычей угля, достаточно проблематично. Это обусловлено тем, что на стадии геологоразведочных работ и в процессе ведения горных работ на шахтах Карагандинского угольного бассейна до настоящего времени не обнаружены промышленно значимые поступления газа из локальных скоплений не техногенного происхождения.

Однако как показано нами выше, проблема извлечения шахтного метана в Карагандинском угольном бассейне связана с тем, что большая его часть находится в состоянии углеметанового раствора, требующего нового подхода для его извлечения. Предложенная нами модель открывает перспективу организации промышленной добычи метана в Карагандинском угольном бассейне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А., Ульянова Е., Разумов О., и др. Природа шахтного метана // Energyonline, №1(2), 2010. – С.1-17.
2. Бакалдина А.П. Влияние вещественного состава углей на их метансодержание и природную газоносность. Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР. - М.: Недра, 1980. - С. 102-123.
3. Glasby G.P., Abiogenic origin of hydrocarbons: An historical overview // Resource Geology, 2006, Vol. 56. – P. 85-98.
4. Proskurowski G., Lilley M.D., Seewald J.S., et al. Abiogenic hydrocarbon production at Lost City hydrothermal field // Science, 2008, Vol. 319, №5863. – P. 604-607.
5. Medina J.C., Butala S.J., Bartholomew C.H., Lee M.L. Iron-catalyzed CO<sub>2</sub> hydrogenation as a mechanism for coalbed gas formation // Fuel, 2000, Vol. 79. – P.89-93.
6. Сагинов А.С., Ли К.Д. О промышленной добыче угольного метана в республике Казахстан // Труды университета, КГТУ, 2006, №2. – С.26-28.
7. Павленко М.В. Применение технических средств вибрационного воздействия для изменения состояния и свойств угольного массива // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та припадобудуванні, 2007. Вып. 41. – С.49-53.

**А.К. Турсунбаева, А.Д. Маусымбаева,**

**УДК 622.73**

**В.С. Портнов**

*Карагандинский государственный технический  
университет г. Караганда*

**В.М. Юров**

*Карагандинский государственный университет  
им. Е. Букедова, г. Караганда*

## **ТЕРМОДИНАМИКА ДРОБЛЕНИЯ РУДЫ ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ МЕТАЛЛОВ 3**

*Келтірілген жұмыста кендер мен минералдарының дезинтеграция, ұсақталыну, ұсатылу проблемаларына термодинамикалық ұсыныс жасалынды. Кендерінің дайындау үрдісін және оны байытуын ықшамдауға рұқсат ету үшін бізбен алынған формулалар тәжірибелік анықталынатын параметрлерді асырайды.*

*In the present work we have offered thermodynamic the approach to problems of crushing, crushing, decomposition of minerals and ores. The formulas received by us contain experimentally defined parameters that allows optimizing processes of preparation of ore and its enrichment.*

### **Часть III**

#### **Микроскопические модели разрушения. Дезинтеграция упорных руд.**

##### **Введение.**

Процесс рудоподготовки в технологии обогащения различных руд преследует цель создания условий, обеспечивающих максимальную степень извлечения полезного компонента при минимально возможных ресурсозатратах. Как правило, этот процесс связан с измельчением руды до крупности меньше меньшего размера зерна полезного компонента с последующим его извлечением тем или иным физическим или химическим способом.

Самым энергоёмким и дорогостоящим процессом при добыче и обогащении минерального сырья является их разрушение. Так, например, на железорудных ГОКах России на долю этого процесса приходится 70% всех энергозатрат (30 кВт·ч/т руды) [1]. Из всех технологических процессов разрушения, а это бурение, взрывание, дробление и измельчение, наиболее энергозатратным является измельчение (26 кВт·ч/т руды) [1]. В горной промышленности США на долю дробления и измельчения приходится 29,3 млрд. кВт·ч в год [2], что составляет 45% от всей потребляемой горной промышленностью США электроэнергии.

В золотодобывающей отрасли, а так же при добыче полиметаллических руд измельчение является одним из самых затратных технологических процессов.

В литературе давно обсуждается вопрос о селективном дроблении руды, однако ни одна модель не раскрывает природу наблюдаемой селективности. В части I настоящей

работы мы показали, что селективность дробления руды связана с адитивностью энергии Гиббса минерала. В настоящей части работы мы продолжим рассмотрение процесса разрушения минералов, но уже на микроскопическом уровне.

Микроскопические модели разрушения.

Принято различать два механизма разрушения твердого тела – хрупкое и вязкое [3]. В первом случае основную роль играют разрывы межатомных связей, а во втором – пластическая деформация. Согласно современным представлениям процесс хрупкого разрушения складывается из трех стадий [4]:

- термофлуктуационное зарождение элементарных носителей разрушения;
- их кластеризация в укрупненные трещины (очаги разрушения);
- безактивационный рост очагов до размеров, начиная с которых концентрация напряжений у острия трещины приводит к достижению предела прочности, и становится возможным атермическое распространение ее фронта со скоростью звука.

Количественное исследование двух первых стадий проведено в работе [5]. При этом элементарный носитель разрушения представлялся как дилатон [6] – устойчивая флуктуационная область повышенной дилатации решетки, реализующаяся за счет ангармонизма фононов. Обусловленная им накачка упругой энергии в объем  $V_d$  составляет  $W_d \sim KV_d$ , где  $K$  – модуль всестороннего сжатия. Скорость накачки  $v^+ = \Delta W_d / \Delta t$  задается приращением энергии  $\Delta W / W = \Delta K / K = G \Delta \epsilon_d$ , где  $G$  – постоянная Грюнайзена,  $\epsilon_d$  – дебаевская частота. Стабилизация дилатона обеспечивается, если получающаяся в результате величина  $v^+ \sim G \Delta \epsilon_d W_d \omega_d$  превосходит скорость рассасывания флуктуации  $v^- = W_d / \tau_{rh}$  за счет выноса энергии фононами, вылетающими из дилатона и сталкивающимися за его пределами ( $\tau_{rh} = \lambda / a \omega_d$  – время свободного пробега,  $\lambda$  его длина,  $a$  – параметр решетки). Отсюда следует, что для образования дилатона флуктуация дилатации  $\epsilon_d$  должна превосходить критическое значение:

$$\epsilon_c \approx G^{-1} \frac{a}{\lambda}. \quad (1)$$

Подставляя это значение в дебаевское уравнение состояния твердого тела  $K \epsilon_d = \sigma_d + (G/V_d) \Delta W_d$ , где  $\sigma_d$  – дилатационная составляющая напряжений, и сопоставляя его с выражением  $Q = Q_0 - \Omega \sigma_d$  для энергии активации зарождения трещины, находим, что при отождествлении  $Q$  и  $\Delta W_d$  высота потенциального рельефа  $Q_0$  и активационный объем  $\Omega$  определяются формулами:

$$Q_0 = \frac{c}{\beta} \epsilon_c \approx G^{-1} \frac{c}{\beta} \cdot \frac{a}{\lambda}, \quad \Omega = \frac{V_d}{G} = G^{-1} a^3 \frac{V_d}{a^3}, \quad (2)$$

где  $\beta$ ,  $c$  – коэффициент теплового расширения и теплоемкость, связанные равенством  $K\beta = Gc/V$ . Отсюда видно, что для образования дилатона наиболее благоприятны системы с большими значениями коэффициента теплового расширения и длины свободного пробега фононов.

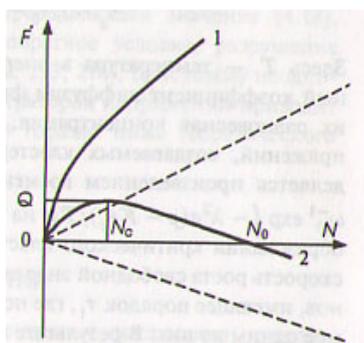
Несмотря на очевидные успехи, дилатонная модель не может объяснить все особенности процесса разрушения, в частности выпадает из рассмотрения различие в поведении хрупких и вязких тел.

В работе [4] рассмотрен вопрос о кластеризации носителей разрушения. В рамках макроскопического подхода скорость изменения свободной энергии  $F$ , обусловленная образованием кластера из  $N \gg 1$  фрустронов, представляется стандартным выражением [7]:

$$\dot{F} = gN + \sigma N^{2/3}, \quad (3)$$

где  $g(p)$  – изменение величины  $F$  при добавлении одного фрустрона,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

При малых давлениях, когда  $g(p) > 0$ , образование кластера невыгодно до тех пор, пока не выполняется условие  $g(p) = 0$ , отвечающее критическому значению  $p_c$ . С ростом давления до значения  $p > p_c$  зависимость  $F(N)$  приобретает немонотонный вид кривой 2 на рис. 1.



1 – малые нагрузки ( $g(p) > 0$ ); 2 – большие нагрузки ( $g(p) < 0$ ). Штриховые линии получаются в пренебрежении поверхностными слагаемыми.

Рисунок 1 – Зависимость скорости изменения свободной энергии от числа фрустронов в кластере [4]

В результате флуктуационный рост кластера, в котором число фрустронов превышает критическое значение  $N_c = (2\sigma/3g)^3$ , приводит к уменьшению скорости диссипации свободной энергии  $F$ . Упругое поле такого закритического кластера приводит к втягиванию фрустронов, пока их число не достигнет предельного значения  $N_0 = (\sigma/3g)^3$ , с превышением которого кластер становится генератором энергии ( $F < 0$ ). Это означает автокаталитический режим распространения магистральной трещины, т.е. разрушение.

Полное время разрушения  $\tau$  складывается из инкубационного периода  $\tau_c$ , необходимого для флуктуационного образования критического кластера, и времени  $\tau_g$ , требующегося для его роста до предельного числа фрустронов  $N_0$ . Последнее определяется произведением разности  $N_0 - N_c$  на время  $\tau_1 \sim (TN_0)/\sigma c l \epsilon_c a D_c$ , необходимого на втягивание одного фрустрона в закритический кластер [8]:

$$\tau_g \approx (N_0 - N_c) \tau_1 \approx \frac{N_0^2}{D_c} \cdot \frac{T}{\sigma c l \epsilon_c a}. \quad (4)$$

Здесь  $T$  – температура в энергетических единицах,  $D$  – эффективный коэффициент диффузии фрустронов,  $c \sim \exp\{\lambda^2 a(p - K \epsilon_c)/T\}$  – их равновесная концентрация,  $\sigma c l$  – характерное значение поля напряжений, создаваемых кластером. Инкубационный период  $\tau_c$  определяется произведением времени образования одного фрустрона  $\tau_f \approx \omega_D^{-1} \exp\{-\lambda^2 a(p - K \epsilon_c)\}$  на вероятность  $\omega_n \approx N_c^{-1} \exp\{-Q \tau' N_c / T\}$  образования критического кластера, где  $Q = gN/2$  – отвечающая ему скорость роста свободной энергии,

$\tau'$  - время объединения двух фрустронов, имеющее порядок  $\tau_1$ , где под  $\sigma_1$  следует понимать поле  $\sigma_1$ , создаваемое одним из них. В результате полное время разрушения принимает вид:

$$\tau = \tau_0 \exp\left\{-\frac{\lambda^2 a}{T}\left(p - \frac{Ka}{G\lambda}\right)\right\}, \quad (5)$$

$$\tau_0 = (\omega_p N_c)^{-1} \exp\left\{-\frac{Q\tau_1 N_c}{T}\right\} + \frac{N_0^2 TG\lambda}{Da^2 \sigma_{c1}}.$$

Проведенное рассмотрение показывает, что процесс хрупкого разрушения определяется образованием и эволюцией ансамбля элементарных носителей разрушения – фрустронов. Последние представляют мезоскопические области локализации сдвиговых деформаций, окруженные сверхпластичной оболочкой. Хрупкий механизм разрушения обеспечивается посредством кластеризации фрустронов в закритический очаг разрушения, что требует вязкости  $\nu$ , превышающей значение (5).

В вязких материалах, где реализуется обратное условие, разрушение протекает по дилатонному механизму [9], присущему неоднородным материалам, где наличие концентраторов напряжения приводит к пределу прочности, значение которого гораздо ниже теоретического предела [9].

Статистическая модель кластеризации носителей хрупкого разрушения.

Мы изложим нашу модель образования кластеров с позиции статистической физики.

Рассмотрим кристалл с числом фрустронов  $m$ . Пусть расстояние между фрустрономы одинаково и равно  $R$ . Опишем вокруг каждого фрустрономы  $0$  сферу радиусом  $R$ . Пусть плотность числа фрустронов в этой сфере равна  $n_0$ , тогда вероятность  $W_0(r)$  того, что ближайший фрустрон находится на расстоянии  $r$  от фрустрономы  $0$ , нетрудно получить из классической статистической физики и она равна:

$$W_0(r) = 4\pi n_0 r^3 \exp[-4\pi n_0 r^3 / 3] \quad (6)$$

Вероятность нахождения  $N_0$  фрустронов в зоне фрустрономы  $0$  радиусом  $r$  равна, очевидно,

$$W_{N_0}(r) = \prod_{k=1}^{N_0} W_k(r) = (4\pi n_0)^{N_0} r^{3N_0} \exp[-4\pi N_0 n_0 r^3 / 3] \quad (7)$$

Вероятность (7) определим с другой стороны как отношение числа фрустронов  $N_0$  в зоне фрустрономы к общему числу фрустронов в выделенной сфере –  $Q_0 = 4/3 \pi n_0 R^3$ :

$$p_0 = \frac{N_0}{Q_0} = (4\pi n_0)^{N_0} r^{3N_0} \exp[-4\pi n_0 r^3 / 3] \quad (8)$$

Для системы из  $m$  фрустронов имеем:

$$p_0 = (4\pi n_0)^{N_0} r^{3N_0} \exp[-4\pi N_0 n_0 r^3 / 3] = \frac{N_0}{Q_0},$$

$$p_1 = (4\pi n_1)^{N_1} r^{3N_1} \exp[-4\pi N_1 n_1 r^3 / 3] = \frac{N_1}{Q_1},$$

.....

$$p_m = (4\pi n_m)^{N_m} r^{3N_m} \exp[-4\pi N_m n_m r^3 / 3] = \frac{N_m}{Q_m}.$$

Для всего кристалла с числом фрустронов  $0, 1, 2, \dots, m$  имеем:

$$P = \prod_{i=0}^m p_i = \prod_{i=0}^m (4\pi n_i)^{N_i} r^{3N_i} \exp[-4\pi N_i n_i r^3 / 3] = \frac{\prod_{i=0}^m N_i}{\prod_{i=0}^m Q_i}. \quad (10)$$

Система уравнений (9) и (10) представляет собой систему трансцендентных уравнений, решить которую можно только приближенными или численными методами.

В связи с этим, можно сделать численную оценку, основываясь на реальной ситуации и уравнении 1 системы (9):

$$\ln N_0 - \ln Q_0 = N_0 \ln(4\pi n_0) + 2N_0 \ln r - \frac{4\pi}{3} N_0 n_0 r^3. \quad (11)$$

Соответствующая оценка дает, что первый член левой части уравнения (11) и первые два члена правой части – пренебрежимо малы. В результате получим:

$$N_0 = \frac{3h Q_0}{4\pi n_0 r^3}. \quad (12)$$

Учитывая, что  $4\pi r^3/3=V$  и  $\ln n_0 > \ln R$ , из (11) имеем:

$$V_0 = \frac{h n_0}{n_0 N_0}. \quad (13)$$

Беря в качестве функции отклика (см. часть I формула (32)) объем кластера:

$$V_0 = c \frac{kT}{G^0} \cdot N_0. \quad (14)$$

Сравнивая (13) и (14), получим:

$$N_0 = \left( \frac{1}{c} \cdot \frac{\ln n_0}{n_0} \cdot \frac{G^0}{kT} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Формула (15) отвечает равновесному значению числа фрустронов в кластере. Сделаем оценку числа фрустронов в кластере для кристалла KCl:  $G^0 \approx 410$  кДж/моль;  $c \approx 0,001$ ;  $\ln n_0/n_0 \approx 0,02$ ;  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ ,  $T=300$ . Тогда  $N_0 \approx 60$  атомов щелочного металла. Полученное нами значение коррелирует с числом атомов  $N_0$  в кластере при гомогенном образовании кластеров в расплавах различных металлов. В таблице 1 приведены экспериментальные данные из работы [10].

Таблица 1

Параметры кластеров при кристаллизации металлов [10]

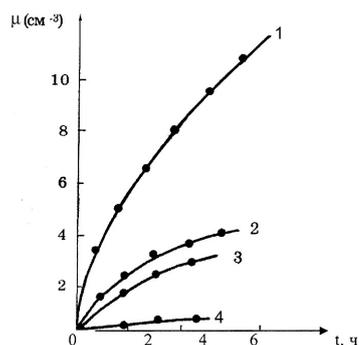
Металл	$T_0, K$	$\Delta T, K$	$r_k, nm$	$N_0$
Ртуть	234	90	0,8	100
Олово	505	180	0,8	130
Висмут	544	200	0,8	30
Свинец	600	170	1,1	180
Германий	1210	295	0,9	130

Из таблицы 1 следует, что радиус  $r_k$  кластера практически не зависит от вида атомов металла, среднее число  $N_0$  частиц в кластере имеет один порядок. Глубокие причины подобных корреляций пока еще не ясны.

Кинетика кластеризации носителей хрупкого разрушения.

Рассмотрим теперь на основе предложенной нами модели кинетику кластеризации носителей хрупкого разрушения. В качестве функции отклика возьмем деформацию  $\mu$  (рис. 2), тогда (см. часть I формула (32)):

$$\mu = a \frac{kT}{G^0} \cdot N \quad (16)$$



1 - NaCl; 2 - KCl; 3 - KBr; 4 - KI.

Рисунок 2. - Кинетика накопления дефектов в ЩГК [11].

Из формулы (16) видно, что при малых деформациях зависимость  $\mu$  действительно описывается линейной функцией от  $N$ . Этот рисунок коррелирует с рисунком 1 кривая 1.

Представим зависимость энергии Гиббса от концентрации фрустонов полиномом второй степени. Это справедливо, поскольку такая же зависимость наблюдается и для температуры. Таким образом:

$$G^0 = A + BN + CN^2. \quad (17)$$

При небольших  $N - A > BN + CN^2$  и из (16) мы имеем линейную зависимость деформации от концентрации  $N$  (область упругой деформации). Когда  $G^0 \approx BN$ , то  $\mu$  не зависит от  $N$  (область пластической деформации). При больших  $N$  энергия Гиббса  $G^0 \approx CN^2$  и, соответственно,  $\mu \sim 1/N$ , т.е. убывают гиперболически (область разрушения). Качественная картина зависимости  $\mu$  от  $N$  показана на рисунке 3.

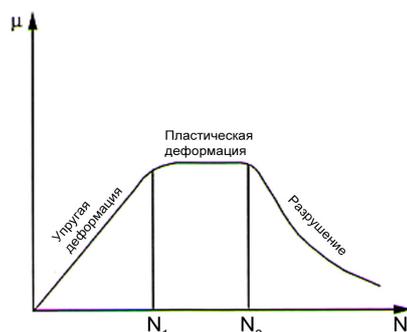


Рисунок 3 - Три стадии деформации твердого тела

Таким образом, полученная нами формула (16) описывает всю область деформированного состояния твердого тела, включая процесс разрушения.

Дезинтеграция упорных руд.

В теории и практики кучного выщелачивания золота существует проблема вскрытия упорных золотосодержащих руд без их переизмельчения и снижения фильтрационных свойств штабеля. Эта проблема может быть решена с использованием естественных или искусственных энергетических воздействий, позволяющих интенсифицировать вскрытие золотосодержащих руд [12].

Многочисленные исследования во многих странах показали [13], что для максимального раскрытия вкрапленных минеральных комплексов благородных металлов, помимо традиционных способов дробления и измельчения, представляется перспективным применение немеханических способов разрушения, обеспечивающих дезинтеграцию минеральных компонентов по межфазным границам за счет образования микротрещин и каналов пробоя в результате энергетических воздействий и, в особенности, в импульсном режиме- так называемых электроимпульсных технологий.

В таблице 2 приведены данные об основных технологических эффектах, областях применения и ограничениях, вторичных эффектах, энергозатратах при различных видах энергетических воздействий на минеральные комплексы и суспензии [14].

Проведенный анализ показал, что большинство из рассмотренных методов обладают одним или рядом следующих недостатков: высокие энергетические затраты и капиталовложения, избыточный нагрев обрабатываемого материала, неконтролируемый переход ионов металла в жидкую фазу вследствие интенсификации процесса выщелачивания сульфидов и некоторые другие.

Таблица 2

Нетрадиционные энергетические методы дезинтеграции минеральных комплексов

Вид воздействия; процессы (операции) переработки; технологический эффект; вид сырья.	Ограничения (побочный эффект)	Расход электроэнергии, кВт·ч/т
Электрохимическая обработка		

Процессы выщелачивания; повышение извлечения Au, Ag на 10-25%; сульфидные руды, содержащие благородные металлы.	Повышенный расход электроэнергии, торможение дезинтеграции за счет образования серы, пассивация электродных систем, необходимость сочетания с химическим воздействием для повышения электропроводности среды.	50-60 (водная среда), 20-30 (щелочная или кислая среда).
Поток ускоренных электронов		
Дезинтеграция минеральных комплексов, повышение производительности цикла измельчения в 1,5-2 раза, извлечения Zn, Cu, Pb при флотации на 5-10%, извлечения Au, Ag при цианировании на 10-25%; сульфидные, железные руды и другие.	Высокие капитальные затраты; технические трудности внедрения в действующие схемы обогащения; повышенный расход электроэнергии; нагрев образца, изменение поверхностных и объемных свойств.	5-10
СВЧ-обработка		
Разупрочнение минеральных комплексов, сокращение времени измельчения на 20-25%; извлечения Au, Ag при цианировании на 10%; золотосодержащие кварц-полевшпатовые руды, пиритные флотоконцентраты, золотомышьяковые гравитационные концентраты, руды, содержащие МПГ.	Сложность реализации в промышленных условиях; нагрев образца, оплавление, возможность обработки только сухих образцов; изменений поверхностных и объемных свойств минералов.	5-7
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ		
Электроимпульсная обработка		
Разрушение вследствие электрического взрыва в объеме материала, повышение степени раскрытия сростков минералов; все виды сырья.	Высокие энергозатраты; ограничения на возможность обработки тонкодисперсного минерального сырья перед цианированием.	Энергия в импульсе 0,5-20 кДж
Электрогидродинамическое воздействие		
Наносекундный пробой воды, содержащей взвешенные минеральные частицы; извлечения Au, Ag при цианировании на 60-70%; Золотосодержащие хвоста переработки медно-цинковых руд.	Неконтролируемое изменение ионного состава жидкой фазы, невозможность обработки сухого или увлажненного (на 10-15%) материала; крупность материала должна быть не менее 90-100% класса - 74 мкм	3-5
Магнитоимпульсная обработка		
Образование трещин; железистые кварциты.	Применим преимущественно для минералов ферромагнетиков	Уменьшение суммарных энергозатрат на 3-5 кВтч/т
Мощные наносекундные электромагнитные импульсы		
Дезинтеграция и вскрытие минеральных комплексов; извлечения Au, Ag при цианировании на 10-80%; МПГ в операциях обогащения при доводке черновых концентратов на 5-6% и на 60-70% при дообогащении хвостов; сульфидные руды кварциты, продукты обогащения, содержащие благородные металлы и МПГ.	Минимальный размер минеральной частицы ~ 100мкм; необходимость защитной экранизации зоны размещения генератора импульсов; влажность материала не должна превышать 30%.	3-4

Проведем теперь анализ дезинтеграции руд на основе нашей модели. Из формулы (32) части I для работы дробления (измельчения) находим:

122

$$A = \frac{C_1 G^0}{kTN} = \frac{C_1 \sigma}{SE_6} \quad (18)$$

Здесь  $\sigma$  – поверхностное натяжение минерала,  $S$  – площадь поверхности частиц минерала,  $E_6$  – энергия носителей разрушения, которую мы будем отождествлять с энергией внешнего поля.

Из формулы (12) части II следует:

$$\sigma = \frac{d_{кр} RT}{2\nu} \quad (19)$$

Здесь  $d_{кр}$  – критический размер минерального зерна, начиная с которого поверхностные свойства «подавляют» объемные,  $\nu$  – молярный объем минерала,  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – температура.

Учитывая (19) формула (18) принимает вид:

$$A = \frac{C_1 RT d_{кр}}{2S\nu E_6} \quad (20)$$

Из формулы (20) вытекает следующий алгоритм технологических операций при определении параметров дезинтеграции руды:

- определяем значение  $d_{кр}$  по методике (см. ниже);
- определяем  $\nu$  по таблице Менделеева, исходя из минерального состава руды или по таблицам, приведенных в [15];
- величина  $S$  определяется экспериментально;
- для двух значений  $E_6$  определяем постоянную  $C_1$ ;
- подставляем значение  $E_6$  из таблицы 2 или из паспортных характеристик источника внешнего поля;
- определяем оптимальное значение работы дробления (измельчения) по формуле (20).

Определение  $d_{кр}$  возможно по одной из разработанных нами методик [16-18]. Здесь мы даем их краткое описание.

Люминесцентный метод определения поверхностного натяжения. Теоретическое обоснование полученных ниже формул приведено нами в работе [18]. Зависимость интенсивности рентгенолюминесценции диэлектрика от размера частиц описывается формулой

$$I = const \cdot \left( 1 - \frac{d_{кр}}{r} \right) \quad (21)$$

где  $I$  – интенсивность рентгенолюминесценции;  $r$  – радиус частицы диэлектрика. Параметр  $d_{кр}$  связан с поверхностным натяжением  $\sigma$  формулой

$$d_{кр} = \frac{2\sigma \vartheta}{RT} \quad (22)$$

где  $\vartheta$  – молярный объем диэлектрика;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура (К), при которой производится измерение. В координатах  $I \sim 1/r$  получается прямая, тангенс угла наклона которой определяет  $d_{кр}$ .

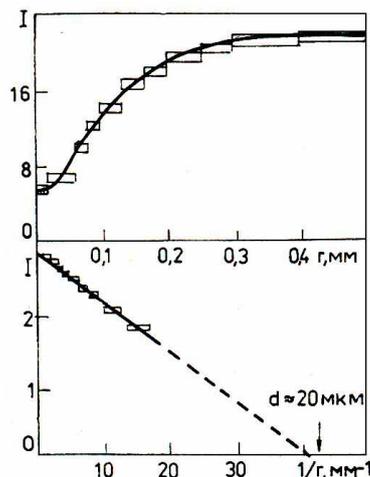


Рисунок 4 - Зависимость интенсивности рентгенолюминесценции KCL-Tl от размера зерна минерала

Пример. Способ применяли для определения поверхностного натяжения диэлектрических кристаллов KCl, с примесью ионов таллия в качестве люминесцирующего зонда. Интенсивность рентгенолюминесценции определялась стандартным фотоэлектрическим методом. Размер зерна диэлектрика определялся с помощью металлографического микроскопа типа МИМ-8. Результаты показаны на рисунке 4. В координатах  $I \sim 1/r$  экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с (21), давая значение  $d = 20$  мкм. Для KCl  $\vartheta = 37,63$  см<sup>3</sup>/моль и из соотношения (22) для поверхностного натяжения получено:  $\sigma = 6,63 \cdot 10^5$  эрг/см<sup>2</sup>.

Способ измерения поверхностного натяжения магнитных материалов. В этом случае по измеренному тангенсу угла наклона зависимости магнитной восприимчивости магнитного материала от обратного радиуса его частиц вычисляется величина его поверхностного натяжения. Зависимость магнитной восприимчивости магнитного материала от размера частиц также описывается формулой (21) и (22).

Построенная зависимость в координатах  $\chi \sim 1/r$  ( $1/r$  - обратный радиус частиц, магнитного материала) получается прямая, тангенс угла наклона, который определяет  $d\chi$ , и по формуле (22) рассчитывается поверхностное натяжение магнитного материала ( $\sigma$ ).

Пример. Способ применяли для определения поверхностного натяжения магнетитов ( $Fe_3O_4$ ) Соколовского и Сарбайского месторождений. Удельная намагниченность измерялась с помощью вибрационного магнитометра. Размер зерна магнетита определялся с помощью металлографического микроскопа. Результаты показаны на рисунке 5. В координатах  $\chi \sim 1/r$  экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с (21), давая значение  $d = 0,36$  мкм. Для магнетита  $\vartheta = 44,5$  см<sup>3</sup>/моль и из соотношения (22) для поверхностного натяжения получено:  $\sigma = 10,07 \cdot 10^3$  эрг/см.

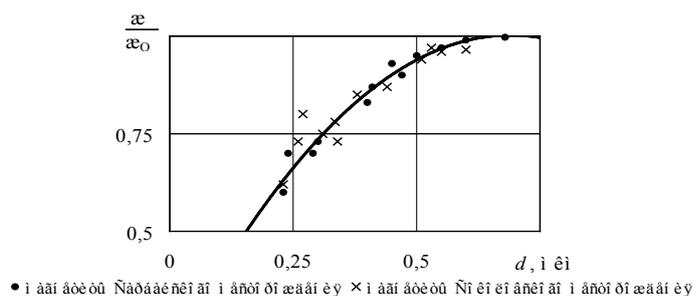


Рисунок 5 – Зависимость относительной магнитной восприимчивости от диаметра зерна магнетита

Таким образом, можно определять  $d_{кр}$  и определять  $A$  по формуле (20) или определять  $\sigma$  и определять  $A$  по формуле (18). Можно использовать и другие физические свойства минералов – удельное электрическое сопротивление, теплопроводность, о чем мы уже говорили в части II нашей работы.

**Заключение.**

В трех частях настоящей работы мы предложили термодинамический подход к проблемам дробления, измельчения, дезинтеграции минералов и руд. Полученные нами формулы содержат экспериментально определяемые параметры, что позволяет оптимизировать процессы рудоподготовки и обогащения.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Горный журнал, 2005, №12. - С. 13-19.
2. Hague K.E, Microwave energy of mineral treatment processes – a brief review // Int. J. Miner. Process, 1999, №57. - P. 146-154.
3. Иванова В.С. Разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 267 с.
4. Олемской А.И., Кацнельсон А.А. Синергетика конденсированной среды. – М.: УРСС, 2003. – 336 с.
5. Петров В.А. // ФТТ, 1983, т.25. - С. 3124-3127.
6. Журков С.Н. // ФТТ, 1983, т.25. – С. 3119-3123.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть I. – М.: Наука, 1995. – 564 с.
8. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. М.: Наука, 1979. – 214 с.
9. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. - 424 с.
10. Скрипов В.П., Коверда В.П. Гомогенное зарождение кристаллов в жидкостях и аморфных слоях. // В кн.: Проблемы кристаллографии: К столетию со дня рождения академика А.В. Шубникова. - М.: Наука, 1987. - С.232-246.
11. Арнс В.Ж. Физико-химическая гетехнология. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 655 с.
12. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д. Неиррадиционные методы дезинтеграции и вскрытия упорных золотосодержащих продуктов: теория и технологические результаты // Горный журнал 2005, №4. - С. 68-74.
13. Бунин И.Ж. Теоретические основы воздействия наносекундных электромагнитных импульсов на процессы дезинтеграции и вскрытия минеральных комплексов и извлечения благородных металлов из руд // Автореф. дисс. доктора тех. наук. – М.: 2009. – 39 с.

14. Буллах А.Г., Буллах К.Г. Физико-химические свойства минералов и компонентов гидротермальных растворов. – Л.: Недра, 1978. - 167 с.

15. Юров В.М., Портнов В.С., Пузеева М.П. Способ измерения поверхностного натяжения твердых тел. Патент РК №57691, Оpubл. 15.12.2008, Бюл. №12.

16. Юров В.М., Портнов В.С., Пузеева М.П. Способ измерения поверхностного натяжения и плотности поверхностных состояний диэлектриков. Патент РК №58155, Оpubл. 15.12.2008, Бюл. №12.

17. Юров В.М., Портнов В.С., Пузеева М.П. Способ измерения поверхностного натяжения магнитных материалов. Патент РК №58158, Оpubл. 15.12.2008, Бюл. №12.

18. Юров В.М. Термодинамика люминесцирующих систем // Вестник КарГУ, сер. Физика, 2005, № 3(39). - С. 13-15.

С.В. Тютрина

УДК 541.18.041

Читинский государственный университет, г. Чита

## ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОРГАНОСИЛИКАТНЫЕ ПРИМЕСИ В СТОЧНЫХ И ОБОРОТНЫХ ВОДАХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИКИ

*Мақалада сулы объектілерге физика-химикалық және диафрагметтік ықпалдарға негізделген ағындық және айналмалы суды тазарту әдістер қарастырылған. Ұсынылған әдістердің комплексті пайдалануы ағындық және өнеркәсіптік суларды кішкене дисперсті фракциялардан және одан басқа табиғаты органикалық ластанулардан тазартады. Ағындықтарды тазарту және зарарсыздандыру жасағаннан кейін толықтауыш эффект туады – бұл бір неше күнге созылатын бактериялы қасиет.*

*The article deals with two methods of waste and pulp factory water purification and disinfection. For purifying an industrial water body from disperse mineral particles ultrasonic vertical waves with polyelectrolyte are suggested to use. Sanitary waste water disinfection and purification are carried out under the influence of diaphragm discharge.*

Проблема очищения сточных и оборотных вод предприятий энергетики является на сегодняшний момент очень актуальной. Существующие различные методы очистки промышленных водных объектов не могут в полном объеме удовлетворить экономическим, экологическим и физико-химическим предъявляемым к ним требованиям.

На кафедре электроснабжения Читинского государственного университета разработали и используют установку с диафрагменным разрядом с медными электродами для очистки сточных вод от органических и неорганических (силикатных) примесей. Параметры установки следующие: входное напряжение 220В, выходное напряжение 1.2-1.8 кВ, ток во вторичной обмотке трансформатора составил 0,1-0,2 А. Обрабатываемые растворы подавались в реактор, где подвергались воздействию диафрагменным разрядом. В качестве объекта исследования были взяты сточные воды Филиала Открытого акционерного общества «Третья генерирующая компания оптового рынка электроэнергетики «Харанорская ГРЭС», загрязненные силикатными ионами, органическими веществами и патогенной микрофлорой. Химический состав объекта исследования приведен в табл.1.

Таблица 1

Химический состав сточных вод Филиала Открытого акционерного общества «Третья генерирующая компания оптового рынка электроэнергетики «Харанорская ГРЭС» за 2009 г.

Показатели состава сточных вод	Концентрация ионов до очистки, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация ионов после очистки, мг/дм <sup>3</sup>	ПДС, мг/дм <sup>3</sup>
pH	8,34	7,95	6,5-8,5
Взвешенные вещества	65,6	12,4	70,4
Ионы аммония	0,5	0,03	6,72
Нитрат-ионы	0,25	0,39	2,11
Нитрит-ионы	0,029	0,01	0,099
Хлорид-ионы	4,6	3,17	13,9
Сульфат-ионы	35,7	27,7	37,75
Фосфат-ионы	1,8	1,09	1,883
Ионы железа	0,498	0,523	0,895
Силикат-ионы	9,4	9,4	10,3
Нефтепродукты	0,11	0,09	0,877
Сухой остаток	177,5	98,2	366,8

По результатам атомно-эмиссионного исследования, проведенного нами, в водных объектах, подвергшихся воздействию диафрагменного разряда, появились ионы и атомы элементов, отсутствующие в необработанной сточной воде. Кроме того, обработанная вода стала обладать эффектом "последствия". Суть данного явления заключается в том, что вода сохраняет бактерицидные свойства длительное время, даже после прекращения воздействия на систему. Для объяснения полученных результатов нами была предложена гипотеза, согласно которой происходит диспергирование ионов металла из электродов в очищаемую воду. Для подтверждения данной гипотезы нами проводилось исследование модельных систем, в которых в качестве загрязняющего реагента использовался хлорид натрия известной концентрации, который растворяли в дистиллированной воде. Данную воду обрабатывали электрическим разрядом 7 минут. Этого времени вполне достаточно, чтобы произошло накопление катионов металлов и атомов неметаллов. Исследование объекта проводили на атомно-эмиссионном спектрофотометре марки ДФС-8-МАЭС и повторно для подтверждения результата, проводили те же исследования на спектрофотометре марки VARIAN. Результаты проведенного исследования показаны в таблице 2.

Таблица 2

Концентрация химических элементов до и после обработки диафрагменным разрядом объектов исследования

Ионы металлов /атомы неметаллов	Концентрация ионов, мг/дм <sup>3</sup> в сточной воде до обработки	Концентрация ионов, мг/дм <sup>3</sup> в модельной системе после обработки	Концентрация ионов, мг/дм <sup>3</sup> в сточной воде после обработки
Серебро	0,039	8,24	9,23
Бор	1,14	—	0,316
Барий	6,05	1,186	7,26
Бериллий	0,46	—	0,123
Висмут	0,097	—	1,37
Кальций	0,025	—	0,097
Железо	0,498	0,511	0,523

Ртуть	0,25	0,64	0,75
Литий	1,52	—	3,94
Марганец	0,069	0,41	0,65
Натрий	3,8	4,27	4,31
Олово	0,053	—	0,024
Свинец	0,021	—	0,003
Цинк	0,51	—	0,44
Медь	0,02	0,81	0,93
Хром	0,027	—	0,014
Алюминий	0,012	—	0,006
Магний	0,38	—	0,36
Технеций	0,002	—	0,027
Германий	0,0015	—	0,019
Фосфор	22,79	58,3	60,7
Мышьяк	0,006	0,015	0,025
Сера	0,049	—	0,012
Селен	0,018	0,02	0,024

Согласно полученным данным, в модельной системе, после воздействия на нее диафрагменным разрядом, появились в достаточно большом количестве различные катионы металлов.

Изучив химический состав самих электродов, мы подтвердили гипотезу, согласно которой при действии высокоимпульсного электрического разряда возможно вымывание ионов металла из электродов. Ранее было замечено, что вода, обработанная диафрагменным разрядом, обладает эффектом обеззараживания (бактерицидные свойства). Объяснение появления бактерицидных свойств можно связать как раз с наличием ионов серебра, меди, фосфора бора, селена и других элементов в обработанной воде. Наличие этих элементов приводит к эффекту последствия, т.е. даже по истечении двух суток вода повторно не заражается микрофлорой.

Увеличение концентрации анионов в обработанной диафрагменным разрядом воде по сравнению с необработанной, приводит к изменению pH среды, приближая показатель к нейтральному значению. Первоначально значение pH сточной воды составляло 8,34, после обработки значение pH составило 7,95. Изменение кислотности водного объекта так же способствует задержке роста микроорганизмов. По предварительным результатам исследования воздействия диафрагменного разряда на сточные воды очистных сооружений, можно сделать некоторые выводы: количество ионов, опасных для здоровья человека, уменьшается; вода сохраняет бактерицидные свойства в течение нескольких дней за счет появления ионов меди, серебра и др., вымываемых из электродов мощным диафрагменным разрядом; наблюдается изменение pH среды на более кислую, что так же способствует сохранению бактерицидных свойств обработанной воды. Из стенок камеры самой установки происходит диспергирование атомов неметаллов (фосфора, серы, селена), которые могут вступать в химические реакции с ионами тяжелых металлов, выводя их из очищаемой воды в осадок. Остается не решенной проблема с удалением ионов кремниевой кислоты из сточных вод «Харанорской ГРЭС». Рассматриваемым методом силикатные примеси не удаляются и необходимо дальнейшее исследование данной проблемы с целью ее решения. Таким образом, использование диафрагменного разряда на органо-силикатные примеси в сточных и оборотных водах, позволит очистить их и от тонкодисперсных глинистых частиц и от загрязнений органической природы и усилит бактерицидное последствие.

**Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов,  
А.Б. Уахитова, Б.М. Бегентаев**

УДК 621.311

*Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова*

## **РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В ШАХТЫ «КАПИТАЛЬНАЯ» АО «МАЙКАИНЗОЛОТО»**

*Осы жұмыста электр қондырғыларының қолдағанда электр қауіпсіздік деңгейі жақсарулары мақсатпен оңашалау кедергілері артуымен және төмендеуге жанасу күштенулері және адамның техникалық шаралары оңделген және негізделген.*

*In work designed and motivated technical action on increasing a resistance to insulation and reducing a voltage of touch and step, is hereunder ensured growing of level electrical safety at usages electrical installation.*

В практике эксплуатации электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В необходимо знать величины параметров изоляции, которые необходимы при разработке технических мероприятий по обеспечению безопасности производства работ в электроустановках при добыче полезных ископаемых подземным способом.

Для реализации указанных выше требований необходимо периодически производить контроль параметров изоляции, так как именно ухудшение изоляции электрической сети чаще всего приводит к поражению рабочего персонала электрическим током, возникновению пожара, повреждению электрооборудования.

При добыче полезных ископаемых подземным способом вопросы безопасности в шахтных электрических сетях напряжением до 1000 В рассматривались относительно параметров изоляции, которые характеризуются количеством подключенного электрооборудования и протяженности кабельных линий. Однако влияние отклонения напряжения на величину тока ОЗЗ в шахтных электрических сетях не рассматривались.

Повышение напряжения приводит к снижению срока службы электрооборудования и увеличению вероятности аварий в электроустановках, так при величине напряжения  $1,1 \cdot U_{ном}$  срок службы ламп накаливания снижается в 4 раза.

Следует особо отметить, что при повышении напряжения на 1 % потребляемая двигателем реактивная мощность увеличивается на  $3 \div 7$  %. Снижается эффективность работы привода и сети.

Поэтому, ГОСТ 13109-97 устанавливает нормально и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на зажимах электроприёмников в пределах соответственно  $\delta U_{унон} = \pm 5\%$  и  $\delta U_{упред} = \pm 10\%$  номинального напряжения сети.

Для регулирования напряжения в шахтной сети напряжением до 1000 В необходимо использовать мощные синхронные электродвигатели вентиляторов. Для этого необходимо использовать тиристорные коммутаторы возбудители синхронных электродвигателей. **Тиристорные коммутаторы** возбудители синхронных электродвигателей обеспечивают оптимального регулирования тока возбуждения для поддержания постоянства  $\cos \phi$ , напряжения на шинах, от которых питается синхронный двигатель.

Для повышения уровня состояния изоляции, и тем самым снижения величины тока однофазного замыкания на землю необходимо произвести исследования отклонения напряжения в питаемой распределительной сети напряжением до 1000 В.

Для разработки мероприятий обеспечения условий электробезопасности в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В в шахтах проведены исследования состояния изоляции.

Исследования состояния изоляции в шахте «Капитальная» АО «Майкаинзолото» производилось на основе разработанного метода определения параметров изоляции в трехфазной симметричной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В, заключающегося в измерении величин модулей линейного напряжения и напряжения фаз А, В, С относительно земли после подключения активной дополнительной проводимости между фазой А электрической сети и землей.

Исследование состояния изоляции в шахте «Капитальная» АО «Майкаинзолото» разработанным методом, основанного на измерении величин модулей напряжений на вторичной обмотке силового шахтного трансформатора, показало, что отклонения напряжения при эксплуатации шахтного электрооборудования находятся в превышении норм качества напряжения согласно ГОСТ 13109-07. Где согласно ГОСТ 13109-97 превышение напряжения на зажимах электроприемников не должно превышать 10 %.

Результаты исследования отклонения напряжения на подстанциях УПП-1 УПП-2 в шахте «Капитальная» АО «Майкаинзолото» приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты исследования отклонения напряжения на подстанции УПП-1 в шахте «Капитальная» АО «Майкаинзолото»

Параметры напряжения	Количество измерений							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Линейное напряжение между фазами В и С – $U_{\check{B}, \check{C}}$ , В	491	498	528	522	525	517	530	521
Напряжение фазы А – $U_{\check{A}}$ , В	284	288	306	302	303	299	307	302
Напряжение фазы В – $U_{\check{B}}$ , В	299	300	295	298	305	304	297	295
Напряжение фазы С – $U_{\check{C}}$ , В	301	297	302	300	295	300	305	302

Таблица 2

Результаты исследования отклонения напряжения на подстанции УПП-2 в шахте “Капитальная” АО “Майкаинзолото”

Параметры напряжения	Количество измерений							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Линейное напряжение между фазами В и С – $U_{\tilde{c}}$ , В	516	520	525	495	521	514	518	497
Напряжение фазы А – $U_{\hat{A}}$ , В	298	300	303	286	301	297	299	287
Напряжение фазы В – $U_{\hat{B}}$ , В	302	299	297	300	295	305	307	301
Напряжение фазы С – $U_{\tilde{N}}$ , В	302	300	303	293	298	301	303	296

Для доказательства достоверности, полученных результатов экспериментальных исследований отклонения напряжения на УПП-1 и УПП-2 в шахте “Капитальная” АО “Майкаинзолото” согласно методу малой выборки, изложенных в [1], необходимо произвести не менее четырех измерений. В данном случае принимаем восемь измерений с интервалом между измерениями 0,5 часа.

По методу малой выборки определяются средние значения и среднеквадратичные отклонения единичного результата при  $n = 8$  измерениях величины исследуемого параметра по следующему алгоритму вычислений [2]:

1. Определяются средние значения отклонения напряжения на УПП-1 и УПП-2 в шахте “Капитальная” АО “Майкаинзолото”

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

- где:
- $\overline{U_{\tilde{c}}} = 516,50$  В – средние значения линейного напряжения на УПП-1;
  - $\overline{U_{\hat{A}}} = 298,88$  В – средние значения напряжения фазы А на УПП-1;
  - $\overline{U_{\hat{B}}} = 299,13$  В – средние значения напряжения фазы В на УПП-1;
  - $\overline{U_{\tilde{N}}} = 300,25$  В – средние значения напряжения фазы С на УПП-1;
  - $\overline{U_{\tilde{c}}} = 513,25$  В – средние значения линейного напряжения на УПП-2;
  - $\overline{U_{\hat{A}}} = 296,38$  В – средние значения напряжения фазы А на УПП-2;
  - $\overline{U_{\hat{B}}} = 300,75$  В – средние значения напряжения фазы В на УПП-2;
  - $\overline{U_{\tilde{N}}} = 299,50$  В – средние значения напряжения фазы С на УПП-2;

2. По математической зависимости определяются среднеквадратичные отклонения единичного результата при  $n = 8$  измерениях величины отклонения напряжения на УПП-1 и УПП-2 в шахте “Капитальная” АО “Майкаинзолото”

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n} - \bar{X}_i^2} \quad (2)$$

где:

$\sigma_{U_{\lambda}} = 13,37, \sigma_{U_{\hat{\lambda}}} = 7,85,$  – среднеквадратичные отклонения напряжения на УПП-1;

$\sigma_{U_{\hat{\lambda}}} = 3,52, \sigma_{U_{\hat{N}}} = 2,90$

$\sigma_{U_{\lambda}} = 10,44, \sigma_{U_{\hat{\lambda}}} = 5,96,$  – среднеквадратичные отклонения напряжения на УПП-2.

$\sigma_{U_{\hat{\lambda}}} = 3,69, \sigma_{U_{\hat{N}}} = 3,35$

Так как в электрической сети напряжением 0,4 кВ 1% отклонения напряжения фаз электрической сети относительно земли составляет 2,2 В, то процент отклонения напряжения в шахтной электрической сети составляет 29 – 40 %.

Исследования отклонения напряжения в сети напряжением до 1000 В шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” показало превышение в 29 – 40 % от нормы, что недопустимо ГОСТ 13109-97 качества напряжения.

Так как установившиеся значение тока однофазного замыкания на землю зависят от величины емкости. Емкость сети не зависит от отклонения напряжения, а зависит только от протяженности шахтных кабельных сетей и количества подключенного электрооборудования в узле нагрузки. На основе вышеизложенного следует, что при принятии среднеквадратичного значения емкости сети за постоянную величину определяется изменение тока однофазного замыкания на землю от величины отклонения напряжения по закону Ома.

Изменения тока однофазного замыкания на землю от величины отклонения напряжения по закону Ома для УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” приведены на рисунках 1 и 2.

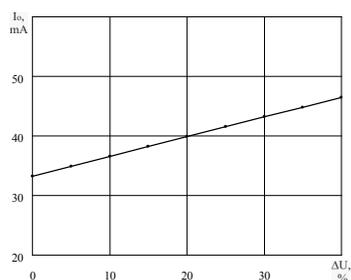


Рисунок 1 – Изменение тока однофазного замыкания на землю от величины отклонения напряжения для УПП-1 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото”

Анализ графических иллюстраций изменения тока однофазного замыкания на землю от величины отклонения напряжения по закону Ома для УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” показало, что если поддерживать автоматически напряжение в питаемой сети в норме в соответствии с ГОСТ 13109-97 по качеству напряжения, то при этом обеспечивается рост безопасности производства работ в шахтных электрических сетях напряжением до 1000 В.

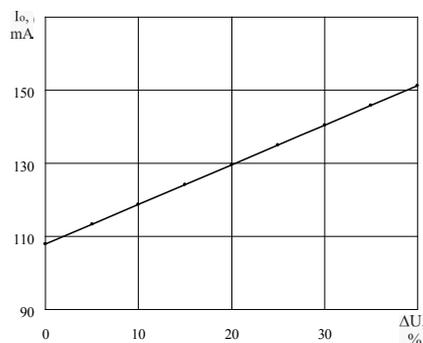


Рисунок 2 – Изменение тока однофазного замыкания на землю от величины отклонения напряжения для УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото”

Установленные графически зависимости изменения тока однофазного замыкания на землю от величины отклонения напряжения для участковых подстанций УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” показали, что если поддерживать напряжение в шахтной сети напряжением до 1000 В в соответствии с ГОСТ 13109-97 качества напряжения, то величина тока ОЗЗ на участковой подстанции УПП-1 уменьшится на 10 мА и составит 30 мА, а на участковой подстанции УПП-2 уменьшится на 50 мА и соответственно составит 100 мА.

Уменьшение тока ОЗЗ в сети напряжением до 1000 В на участковых подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” приводит к увеличению сопротивления изоляции, снижению напряжения прикосновения и шага, тем самым обеспечивается рост уровня электробезопасности при эксплуатации шахтных низковольтных электроустановок.

Для регулирования напряжения в сети 0,4 кВ на участковых подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” необходимо использовать цифровой регулятор возбуждения синхронных электродвигателей АНИКРОН™ Б-04 (ЦРВД).

Цифровые регуляторы АНИКРОН™ Б-04 (ЦРВД-Б серии 04) предназначены для регулирования тока возбуждения синхронных электродвигателей, снабженных системой возбуждения типа БВУ, при прямом и реакторном пуске, синхронной и аварийной работе.

Техническая характеристика: регулятор возбуждения АНИКРОН™ модели Б-04 обеспечивает:

- автоматическую подачу возбуждения по току статора с кратковременным увеличением тока возбуждения для гарантированной синхронизации двигателя;
- прямой или реакторный пуск двигателя;
- форсировку по току возбуждения в течение 10...50 с. при выходе статорного напряжения за пределы уставок и снятие форсировки при восстановлении напряжения;

- автоматическое регулирование тока возбуждения синхронного двигателя по выбранному закону (пять основных алгоритмов и четыре - для нештатных режимов);
- поддержание заданного значения  $\cos \phi$  двигателя;
- защиту СД от асинхронного хода, защиту ротора от длительной перегрузки, защиту от КЗ в роторе, защиту от потери возбуждения, защиту от затянувшегося пуска, защиту от нерасчетных режимов, защиту от низкого тока статора и защиту от низкого напряжения статора;
- возможность самозапуска и ресинхронизации двигателя;
- ручной режим регулирования и режим опробования;
- при отказе основного регулятора возбуждения - автоматический переход на резервный регулятор и обратно с заданным током возбуждения;
- осциллографирование (более 500 осциллограмм) всех процессов работы двигателя и ведение протокола событий, что позволяет проводить диагностику и отслеживать статистику работы двигателя на цветном дисплее регулятора или скопировав на персональный компьютер;
- наглядное отображение параметров работы двигателя, состояния защит в аналоговом, цифровом и текстовом виде на ЖКИ дисплее;
- безотказную работу в широком диапазоне питающих напряжений (+ 20%) от постоянного или переменного (могут присутствовать одновременно) напряжения 220В;
- работу в составе автоматизированной системы АСУ ТП;
- основной и резервный регулятор имеют собственные датчики токов и напряжений, все основные блоки регулятора резервированы; при неисправностях автоматически подключается резервный блок.

Регулятор имеет следующие технические особенности:

- регулятор может работать либо только на один двигатель, либо на один из двух двигателей по выбору;
- основное и/или резервное напряжение питания может быть  $\sim 220$  В и/или  $=220$  В;
- основной и резервный регулятор имеют собственные датчики токов и напряжений, все основные блоки регулятора резервированы; при неисправностях автоматически подключается резервный блок;
- регулятор имеет блок готовности к пуску, который контролирует наличие всех питающих напряжений, а также исправность основного и резервного регуляторов и предотвращает включение двигателя на неподготовленный или неисправный регулятор возбуждения.

Разработка, производство, монтаж, наладка и техническое сопровождение цифровых регуляторов возбуждения АНИКРОН (ЦРВД) для синхронных электродвигателей. АНИКРОН (ЦРВД) устанавливаются на новые двигатели и идут на замену морально устаревших регуляторов типа ШДЭ, РВСД и тиристорных возбудителей типа ТЕ, ТВ, ВТЕ и др.

Цифровой регулятор возбуждения синхронных электродвигателей АНИКРОН™ Б-04 автоматически поддерживает уровень напряжения в узле нагрузки и тем самым обеспечивает рост уровня электробезопасности при эксплуатации шахтных электрических сетей напряжением до 1000 В.

При снижении величины тока ОЗЗ на 50 мА на УПП-2 ток ОЗЗ составит 100 мА. Защиту людей от поражения электрическим током в шахтной сети с током замыкания 100 мА необходимо производить с УЗО АСУР-3. А использование УЗО типа УАКИ-380 нецелесообразно. Поскольку УЗО типа УАКИ-380 не производят компенсацию емкост-

тного тока в шахтной сети. В связи с этим целесообразно на участковой подстанции УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” произвести замену УЗО типа УАКИ-380 на УЗО типа АСУР-3. УЗО типа АСУР-3 обеспечивает защиту людей от поражения электрическим током и компенсацию тока ОЗЗ, и тем самым обеспечивает рост уровня электробезопасности при эксплуатации шахтной электрической сети на участковой подстанции УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото”.

Вывод: в работе разработано и обосновано техническое мероприятие по снижению величины тока ОЗЗ на основе автоматического регулирования напряжения в узле нагрузки путем использования синхронных двигателей вентиляции шахты, что приводит к увеличению сопротивления изоляции и снижению напряжения прикосновения и шага, и тем самым обеспечивается рост уровня электробезопасности при эксплуатации шахтных низковольтных электроустановок.

Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов,  
А.Б. Уахитова, Б.М. Бегентаев

УДК 621.311

*Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова*

## **ЧИСЛОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ И ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000В ШАХТЫ «КАПИТАЛЬНАЯ» АО «МАЙКАИНЗОЛОТО»**

*Осы жұмыста АҚ “Майкаинзолото”, “Күрделі” шахтада тәжірибелік жолмен алынған кернеуі 1000 В дейін бейтарабы оқшауланған тарапта негізгі параметрлерінің мағыналары көрсітілген. Кернеуі 1000 В дейін электр қондырғыларының қолдағанда электр қауіпсіздік деңгейінің жақсарулары мақсатпен қосалқы станцияларда жерге бір фазалы тұйықталу тогы төмендеуімен шаралар өңдеу ұсынылған.*

*In work presented values of main parameters of insulating the electrical networks with insulated neutral by the voltage before 1000 V, tinned by the experimental way on the mine “Capital” SC “Майкаинзолото”. Offered to develop actions on reducing a current of single-phase closing to the land on substations for the reason perfecting a level electrical safety at usages electrical installation voltage before 1000 V.*

Повышение потребления электрической энергии приводит вместе с тем к росту протяженности электрических сетей, что увеличивает вероятность появления однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), которые снижают условия электробезопасности в шахтных электрических сетях напряжением до 1000 В. Действия релейной защиты и автоматики позволяют обеспечить безопасность эксплуатации шахтных электроустановок лишь в том случае, если поддерживается высокий уровень изоляции. Одним из способов обеспечения является периодический контроль параметров изоляции фаз электрической сети относительно земли.

В связи с этим возникают задачи дальнейшего совершенствования средств контроля параметров изоляции электрических сетей в сочетании с выполнением профилактических мероприятий и периодических измерений в различных режимах эксплуатации. Причем методы определения параметров изоляции фаз электрических сетей относительно земли не должны влиять на режим работы системы электроснабжения, а расчет параметров изоляции должен содержать минимум вычислений.

Для обеспечения электробезопасности эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В необходимо определить числовые значения параметров изоляции. На шахте “Капитальная” АО “Майкаинзолото” проведены экспериментальные исследования с целью

установления действительных значений основных параметров изоляции электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В. Исследования проводились на участковых понизительных подстанциях УПП №1 и УПП №2 по разработанной методике измерения емкости электрической сети и методике определения параметров изоляции в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В в нормальных условиях эксплуатации электроприемников шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото”.

Экспериментальные исследования на участковых понизительных подстанциях УПП №1 и УПП №2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” установили числовые значения полной, активной и емкостной проводимостей изоляции фаз электрической сети напряжением до 1000 В, а также емкости фаз электрической сети относительно земли, которые обработаны методом малой выборки. Полученные результаты параметров изоляции фаз электрической сети относительно земли обработанные методом малой выборки приведены в таблице 1 и таблице 2, а таблице 3 представлены средние значения параметров изоляции фаз электрической сети относительно земли напряжением до 1000 В.

Полученные результаты экспериментальных исследований на участковых понизительных подстанциях УПП №1 и УПП №2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” выразим через сопротивления, а также определим ток однофазного замыкания на землю по закону Ома.

Таблица 1

Результаты измерения емкости и определения параметров изоляции фаз электрической сети относительно земли в сети напряжением 0,4 кВ на подстанции УПП-1

Параметры изоляции	Количество измерений							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Емкость изоляции сети $C$ , мкФ.	0,315	0,302	0,264	0,292	0,289	0,280	0,305	0,261
Полная проводимость изоляции сети $Y$ $\times 10^{-3}$ , См.	0,146	0,149	0,150	0,152	0,152	0,151	0,151	0,157
Емкостная проводимость изоляции сети $b$ $\times 10^{-3}$ , См.	0,099	0,095	0,083	0,092	0,091	0,088	0,096	0,082
Активная проводимость изоляции сети $g$ $\times 10^{-3}$ , См.	0,107	0,115	0,125	0,121	0,122	0,123	0,117	0,134

Таблица 2

Результаты измерения емкости и определения параметров изоляции фаз электрической сети относительно земли в сети напряжением 0,4 кВ на подстанции УПП-2

Параметры изоляции	Количество измерений							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Емкость изоляции сети $C$ , мкФ.	1,544	1,487	1,480	1,496	1,535	1,528	1,554	1,563
Полная проводимость изоляции сети $Y$ $\times 10^{-3}$ , См.	0,492	0,478	0,479	0,488	0,491	0,490	0,502	0,510
Емкостная проводимость изоляции сети $b$ $\times 10^{-3}$ , См.	0,485	0,467	0,465	0,470	0,482	0,480	0,488	0,491
Активная проводимость изоляции сети $g$ $\times 10^{-3}$ , См.	0,083	0,102	0,115	0,131	0,094	0,098	0,118	0,138

Таблица 3

Среднее значение параметров сети параметров изоляции фаз электрической сети относительно земли в сети напряжением 0,4 кВ на подстанциях УПП-1 и УПП-2

Наименование объекта	Емкость изоляции сети $C$ , мкФ.	Полная проводимость изоляции сети $Y$ $\times 10^{-3}$ , См.	Емкостная проводимость изоляции сети $b$ $\times 10^{-3}$ , См.	Активная проводимость изоляции сети $g$ $\times 10^{-3}$ , См.
Подстанция УПП-1	0,38	0,151	0,091	0,121
Подстанция УПП-2	1,52	0,491	0,479	0,109

Результаты расчетов экспериментального исследования емкости и сопротивлений изоляции фаз электрической сети относительно земли, а также тока однофазного замыкания на землю на участковых понизительных подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” приведены в таблице 4.

Таблица 4

Числовые значения емкости и сопротивлений изоляции фаз электрической сети относительно земли, а также тока однофазного замыкания на землю на участковых понизительных подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото”

Результаты исследования	Наименование объекта	
	Подстанция УПП-1	Подстанция УПП-2
Емкость изоляции сети – $C$ , мкФ	$\frac{0,38}{0,34 \div 0,42}$	$\frac{1,52}{1,48 \div 1,56}$
Полное сопротивление изоляции сети – $Z$ , Ом	$\frac{6622,5}{6369,4 \div 6849,3}$	$\frac{2036,7}{1960,8 \div 2092,1}$
Активное сопротивление изоляции сети – $R$ , Ом	$\frac{10989,0}{10101,0 \div 12195,1}$	$\frac{9174,3}{7246,4 \div 12048,2}$
Емкостное сопротивление изоляции сети – $\tilde{O}$ , Ом	$\frac{8264,5}{7462,7 \div 9345,8}$	$\frac{2087,7}{2036,7 \div 2150,5}$
Ток однофазного замыкания на землю – $I_0$ , мА	$\frac{36,2}{35,0 \div 37,7}$	$\frac{117,8}{114,7 \div 122,4}$

В таблице 4 числителем представлены результаты расчетов математических ожиданий абсолютных величин емкости, полного, активного и емкостного сопротивлений изоляции фаз электрической сети относительно земли, а также тока однофазного замыкания на землю, а в знаменателе – диапазоны изменения этих же параметров при нормальной работе электроприемников на участковых понизительных подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото”.

Исследование показали, что параметры изоляции в сети напряжением до 1000 В на участковых понизительных подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” имеют незначительный разброс, что характеризует незначительные изменения параметров сети в зависимости от технологии производства добычи полезного ископаемого.

На участковых понизительных подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото” установлены устройства УЗО типа УАКИ-380. Где ток уставки срабатывания  $I_{cr} = 24$  мА. Ток ОЗЗ в шахтной сети значительно превышает ток уставки УЗО.

Поэтому требуется разработать мероприятия по снижению тока ОЗЗ на участковых понизительных подстанциях УПП-1 и УПП-2 шахты “Капитальная” АО “Майкаинзолото”. В шахтных сетях, если ток превышает 50 мА, необходимо использовать УЗО с компенсацией тока ОЗЗ.

Исследования показали, что необходимо разработать технические мероприятия по повышению уровня изоляции, что приведет к снижению величины тока однофазного замыкания на землю.

Исследования состояния изоляции, тока однофазного замыкания на землю и системы электроснабжения на вторичной обмотке шахтных трансформаторов показало, что выбор устройств защитного отключения в шахтных сетях не дифференцирован по току однофазного замыкания на землю. Так как в шахтных сетях напряжением до 1000 В токи однофазного замыкания на землю имеют разные установившиеся значения и соответственно необходимо произвести выбор устройств защитного отключения по величине тока однофазного замыкания.

## НАШИ АВТОРЫ

**Бегентаев Багустар Мухаметрахимович** - соискатель кафедры электроэнергетики, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Богомоллов Алексей Витальевич** - к.т.н., доцент кафедры металлургии, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Брейдо Иосиф Вульфович** - д.т.н., профессор, академик МАИИ, член-корр. АЕН РК, зав. кафедрой автоматизации производственных процессов, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Быков Петр Олегович** - магистр, ст. преподаватель, кафедра металлургии, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Дайч Леонид Израилевич** - ст. преподаватель, кафедра автоматизации производственных процессов, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Ельмуратов Сембай Кайкенович** - д.т.н., профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Жайлаубаев Далел Тлеугазинович** - д.т.н., профессор, Семипалатинский государственный университет им. Шакарима, г. Семипалатинск.

**Жакупов Талгат Мухамедхасанович** - ст. преподаватель, кафедра теплоэнергетики, Екибастузский инженерно-технический институт им. ак. К.И. Сатпаева, г. Екибастуз.

**Жаутиков Бахыт Ахатович** - д.т.н., профессор, декан факультета энергетики, связи и автоматизации, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Ибраев Иршек Кажикаримович** - д.т.н., профессор кафедры металлургии, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Ибраева Оразбике Токтархановна** - доцент, кафедра металлургии, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Исенов Султанбек Сансызбаевич** - к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Калинин Алексей Анатольевич** - ст. преподаватель, кафедра автоматизации производственных процессов, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Камзин Жумабек Жукенович** - к.т.н., профессор кафедры механики и нефтегазового дела, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, АО «Казахстанский электролизный завод», г. Павлодар.

**Карасев Николай Иванович** - к.т.н., профессор, кафедра автоматизации производственных процессов, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Касенов Амиржан Леонидович** - д.т.н., зам.декана инженерно-технологического факультета, Семипалатинский государственный университет им. Шакарима, г. Семипалатинск.

**Козионов Валерий Александрович** - к.т.н., академический профессор, кафедра транспортного строительства и профессионального обучения, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Койбагаров Самат Хариевич** - к.т.н., Семипалатинский государственный университет им. Шакарима г. Семипалатинск.

**Копырин Владимир Сергеевич** - к.т.н., профессор, директор Научно-производственного предприятия «Энергоэкология», г. Екатеринбург, Россия.

**Кудерин Марат Крыкбаевич** - д.т.н., профессор, декан архитектурно-строитель-

ного факультета, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Маусымбаева А.Д.** - Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Нуркин Бахтияр Айтпаевич** - магистр, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Пак Рева Васильевич** - д.т.н. РФ, гл. инженер, АО «Казахстанский электролизный завод», Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова, г. Павлодар.

**Петуров Валерий Иванович** - к.т.н., доцент, Читинский государственный университет, г. Чита, Россия.

**Портнов В.С.** - Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Рындин Владимир Витальевич** – к.т.н., профессор кафедры механики и нефтегазового дела, Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова, г. Павлодар.

**Сержанов Радул Идаятович** - к.т.н., профессор кафедры металлургии, Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова, г. Павлодар.

**Суюндиков Мерхат Мадениевич** - к.т.н., профессор, Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова, г. Павлодар.

**Тарасова Оксана Владимировна** - магистр, инженер ТОО НПФ «Севказэнергоремонт», г. Павлодар.

**Таткеева Галина Галимзяновна** - к.т.н., доцент, зав.кафедрой энергетики, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Токаев Серик Дюсенгалиевич** - к.т.н., кафедра технологии машиностроения и механики, инженерно-технологический факультет, Семипалатинский государственный университет им. Шакарима, г. Семипалатинск.

**Турсунбаева А.К.** - Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда.

**Тютрина Светлана Владленовна** - сотрудник государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования, Читинский государственный университет, г. Чита, Россия.

**Уахитова Айгуль Ботановна** – к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Утегулов Арман Болатбекович** - к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Утегулов Болатбек Бахитжанович** – д.т.н, профессор кафедры электроэнергетики, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар.

**Юров Виктор Михайлович** - к. физ.-мат. н., доцент, Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова, г.Караганда.

**Ющенко Олеся Александровна** – преподаватель, аспирант, кафедра электроэнергетики и автоматизации технических систем, Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В журнал принимаются рукописи статей по всем направлениям естественных и технических наук в двух экземплярах, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полуторным межстрочным интервалом, с полями 3 см со всех сторон листа, и дискета со всеми материалами в текстовом редакторе “Word 7,0 ('97, 2000) для Windows” (кегель – 12 пунктов, гарнитура – Times New Roman/KZ Times New Roman).

2. Статья подписывается всеми авторами. Общий объем рукописи, включая аннотацию, литературу, таблицы и рисунки, не должен превышать 8–10 страниц.

3. Статья должна сопровождаться рецензией доктора или кандидата наук для авторов, не имеющих ученой степени.

4. Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– УДК по таблицам универсальной десятичной классификации;

– название статьи: кегель – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman Cyr (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка), заглавные, жирные, абзац центrovанный;

– инициалы и фамилия(-и) автора(-ов), полное название учреждения: кегель – 12 пунктов, гарнитура – Arial (для русского,

английского и немецкого языков), KZ Arial (для казахского языка), абзац центrovанный;

– аннотация на казахском, русском и английском языках: кегель – 10 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка), курсив, отступ слева-справа – 1 см, одинарный межстрочный интервал;

– текст статьи: кегель – 12 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка), полуторный межстрочный интервал;

– список использованной литературы (ссылки и примечания в рукописи обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). Список литературы должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.1-84.– например:

### ЛИТЕРАТУРА

1. Автор. Название статьи //Название журнала. Год издания. Том (например, Т.26.)– номер (например, № 3.)– страница (например, С. 34. или С.15-24.)

2. Андреева С.А. Название книги. Место издания (например, М.:) Издательство (например, Наука), год издания. Общее число страниц в книге (например, 239

с.) или конкретная страница (например, С. 67.).

3. Петров И.И. Название диссертации: дисс. канд. биолог. наук. М.: Название института, год. Число страниц.

4. C.Christopoulos, The transmission-Line Modelling (TML) Method, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.

На отдельной странице (в бумажном и электронном варианте) приводятся сведения об авторе:

– Ф.И.О. полностью, ученая степень и ученое звание, место работы (для публикации в разделе «Наши авторы»);

– полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, E-mail (для связи редакции с авторами, не публикуются);

– название статьи и фамилия(-и) автора(-ов) на казахском, русском и английском языках (для «Содержания»).

4. Иллюстрации. Перечень рисунков и подрисуночные надписи к ним предоставляют отдельно и в общий текст статьи не включают. На обратной стороне каждого рисунка следует указать его номер, название рисунка, фамилию автора, название статьи. На дискете рисунки и иллюстрации в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi (файлы с названием «Рис1», «Рис2», «Рис3» и т.д.).

5. Математические формулы должны быть набраны как Microsoft Equation (каждая формула – один объект). Нумеровать следует лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

6. Автор просматривает и визирует гранки статьи и несет ответственность за содержание статьи.

7. Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи. Рукописи и дискеты не возвращаются. Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

8. Рукопись и дискету с материалами следует направлять по адресу:

140008, Республика Казахстан, г.Павлодар, ул. Ломова 64,

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,

«Научный издательский центр ПГУ».

Тел. 8 (718-2) 67-36-69, (внутр. 147; 183)

факс: 8 (718-2) 67-37-02.

E-mail: [publish@psu.kz](mailto:publish@psu.kz)

Басуға 01.06.2010 ж. қол қойылды.  
Форматы 297\*420/2. Кітап-журнал қағазы.  
Көлемі шартты 5,32 б.т. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.  
Компьютерде беттеген З.Ж. Шоқубаева  
Корректорлар: Б.Б. Әубәкірова, Б.В. Нұрғожина  
Тапсырыс № 1437

«КЕРЕКУ» баспасы  
С. Торайғыров атындағы  
Павлодар мемлекеттік университеті  
140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, каб. 137  
67-36-69  
E-mail: [publish@psu.kz](mailto:publish@psu.kz)