

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 4 (2023)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

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

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

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

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/PWGH3542>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,210

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., асоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Vaigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

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

© Торайгыров университет

МРНТИ 53.03.05

<https://doi.org/10.48081/OWQK4194>***Л. А. Бекбаева¹, А. М., Макашева²**^{1,2}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.*e-mail: lyazzat.bekbayeva@mail.ru**НАТРИЙ ХЛОРИДІНІҢ ДИНАМИКАЛЫҚ
ТҰТҚЫРЛЫҒЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАҒА
ТӘУЕЛДІЛІГІНІҢ КЛАСТЕРЛІ-АССОЦИАТТЫҚ МОДЕЛІ**

Мақалада авторлар күрделі бейорганикалық зат – натрий хлориді тұтқырлығының температураға тәуелділігін алды және ұсынылған математикалық модельді тексерді.

Тұтқырлық сұйықтықтың қозғалыста және тыныштықта болатын хаосқа сезімтал қасиеті ретінде қарастырылады. Тұтқырлықтың математикалық моделі Больцманның таралуы мен ретсіз қозғалатын бөліктер тұжырымдамасын қолдану арқылы жасалды. Осы негізде тұтқырлықтың иерархиялық кластерлі-ассоциаттық моделі құрылды, ол тек бастапқы кластерлердің түзілуін ғана емес, сонымен қатар кластерлердің ассоциациялану дәрежесін анықтау мүмкіндігімен оларға қатысы бойынша екінші ретті ассоциаттарды да ескереді.

Кластерлі-ассоциаттық модельді эксперименттік деректерге бейімдеу үшін модельдің белгісіз параметрлерін анықтау үшін деректерді өңдеудің белгілі бір әдістері жасалды. Тұтқырлық бойынша деректерді өңдеу әдісі барлық жиынтық ішінен тек үш негізгі нүктелерді қолдана отырып, ассоциаттардың агрегация дәрежесі көрсеткішін анықтауға мүмкіндік береді.

Натрий хлоридінің тұтқырлығы бойынша деректерді өңдеу кезінде анықтамалық шамалармен есептелген шамаларды салыстырғанда корреляцияның жоғары коэффициенті анықталды, бұл жаңа тәуелділіктің адекваттылығын, барабарлығын көрсетеді. Берілген модель натрий хлориді тұтқырлығының әрекетін әлдеқайда жоғары температуралар аймағында болжауға мүмкіндік береді. Тұтастай тұтқырлыққа және ассоциаттардың бұзылу динамикасына сәйкес, температураның жоғарылауымен кластерлердің ассоциация дәрежесі төмендейді.

Кілтті сөздер: Больцманның таралуы, динамикалық тұтқырлық, хаотикалық бөліктер, ассоциат, кластер, натрий хлориді.

Кіріспе

Сұйық металдардың [1] тұтқырлығы үшін арналған өрнектеу сұйықтық теориясына негізделген теориялық модельді қолдану арқылы алынды. Теңдеу

будың таралу функциясы және уақыт бойынша орташаланған атомаралық жиілік сияқты фундаменталды физикалық параметрлер тұрғысынан өрнектеледі. Теңдеу тұтқырлық бойынша эксперименттік деректерді сәтті шығарады.

Құю кезінде тұтқырлық металдардың маңызды реологиялық қасиеті болып табылады [2], өйткені ол сұйық металдардың тасымалдану жылдамдығын реттейді, бұл құйма ақауларына әкелуі мүмкін, мысалы, қыздыру кезінде жыртылу және кеуектілік. Бұл мақалада бүгінгі күнге дейін жарияланған сұйық және жартылай қатты күйдегі металдардың тұтқырлығын өлшеу әдістері мен сандық модельдеріне шолу берілген. Эксперименттік өлшемдердің көпшілігі айналмалы және тербелмелі вискозиметрлер арқылы жүзеге асырылды, бұл әсіресе тұтқырлықтың төмен мәндерінде артықшылықтар береді. Тұтқырлықты өлшеудің осы екі дәстүрлі әдісінен басқа, бірнеше зерттеулер жартылай қатты күйдегі қорытпаларды изотермиялық қысу әдісін, тіпті шлактардың тұтқырлығының оптикалық негізділігін анықтау әдісін де еңгізді. Сандық модельдерге келетін болсақ, жарияланған нәтижелердің көпшілігі сұйық және жартылай қатты металдардың тұтқырлығын Аррениус, Андраде, Каптай немесе Будаи-Бемка-Каптай теңдеулерімен сипаттауға болатындығын көрсетеді. Сонымен қатар, күш моделі және кернеу-деформацияның изотермиялық моделі сияқты бірнеше балама модельдер бар.

Тұтқырлық - аққыш сұйық металдың сипаттамаларын анықтай алатын және ликвидус құрылымын көрсететін маңызды [3] қасиет. Сондықтан тұтқырлықтың эксперименттік мәнін калибрлеу үшін нақты модельдің болуы қажет. Қазіргі уақытта таза сұйық металдың тұтқырлығын, тұтқырлықтың температураға тәуелділігін және көп компонентті қорытпа жүйелерінің тұтқырлығын бағалау үшін көптеген модельдер ұсынылған. Бұл мақалада бірқатар танымал модельдер келтірілген, сонымен қатар олардың фундаменталды, іргелі модельдеу теориясы, модель сипаттамалары және қолданылуы жеткілікті түрде талқыланады. Таза сұйық металдың тұтқырлығын болжауда өте сәтті болған жалпы жартылай эмпирикалық модельдер екі тармаққа бөлінеді: Andrade және Eyring. Балқыманың тұтқырлығын болжаудың жалпы көп өлшемді модельдері негізінен термодинамикалық параметрлерді біріктіретін және жақсы сенімділікті қамтамасыз ететін негізгі молекулалық теория әдісіне негізделген. Финалда фазалық диаграммадағы тұтқырлықты болжаудың сәйкес моделі болашақта болжаудың тәуелсіз жалпы теңдеуін алмастыру ықтималдығы жоғары деп күтілуде.

Тұтқырлық және электр өткізгіштік [4] сұйық металдар мен қорытпалардың құрылымдық сезімтал тасымалдау қасиеттері ретінде балқу және катаю процестерін модельдеу үшін маңызды. Тұтқырлық пен электр өткізгіштік деректері қоспалардың сұйық күйдегі құрылымдық өзгерістерді түсіну үшін пайдалы сұйық металл матрицасының құрылымы мен физика-химиялық қасиеттеріне әсері туралы қосымша ақпарат береді. Бұл жұмыста Sn-3,8 Ag-0,7 Cu сұйық қорытпасының тұтқырлығы мен электр өткізгіштігіне шамалы Co қоспаларының әсері зерттелді. Co шамалы қосындылары кезінде тұтқырлықтың жоғарылауы термодинамикалық тәсілдер арқылы алынған болжамды модельдік деректерге қанағаттанарлық

түрде сәйкес келеді және атомаралық өзара әрекеттесудің айтарлықтай әсерін болжайды. Кобальт қоспалары электр өткізгіштікке айтарлықтай әсер етеді, ол Co мөлшерінің жоғарылауымен біртіндеп төмендейді. Сонымен қатар, үлгінің микроқұрылымы рентген құрылымдық талдау және сканерлеуші электронды микроскопия арқылы зерттелді. Құрамында Co 1 мас. % асатын қорытпаларда Sn негізінде Co-Sn интерметалл қосылыстарының түзілуі анықталды.

Құю үрдістерін модельдеу [5] математикалық модельдерге дұрыс берілуі үшін тандалған қорытпалардың термофизикалық қасиеттері туралы нақты ақпаратты қажет етеді. Осындай қасиеттердің бірі-таза сұйық металдар мен қорытпалардың тұтқырлығы, оны әдебиетте эксперименттік деректер ретінде табуға немесе теориялық модельдер арқылы есептеуге болады. Дегенмен, кейбір таза металдар үшін эксперименттік деректер мен модельдеу нәтижелері арасында айтарлықтай алшақтық жиі кездеседі, бұл эксперименттік өлшенген мәндерден екі есе көп. Әдебиеттерде бірнеше модельдерді табуға болады, мысалы, Аррениус типті теңдеулер түрінде, олар көрінетін активтену энергиясын және экспоненциалды тұрақты параметрлерді анықтау мақсатымен тәжірибиелік деректердің қолжетімділігіне тәуелді. Сонымен қатар, Андраде теңдеуіне және оның кеңеюіне негізделген модельдер айқын активтену энергиясымен және еркін көлем концепциясымен жұмыс істеу үшін әдетте тек термодинамикалық мәліметтерге, яғни молярлық массаға, молярлық көлемге, тұтқыр ток активтенуінің Гиббс энергиясына, Гиббс энергиясына және қорытпа компоненттерінің түзілу энтальпиясына және молярлық үлестеріне тәуелді. Аррениус типті теңдеумен, таза металдарға арналған Каптай және Такахира модельдерімен, сондай-ақ Аррениус типті теңдеумен, Каптай моделімен және көп компонентті қорытпаларға арналған осы тәсілмен ұсынылған модельдер арасында салыстырулар жасалды. Модельдеу нәтижелері таза сұйық металдарға (Al, Cu, Si және Mg) және Al негізіндегі үштік және төрттік коммерциялық қорытпаларға арналған әдебиеттерден алынған тәжірибелік тұтқырлық деректерімен салыстырылады. Көп компонентті қорытпаларға арналған ұсынылған тәсіл эксперименттік таралулармен және қарастырылған барлық жағдайларға арналған Каптай моделімен жақсы сәйкес келетіні көрсетілген.

Жартылай қатты металдарды өңдеу (SSMP) [6] құю технологиясында ақаулары аз жоғары сапалы өнімді өндірудің тамаша әдісі болып табылады. Тұтқырлық-SSMP өтімділігін сипаттау үшін ең маңызды физикалық және химиялық қасиет. Қазіргі уақытта жартылай қатты металдардың тұтқырлығын бағалаудың бірнеше теориялық және эксперименттік тәсілдері бар. Авторлар бұл мақалада SSMP үшін бір нүктелі және көп нүктелі вискозиметрияны жан-жақты қарастырды. Содан кейін SSMP-де қолдану үшін әртүрлі вискозиметрлердің сипаттамалары, ұқсастықтары мен шектеулері салыстырылды. SSMP тұтқырлығына әсер ететін факторлардың әсері де атап өтілді. Дендритті емес сфералық микроқұрылымның маңыздылығы және SSMP кезінде қатты бөлшектердің шашырауынан туындаған тұтқырлықтың лезде төмендеуі түсіндірілді. Зерттеу зерттеушіге SSMP кезінде тұтқырлықты өлшеудің ең жақсы әдісін анықтауға көмектеседі деп күтілуде.

[7] жұмыс авторлары Ni нанобөлшектерінің кішігірім қоспаларының Sn-3.0 Ag-0.5 Cu (SAC305; мас.%) сұйық қорытпасының динамикалық тұтқырлығына әсерін зерттеді. Нанокөмізгіт үлгілері коммерциялық SAC305 ұнтағы мен Ni нано ұнтағынан суық басу арқылы алынды. Қыздыру және салқындату кезінде өлшенген 100–xNi_x қорытпаларының динамикалық тұтқырлығы (Sn_{96,5}Ag_{3,0}Cu_{0,5}) балқу температурасынан 100 К жоғары температура диапазонында гистерезис көрсетті. Бұл қыздырылған кезде Sn негізіндегі сұйық матрицада Ni нанобөлшектерінің еруінен туындаған құрылымдық түрлендірулерге байланысты деп болжанады. 100–xNi_x(Sn_{96,5}Ag_{3,0}Cu_{0,5}) қорытпаларының тұтқырлығының тәжірибиелік мәндері термодинамикалық тәсілдерді қолдана отырып, есептік деректермен жақсы үйлеседі.

Cu₈₅In₁₁Sn₄, Cu₈₀In₁₅Sn₅, Cu₇₅In₁₅Sn₁₀, Cu₅₅In₇Sn₃₈, Cu₃₃In₅₀Sn₁₇ және Cu₂₆In₅₅Sn₁₉ сұйық қорытпалардың тұтқырлығын өлшеу [8] жұмыста тербелмелі шыны әдісімен орындалды. Cu-In-Sn сұйық қорытпаларының тұтқырлығының алынған температуралық тәуелділіктері Аррениус түріндегі экспоненциалдық теңдеуіне сәйкес тұтқырлық мәндерінің төмендеуін және температураның жоғарылауын көрсетеді. Динамикалық тұтқырлық коэффициенті 1073 К кезінде Cu₈₅In₁₅-In₁₅Sn₈₅, Cu-In₇₅Sn₂₅ және In-Cu₆₀Sn₄₀ үшеуі үшін бірқатар термодинамикалық модельдер арқылы есептелді. Тәжірибиелік және есептік деректер арасында қанағаттанарлық сәйкестік табылды.

Монография авторлары [9] хаотикалық бөлшектер тұжырымдамасына негізделген қарапайым заттар үшін сұйық күйдің толық диапазонындағы температурадан тұтқырлықтың жаңа тәуелділіктерін жасады. Осы тұжырымдамаға сәйкес, Больцманның фундаменталды таралуына сәйкес, тұтқыр ағын кластерлер арасындағы ван-дер-ваальс тартылыс күштерін жеңу арқылы ассоциаттарды бұзу ретінде қарастырылады, бұл негізінен тұтқыр ағым туралы қолданыстағы идеяларға қайшы келмейді және жаңа тәуелділікке бағынады [10, 11]:

$$\eta = \eta_1 (T_1/T)^a = a_2 (T_2/T)^b, \tag{1}$$

мұндағы $\eta_1 - T_1$ (К) тиісті температурадағы динамикалық тұтқырлықтың анықтамалық нүктесі; a – кластерлер ассоциациялануының дәрежесі, b -кластерлер ассоциациялану дәрежесінің төмендеу өлшемі. a және b көрсеткіштерін анықтау үшін η_2, T_2 және η_3, T_3 екінші және үшінші негізгі анықтамалық нүктелер болу керек

$$a = a_2 (T_2/T)^b \tag{2}$$

$$a_2 = \frac{\ln(\eta_2/\eta_1)}{\ln(T_1/T_2)}, \tag{3}$$

$$a_3 = \frac{\ln(\eta_3/\eta_1)}{\ln(T_1/T_3)}. \tag{4}$$

$$b = \frac{\ln(a_3/a_2)}{\ln(T_2/T_3)} \quad (5)$$

Анықтамалық нүктелерді η_i , T_i тәжірибиелік массивінің басында, ортасында және соңында сәйкесінше таңдаған жөн. Бұл жағдайда бүкіл эксперименттік массивті өңдемей-ақ, a_2 , a_3 және b есептеуімен (1) модельге қажетті шамаларды әрі қарай енгізе отырып және корреляция коэффициенті бойынша барлық эксперименттік мәндермен салыстыру үшін η есептеумен шектелуге болады.

Қарапайым ғана емес, сонымен қатар күрделі заттар үшін кластерлі-ассоциаттық моделінің динамикалық тұтқырлығын барабар көрсетуінің мысалы ретінде біз түсті металл концентраттарын өндеуде реагент ретінде, сонымен қатар тамақ өнеркәсібінде, техникада, медицинада, каустикалық сода, сода өндіру үшін кеңінен қолданылатын натрий хлориді бойынша талдау жүргіземіз.

Теориялық талдау

Натрий хлориді кейінгі жұмыста келесі мәліметтермен ұсынылған [12]: балку температурасы $T_m = 1074$ К, және қайнау температурасы $T_b = 1738$ К. Бұл деректер әрі қарай есептеу үшін алынды.

Берілген анықтамалық деректер жиынтығынан η_i, T_i [12,13] $T_1 = 1123$ К, $\eta_1 = 1,275$ мПа·с; $T_2 = 1190$ К, $\eta_2 = 0,95$ мПа·с; $T_3 = 1248$ К, $\eta_3 = 0,752$ мПа·с ретінде негізгі нүктелер таңдалды. (2)-(5) формулалар арқылы $a_2 = 5,0775$, $b = 0,3124$ мәндері есептелді және (1) модельге сәйкес есептелген тұтқырлық теңдеуі алынды:

$$\eta = 1,275 \left(\frac{1123}{T} \right)^{5,0775} (1190/T)^{0,3124}, \text{ мПа} \cdot \text{с} \quad (6)$$

Осы теңдеу бойынша есептеу нәтижелері кластерлердің ассоциациялану дәрежесінің температураға тәуелділігін есептеулерімен бірге

$$a = 5,0775 (1190/T)^{0,3124} \quad (7)$$

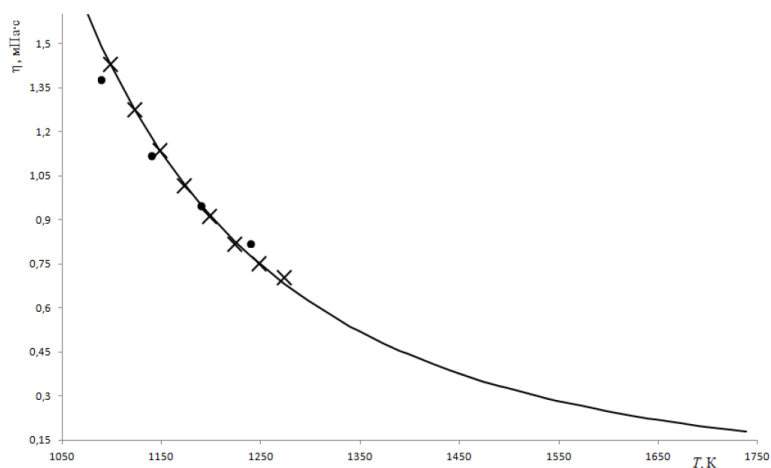
1-кестеде және 1-суретте [12,13] тұтқырлығы бойынша анықтамалық деректермен салыстыра отырып келтірілген.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Кестелік және графикалық мәліметтерге сүйене отырып, ұсынылған модель (6) қарастырылып отырған диапазондардағы анықтамалық шамаларға толық сәйкес келеді, бұл сызықтық емес көпше корреляция коэффициентімен салыстырудың статистикалық сипаттамаларымен расталады [14,15]: $R = 0,989$, оның маңыздылығымен $t_r = 43,261 \gg 2$, бұл натрий хлоридінің сұйық күйін толық сипаттау үшін (6) тәуелділікті ұсынуға мүмкіндік береді, бұл тұтқырлықтың температураға тәуелділігінің кластерлі-ассоциаттық моделіне тән [9].

Кесте 1 – Сұйық натрий хлоридінің динамикалық тұтқырлығы бойынша анықтамалық [12,13] және (6) есептелген деректер

T, K	η [12], мПа·с	η [13], Па·с	η (6), Па·с	a	T, K	η [12], мПа·с	η [13], Па·с	η (6), Па·с	a
1074	-	-	1,611	5,243	1423	-	-	0,409	4,802
1090	1,38	-	1,490	5,219	1440	-	-	0,388	4,784
1098	-	1,432	1,434	5,207	1448	-	-	0,379	4,776
1123	-	1,275	1,275	5,170	1473	-	-	0,351	4,750
1140	1,12	-	1,180	5,146	1490	-	-	0,334	4,733
1148	-	1,138	1,139	5,135	1498	-	-	0,327	4,725
1173	-	1,017	1,021	5,100	1523	-	-	0,304	4,701
1190	0,95	-	0,950	5,078	1540	-	-	0,290	4,685
1198	-	0,912	0,919	5,067	1548	-	-	0,284	4,677
1223	-	0,82	0,830	5,034	1573	-	-	0,266	4,654
1240	0,82	-	0,776	5,013	1590	-	-	0,254	4,638
1248	-	0,752	0,752	5,003	1598	-	-	0,249	4,631
1273	-	0,704	0,684	4,972	1623	-	-	0,234	4,608
1290	-	-	0,642	4,951	1640	-	-	0,224	4,593
1298	-	-	0,623	4,942	1648	-	-	0,220	4,586
1323	-	-	0,570	4,912	1673	-	-	0,207	4,565
1340	-	-	0,537	4,893	1690	-	-	0,199	4,551
1348	-	-	0,523	4,884	1698	-	-	0,195	4,544
1373	-	-	0,480	4,856	1723	-	-	0,184	4,523
1390	-	-	0,454	4,837	1738	-	-	0,178	4,511
1398	-	-	0,443	4,828					



Сурет 1 – Температурадан сұйық натрий хлоридінің динамикалық тұтқырлық тәуелділігі. Нүктелер – анықтамалық деректер [12], кресттер – анықтамалық деректер [13], сызық – (5) бойынша

Қорытынды

Сұйық натрий хлориді үшін динамикалық тұтқырлықтың температураға тәуелділігінің кластерлі-ассоциаттық моделі алғаш рет әзірленді, ол эксперименттік деректерді барабар сипаттайды.

Кластерлі-ассоциаттық модельдің артықшылығы – қайнау температурасына дейін жоғары температураларда да, сонымен қатар төмен температураларда да тұтқырлықтың мінез-құлқын болжау мүмкіндігі. Сұйық натрий хлоридінің динамикалық тұтқырлығының температураға тәуелділігінің кластерлі-ассоциаттық моделін сенімді экстраполяциясыменен, оны қайнау және балқу температурасы аймағында сұйық күйдің барлық диапазонында пайдалануға мүмкіндік береді.

Тұтқырлықтың температуралық тәуелділігінің кластерлі-ассоциаттық моделінде балқымалардың құрамына ешқандай шектеулер жоқ деп санауға болады, бұл оны кез-келген заттарға қолдану перспективасын ашады

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Lida T., Guthrie R. I. L., Morita Z.** An equation for the viscosity of liquid metals // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2016. – V. 27(1). – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1179/cmq.1988.27.1.1>.

2 **Cheng J., Grobner J., Hort N., Kainer K. U., Schmid-Fetzer R.** Measurement and calculation of the viscosity of metals - A review of the current status and developing trends // Measurement Science and Technology. – 2014. – V. 25(6). – N. 062001. – <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/062001>.

3 **Shanchao Gao, Kexin Jiao, Jianliang Zhang.** Review of viscosity prediction models of liquid pure metals and alloys // Philosophical Magazine. – 2019. – V. 99(7). – P. 853–868. <https://doi.org/10.1080/14786435.2018.1562281>.

4 **Yakymovych A., Sklyarchuk V., Plevachuk Yu., Sokoliuk B.** Viscosity and Electrical Conductivity of the Liquid Sn-3.8Ag-0.7Cu Alloy with Minor Co Admixtures // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – V. 25(10). – P. 4437–4443. – <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2297-8>.

5 **Ferreira I. L., de Castro J. A., Garcia A.** On the prediction of temperature-dependent viscosity of multicomponent liquid alloys // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2019. – V. 31(5). – P. 1369–1385. – <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00753-7>.

6 **Megalingam A., Ahmad A.H.B., Maarof M.R.B., Sudhakar K.** Viscosity measurements in semi-solid metal processing: current status and recent developments // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – V. 119. – P. 1435–1459. – <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08356-w>.

7 **Yakymovych A., Weber H., Kaban I., Ipsier H.** Dynamic viscosity of a liquid Sn-3.0Ag-0.5Cu alloy with Ni nanoparticles. – Journal of Molecular Liquids. – 2018. – V. 268(10). – P. 176–180. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.069>.

8 **Yakymovych A., Vus V., Mudry S.** Viscosity of liquid Cu-In-Sn alloys // *Journal of Molecular Liquid.* – 2016. – V. 219. – P. 845–850. – <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.055>

9 **Малышев, В. П., Бектурганов, Н. С., Турдукожаева (Макашева) А. М.** Вязкость, текучесть и плотность веществ как мера их хаотизации. – М. : Научный мир, 2012. – 288 с.

10 **Малышев, В. П., Толымбеков, М. Ж., Турдукожаева, А. М., Кажикенова А. Ш., Акуов А. М.** Течение расплавов – разрушение ассоциатов кластеров. *Расплавы.* – 2010. – № 6. – С. 43–49.

11 **Малышев, В. П., Турдукожаева, А. М.** Уточнение кластерно-ассоциатной модели вязкости расплавов на основе учета влияния температуры на степень ассоциации кластеров. – *Расплавы.* – 2011. – № 6. – С. 72–79.

12 **Рабинович, В. А., Хавин, З. Я.** Краткий химический справочник. – Л. : Химия, 1978. – С. 56.

13 **Никольский, Б. П.** Справочник химика. – Т. 1, втор. изд. – Л. : Химия, 1966. – 984 с.

14 **Налимов, В. В.** Теория эксперимента. – М. : Наука, 1977. – 207 с.

15 **Рузинов, Л. П.** Статистические методы оптимизации химических процессов. – М. : Химия, 1972. – 486 с.

REFERENCES

1 **Lida, T., Guthrie, R.I.L., Morita, Z.** An equation for the viscosity of liquid metals // *Canadian Metallurgical Quarterly.* – 2016. – V. 27(1). – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1179/cmq.1988.27.1.1>.

2 **Cheng, J., Grobner, J., Hort, N., Kainer, K.U., Schmid-Fetzer, R.** Measurement and calculation of the viscosity of metals - A review of the current status and developing trends // *Measurement Science and Technology.* – 2014. – V. 25(6). – N. 062001. – <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/062001>.

3 **Shanchao, Gao, Kexin, Jiao, Jianliang, Zhang.** Review of viscosity prediction models of liquid pure metals and alloys // *Philosophical Magazine.* – 2019. – V. 99(7). – P. 853–868. – <https://doi.org/10.1080/14786435.2018.1562281>.

4 **Yakymovych, A., Sklyarchuk, V., Plevachuk, Yu., Sokoliuk, B.** Viscosity and Electrical Conductivity of the Liquid Sn-3.8Ag-0.7Cu Alloy with Minor Co Admixtures // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2016. – V. 25(10). – P. 4437–4443. – <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2297-8>.

5 **Ferreira, I. L., de Castro, J. A., Garcia, A.** On the prediction of temperature-dependent viscosity of multicomponent liquid alloys // *Continuum Mechanics and Thermodynamics.* – 2019. – V. 31(5). – P. 1369–1385. – <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00753-7>.

6 **Megalingam, A., Ahmad, A.H.B., Maarof, M.R.B., Sudhakar, K.** Viscosity measurements in semi-solid metal processing: current status and recent developments

// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – V. 119. – P. 1435–1459. – <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08356-w>.

7 **Yakymovych, A., Weber, H., Kaban, I., Ipser, H.** Dynamic viscosity of a liquid Sn-3.0Ag-0.5Cu alloy with Ni nanoparticles. – Journal of Molecular Liquids. – 2018. – V. 268(10). – P. 176–180. – <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.069>.

8 **Yakymovych, A., Vus, V., Mudry, S.** Viscosity of liquid Cu-In-Sn alloys // Journal of Molecular Liquid. – 2016. – V. 219. – P. 845–850. – <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.055>

9 **Maly`shev, V. P., Bekturganov, N. S., Turdukozhaeva (Makasheva), A. M.** Vyazkost`, tekuchest` i plotnost` veshhestv kak mera ix xaotizacii [Viscosity, fluidity and density of substances as a measure of their randomization]. – Moscow : Nauchny`j mir, 2012. – 288 p.

10 **Maly`shev, V. P., Toly`mbekov, M. Zh., Turdukozhaeva, A. M., Kazhikenova, A. Sh., Akuov, A. M.** Techenie rasplavov – razrushenie associatov klasterov [Melt flow – destruction of cluster associates] // Rasplavy`. – 2010. – № 6. – P. 43–49.

11 **Maly`shev, V. P., Turdukozhaeva, A. M.** Utochnenie klasterno-associatnoj modeli vyazkosti rasplavov na osnove ucheta vliyaniya temperatury` na stepen` associacii klasterov [Refinement of the cluster-associate model of melt viscosity based on taking into account the influence of temperature on the degree of cluster association]. // Rasplavy`. – 2011. – № 6. – P. 72–79.

12 **Rabinovich, V. A., Xavin, Z. Ya.** Kratkij ximicheskij spravochnik [Brief Chemical Reference]. – L.: Ximiya, 1978. – P. 56.

13 **Nicol`skij, B. P.** Spravochnik ximika [Chemist`s Handbook]. – T. 1, vtor. izd. – L. : Ximiya, 1966. – 984 p.

14 **Nalimov, V. V.** Teoriya e`ksperimenta [Theory of experiment]. – Moscow : Nauka, 1977. – 207 p.

15 **Ruzinov, L. P.** Statisticheskie metody` optimizacii ximicheskix processov [Statistical methods of optimization of chemical processes]. – Moscow : Ximiya, 1972. – 486 p.

Басып шығаруға 07.12.23 қабылданды.

**Л. А. Бекбаева¹, А. М. Макашева²*

^{1,2}Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,

Республика Казахстан, г. Караганда

Принято к изданию 07.12.23.

КЛАСТЕРНО-АССОЦИАТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ХЛОРИДА НАТРИЯ

В статье авторами была получена температурная зависимость вязкости сложного неорганического вещества – хлорида натрия и проведена проверка предложенной математической модели.

Вязкость рассматривается как хаосочувствительное свойство жидкости, присущее ей в движении и в покое. Математическая модель вязкости была разработана с использованием распределения Больцмана и концепции хаотизированных частиц. На этой основе построена иерархическая кластерно-ассоциатная модель вязкости, которая учитывает не только образование первичных кластеров, но и вторичных по отношению к ним ассоциатов с возможностью выявления степени ассоциации кластеров.

Для адаптации кластерно-ассоциатной модели к экспериментальным данным разработаны определенные приемы обработки данных для идентификации неизвестных параметров модели. Метод обработки данных по вязкости с использованием из всего множества трех реперных точек позволяет определить показатель степени агрегации ассоциатов.

При обработке данных по вязкости хлорида натрия был установлен высокий коэффициент корреляции рассчитанных по сравнению со справочными величинами, что указывает на адекватность новой зависимости.

Данная модель позволяет прогнозировать поведение вязкости хлорида натрия в более высокий температурный диапазон. Степень ассоциации кластеров с повышением температуры понижается, соответствуя динамике разрушения ассоциатов и вязкости в целом.

Ключевые слова: распределение Больцмана, динамическая вязкость, хаотизированные частицы, ассоциат, кластер, хлорид натрия.

**L. Bekbayeva¹, A. Makasheva²*

^{1,2}Abylkas Saginov Karaganda Technical University,

Republic of Kazakhstan, Karaganda,

Accepted for publication on 07.12.23.

CLUSTER-ASSOCIATE MODEL OF TEMPERATURE DEPENDENCY OF SODIUM CHLORIDE DYNAMICAL VISCOSITY

In the article, the authors obtained the temperature dependence of the viscosity of a complex inorganic substance – sodium chloride and tested the proposed mathematical model.

Viscosity is considered as a chaosensitive property of a liquid inherent in its motion and in motion. The mathematical model of viscosity was developed using the Boltzmann distribution and the concept of chaotic particles. On this basis, a hierarchical cluster-associate viscosity model is constructed, which takes into account not only the formation of primary clusters, but also secondary associates with respect to them, with the possibility of identifying the degree of cluster association.

To adapt the cluster-associate model to experimental data, certain data processing techniques have been developed to identify unknown parameters of the model. The method of processing viscosity data using a total of three reference points allows us to determine the indicator of the degree of aggregation of associates.

When processing data on the viscosity of sodium chloride, a high correlation coefficient was established calculated in comparison with reference values, which indicates the adequacy of the new dependence.

This model makes it possible to predict the behavior of the viscosity of sodium chloride in a higher temperature range. The degree of association of clusters with increasing temperature decreases, corresponding to the dynamics of destruction of associates and viscosity in general.

Keywords: Boltzmann's distribution, dynamic viscosity, randomized particles, associate, cluster, sodium chloride.

Теруге 08.12.23 ж. жіберілді. Басуға 29.12.23 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 17,26 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4166

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

nitk.tou.edu.kz