EKTU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

EKTU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

№ 2, 2026

ISSN (Print): 3134-8009
ISSN (Online): 3134-8017

1-том, 2-нөмір, маусым, 2026.
Том 1, № 2, июнь 2026.
Vol. 1, Issue 2, June 2026.

EKTU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Жылына 4 рет шығады
Выходит 4 раза в год
Published 4 times a year

Өскемен, 2026
Усть-Каменогорск, 2026
Ust-Kamenogorsk, 2026

Бас редакторы
Ғабдысалық Риза, PhD

Редакция алқасы:

Бас редактордың орынбасары:
Тогузова М.М., PhD

Редакциялық алқа мүшелері:

Войчик Вольдемар, т.ғ.д. (Польша)
Выжва С.А., г.ғ.д., профессор (Украина)
Мамяченков С.В., т.ғ.д., профессор (Ресей)
Стрычек Ярослав, профессор, доктор Хаб. (Польша)
Чарыков Н.А., х.ғ.д., профессор (Ресей)
Логанина В.И., т.ғ.д., профессор (Ресей)
Крак Ю.В., т.ғ.д., профессор (Украина)
Бессмертный И.А., т.ғ.д., профессор (Ресей)
Бакыт Ғ.Б., PhD, қауымд. проф. (Қазақстан)
Әбішев Қ.Қ., PhD, қауымд. проф. (Қазақстан)
Төлебекова Ә.С., PhD, профессор (Қазақстан)
Суреш Алапати, PhD, профессор (Корея)

© Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан
техникалық университеті, 2026

Главный редактор

Ғабдысалық Риза, PhD

Редакционная коллегия:

Заместитель главного редактора:
Тогузова М.М., PhD

Члены редакционной коллегии:

Войчик Вольдемар, д.т.н. (Польша)
Выжва С.А., д.г.н., профессор (Украина)
Мамяченков С.В., д.т.н., профессор (Россия)
Стрычек Ярослав, профессор, доктор Хаб. (Польша)
Чарыков Н.А., д.х.н., профессор (Россия)
Логанина В.И., д.т.н., профессор (Россия)
Крак Ю.В., д.т.н., профессор (Украина)
Бессмертный И.А., д.т.н., профессор (Россия)
Бакыт Ғ.Б., PhD, ассоц. проф. (Қазақстан)
Абишев Қ.Қ., к.т.н., ассоц. проф. (Қазақстан)
Тулебекова А.С., PhD, профессор (Қазақстан)
Суреш Алапати, PhD, профессор (Корея)

© Восточно-Казахстанский технический
университет им. Д. Серикбаева, 2026

Editor-in-Chief

Riza Gabdyssalyk, PhD

Editorial Board:

Deputy Editor-in-Chief
Marzhan Toguzova, PhD

Editorial Board Members:

Wojcik Voldemar, Doctor of Technical Sciences, Professor (Poland)
Sergey Vyzhva, Doctor of Geological Sciences, Professor (Ukraine)
Sergey Mamyachenkov, Professor, Doctor of Technical Sciences (Russia)
Strychek Yaroslav, Professor, Dr. Hub. (Poland)
Nikolay Charykov, Doctor of Chemical Sciences, Professor (Russia)
Valentina Loganina, Professor, Doctor of Technical Sciences (Russia)
Yuri Krak, Professor, Doctor of Technical Sciences (Ukraine)
Igor Bessmertny, Professor, Doctor of Technical Sciences (Russia)
Bakyt Gabit, PhD, Associate Professor (Kazakhstan)
Kairatolla Abishev, PhD, Associate Professor (Kazakhstan)
Asel Tulebekova, PhD, Professor (Kazakhstan)
Suresh Alapati, Professor, PhD (Korea)

© D. Serikbayev East Kazakhstan
Technical University, 2026

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_1
ХҒТАР 55.57.33

ҮЙІНДІ ЖҰМЫС ЖАБДЫҚТАРЫН ТЕОРИЯЛЫҚ ТАЛДАУ ЖӘНЕ ЖЕТІЛДІРУ ЖОЛДАРЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОТВАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

THEORETICAL ANALYSIS AND WAYS TO IMPROVE BLADE WORKING EQUIPMENT

Б.Қ. Аукенова [1], **А.К. Айтказина** [2*], **Д.С. Кабдуллина** [3], **Г.Б. Жексембинова** [4], **T.T. Leśniewski** [5]
[1,2,3,4]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
[5]Люблин технологиялық университеті, Люблин қ., Польша
*Жауапты автор: Айтказина Аяжан Калелхановна, e-mail: aaytkazina@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:
пышақ, бульдозер, топырақты кесу, топырақты кесуге кедергі күші, пышақты тереңдету, пышақтың пішіні, сызу призмасы, үйінді бетінің қисықтық радиусы.

ТҮЙІНДЕМЕ
Бульдозерлердің және басқа да жер қазу-көлік машиналарының үйінді жұмыс органдарының топырақты кесу саласындағы белгілі әлемдік зерттеулерге шолу және талдау бульдозерлердің жаңа жұмыс органдарын жаңғыртуды немесе әзірлеуді негіздеуге, мүмкін дәстүрлі емес нысанда және олардың жұмыс процесінің тиімділігін растауға бағытталған. Шолуды талдаудан топырақты кесудің бүкіл процесінің өнімділігі мен тиімділігі бульдозерлердің немесе автогрейдерлердің үйінді жұмыс органдарының дизайнына немесе жағдайына байланысты екені белгілі болады. Пышақты орнату бұрышын және оның бетінің қисықтық радиусын өзгерту, пышақтың қазу кедергісі мен тереңдеуіне әсер етеді, процестің өнімділігі мен жұмыс тиімділігіне айтарлықтай әсер етеді. Әлемдік зерттеушілер қазірдің өзінде көптеген мәселелерді қарастырды және осы шолу мақаласында келтірілген олардың жұмысын талдау зерттеулердің, модельдеудің және эксперименттік тәжірибелердің дұрыс бағытын таңдауға мүмкіндік береді. Эксперименттік жұмыстардың нәтижелері және соңғы элементтерді модельдеу әсіресе құнды. Талданатын көздерден топырақты кесуді зерттеумен және жаңа жұмыс жабдықтары мен эксперименттік стендтердің конструкцияларын әзірлеумен айналысатын ғылыми зертханалар туралы мәліметтер алынды.

Ключевые слова:
отвал, бульдозер, резание грунтов, сила сопротивления резанию грунтов, заглубление отвала, форма отвала,

АННОТАЦИЯ
Данный обзор и анализ известных мировых исследований в области резания грунтов отвальными рабочими органами бульдозеров и других землеройно-транспортных машин направлен на обоснование модернизации или разработки новых рабочих органов бульдозеров, возможно нетрадиционной формы и подтверждение

© 2026 Б.Қ. Аукенова, А.К. Айтказина, Д.С. Кабдуллина, Г.Б. Жексембинова, T.T. Leśniewski
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы (CC BY 4.0) бойынша таратылады.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

призма волочения, радиус кривизны отвальной поверхности.

эффективности их рабочего процесса. Из анализа обзора становится понятным, что от конструкции или положения отвальных рабочих органов бульдозеров или автогрейдеров зависит производительность и эффективность всего процесса резания грунта.Изменение угла установки отвала и радиуса кривизны его поверхности, влияя на сопротивление копанию и заглубление отвала, оказывают существенное воздействие на производительность процесса и эффективность работы. Многие вопросы уже рассмотрены мировыми исследователями и приведенный в данной обзорной статье анализ их работ дает возможность выбора правильного направления исследований, моделирования и проведения экспериментальных опытов. Особенно ценными являются результаты экспериментальных работ и моделирования методом конечных элементов. Из анализируемых источников получены сведения о научных лабораториях, занимающихся исследованиями резания грунтов и разработкой конструкций нового рабочего оборудования и экспериментальных стендов.

Keywords:
ploughshare, bulldozer, soil cutting, soil cutting resistance force, ploughshare depth, ploughshare shape, drag prism, radius of curvature of the ploughshare surface.

ABSTRACT

This review and analysis of well-known global research in the field of soil cutting with bulldozer blades and other earthmoving and transport machines is aimed at justifying the modernisation or development of new bulldozer blades, possibly of an unconventional shape, and confirming the effectiveness of their working process. The analysis of the review makes it clear that the design or position of the blade working bodies of bulldozers or motor graders determines the productivity and efficiency of the entire soil cutting process. Changes in the angle of the blade and the radius of curvature of its surface, affecting the resistance to digging and the depth of the blade, have a significant impact on the productivity of the process and the efficiency of the work. Many issues have already been addressed by researchers around the world, and the analysis of their work presented in this review article makes it possible to choose the right direction for research, modelling and experimental work. The results of experimental work and finite element modelling are particularly valuable. The analysed sources provide information on scientific laboratories engaged in research on soil cutting and the development of new working equipment and experimental stands.

КІРІСПЕ

Жер қазу-көлік машиналарының үйінді жұмыс жабдықтарының негізгі параметрлерін таңдау және есептеу үшін негізгі тәуелділіктер мен ережелер отандық және шетелдік авторлардың көптеген зерттеулерінде алынған. Жұмыс жабдығының топырақпен өзара әрекеттесу процесінің жалпы физикалық көрінісі де, жеке параметрлер мен режимдердің қазу процесінің күштік және динамикалық сипаттамаларына әсері де зерттелді. Зерттеулер алғашқы кезеңдерінде эксперименттік сипатта болды.

Кесу бұрышының α кесу күшінің P шамасына әсерін көптеген зерттеушілер жүргізді. Бұл топырақты кесу теориясында орталық сұрақ болған жоқ, бірақ оның ұзақ тарихы бар. Бұл ретте зерттеулер топырақты кесуге кедергінің көлденең құрамдас бөлігін барынша азайту қамтамасыз етілетін осындай іс жүзінде мүмкін болатын кесу бұрыштарын табу мақсатында жүргізілді. Соқа пышақтарының кесу бұрышын 20-дан 50 градусқа дейін ұлғайту орташа саздақты топырақтың кесуге төзімділігін сызықтық заңға сәйкес арттыратынын анықтады (H. W. Chandler, 1984). Бұл процестің энергия сыйымдылығына ең көп әсер етеді. Зерттеулерде алынған эмпирикалық және теориялық формулалар мен

тәуелділіктер, әдетте, кесу (қазу) күшінің кесу тереңдігіне, топырақтың механикалық беріктігіне тәуелділігінде сыналды.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеулерде процестің физикалық мәні туралы сұрақтар қаралды, сонымен қатар кесу күші мен энергия сыйымдылығының бірқатар геометриялық факторлар мен бұзылу жағдайларына тәуелділігі зерттелді.

Еріген топырақтарды зерттеу топырақтың жіктелуін әзірлеуге, және сонымен бірге кесу күшінің топырақтың осы параметріне тікелей пропорционалды тәуелділігін көрсетуге мүмкіндік берді (Ганюков А.А., Алтынбаев А.Ж., 2022).

Жүргізілген эксперименттік зерттеулер негізінде жер қазу – көлік машинасының жұмыс органында (оның компоненттерінің суперпозиция принципіне сүйене отырып) жиынтық тарту күшін анықтау формуласы ұсынылды:

$$P_к = P_р + P_Т + P_{ст} + P_{пр} \quad (1)$$

мұндағы:

$P_р$ – кесу күші;

$P_Т$ – жұмыс жабдығының салмағын жеңуге арналған күш;

$P_{ст}$ – пышаққа кірген кездегі жоңқаның кедергісі;

$P_{пр}$ – топырақ сүйреу призмасының қозғалысқа кедергісі.

Профиль енінің l, кесу бұрышының α, қайрау бұрышының β, тереңдіктің h әсерін ескере отырып, кесетін жалпақ пышақ үшін кесу күші келесі эмпирикалық формуламен көрсетіледі:

$$P = Ch^{1,35} \cdot (1 + 2,6l) \cdot (1 + 0,0075\alpha) \cdot z \quad (2)$$

мұндағы z – кесу жиегінде тістердің болуын ескеретін коэффициент.

Формуладан кесу күші кесу тереңдігінің тез өсетін функциясы және кесу енінің сызықтық функциясы болып табылады. Соққы саны мен кесу күші арасында тікелей пропорционалды байланыс орнатылған топтарға ғана қолдануға болады (Asset Altynbayev, 2024) Ауытқулар мүмкін болатын топырақтарға шөгінді топырақтары, қосындылары бар қатты саздар және басқа да гетерогенді топырақтар жатады. Кейінгі зерттеулер кесу тереңдігінің көрсеткіші топырақтың түріне және жұмыс органының биіктігі мен қазу тереңдігінің арақатынасына байланысты және айтарлықтай шектерде өзгеруі мүмкін деген қорытындыға келді.

Берілген формуладағы кесу бұрышының әсерін есепке алу $(1 + 0,0075\alpha)$ фактормен жүзеге асырылады. $20 - 30^0$ кесу бұрыштарынан тыс кесу күші сызықтық тәуелділікте артады және оны төмендегідей көрсетуге болады:

$$P = P_{20} \cdot (1 + 0,0075\alpha) \quad (3)$$

мұндағы: $P_{20} - \alpha = 20^0$ болғандағы кесу күші.

Д.И. Федоров көлемді салмағы 1,4 г/см^3 болатын қопсытылған сазды тұрақты көтеру бетінің биіктігі бар түрлі кесу жиектерімен кесу кезінде $P = f(\alpha)$ тәуелділігін зерттеді. Ол сондай-ақ ауыр саздақта зерттеулер жүргізді, бұл кесу бұрышының 1^0-қа артуы топырақтың кесуге кедергісін шамамен 25 %-ға арттыратынын көрсетті (А.Н. Зеленин бойынша 1-2 %). Осыған байланысты кесу бұрышының әсерін а коэффициентімен ескеруді ұсынылды (Dong Y, 2025):

$$a = 1 + (0,01 \div 0,025) \cdot (\alpha - 7^0) \quad (4)$$

Топырақты кесу процестерін зерттеу бойынша жүргізілген эксперименттік жұмыстардың негізгі тұжырымдары (Ветров Ю.А., 2019):

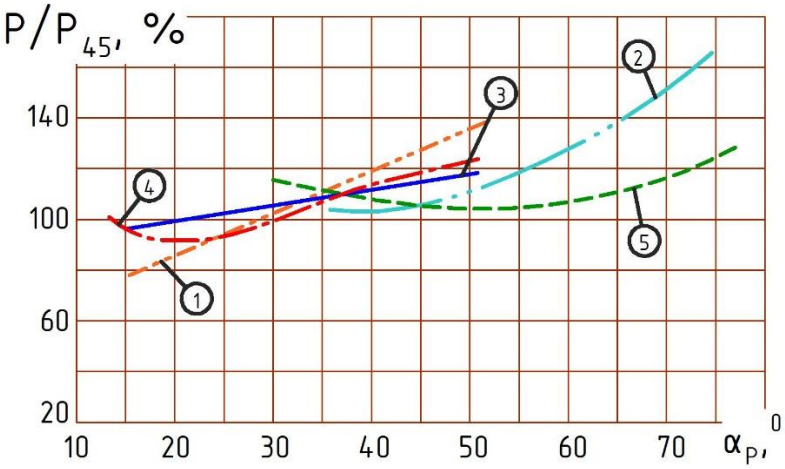
1) Жоңқаның қалыңдығына байланысты кесу күші жалпы $P = Ah^n$ дәрежелі тәуелділікпен көрсетілуі мүмкін;

2) Кесу күші кескіш профильдің еніне сызықтық байланысты;

3) Көрсеткіш $1 \leq n \leq 2$ және профильдің еніне байланысты;

4) Кесу жиегінің тозуы мен күңгірттенуі күшті айтарлықтай арттырады.

Әр авторлардың эксперименттік деректері бойынша 1-суретте көрсетілген $P/P_{45} = f(\alpha)$ тәуелділіктер кесу бұрышының кесу күшіне Р әсер ету сипаты топырақ жағдайларымен, жұмыс жабдықтарының түрлерімен және параметрлерімен анықталатынын көрсетеді (Miedema, S.A., 2011; Е.И. Берестов, 2012; R. Kozbagarov, 2023).



1-сурет. P/P_{45} кесу күшінің кесу бұрышына α_P тәуелділігі:

1 – құмды саз; 2 – құм; 3 және 4 – орташа және ауыр саздар; 5 – аргиллиттер

Ескерту – авторлармен құралған

Көптеген зерттеушілер $20 - 30^0$ кесу бұрыштары аймағында ең аз кесу күші бар екенін көрсетеді. $\alpha < 20^0$ бұрыштары аймағындағы тәуелділіктер негізінен теориялық қызығушылық тудырады.

Топырақты кесу бойынша жинақталған эксперименттік материал жұмыс органдарының топырақпен өзара әрекеттесуін аналитикалық талдауға көшуге мүмкіндік берді.

3D-модельдеу және FEM-талдау арқылы кесу күштерін анықтаудың алғашқы әрекеттеріне O. B Aluko, D. A Seig, Б. К. Аукенова, М.В. Дудкин, Б. А. Молдаханов, А.И. Ким және т.б. жұмыстарын, сондай-ақ В.И. Баловнев, И.А. Недорезов, А.С. Кадыров, З.А. Мулдагалиев, Р.А. Кабашев және т.б. классикалық жұмыстарын жатқызуға болады. Олардың көпшілігінде топыраққа қатысты сол кездегі дамыған топырақ механикасының позициялары қолданылды. Тегіс, ұзын жұмыс органымен кесу процесінің физика-механикалық аналогы ретінде топырақтың тірек қабырғасымен өзара әрекеттесуі қабылданды. Қабырғаның топырақпен өзара әрекеттесуі сырғанау бетінің пайда болуымен бірге жүреді, Кулон заңы орындалады (Dong Y, 2025):

$$\tau = \sigma_n \cdot tg\varphi + C_0 \tag{5}$$

мұндағы: τ – жанасу кереуі;

σ_n – жылжу бетіндегі қалыпты кернеу;

φ – топырақтың ішкі үйкеліс бұрышы;

C_0 – меншікті ілінісу.

Статикалық теңдеулерді зерттеу ықтимал ығысу жағдайларына байланысты бірқатар есептік тәуелділіктерді алуға мүмкіндік берді [Ветров Ю.А., 2019; Yu, J. 2022]. Бұл жағдайда тапсырма жалпақ пышақтардың топырақпен өзара әрекеттесуінің үш жағдайына бөлінді:

1) жағдай тік бұрышты $\beta \geq \beta^*$ құрайтын "жұмсақ қырлардың" шарттарына сәйкес келеді (кішкене кесу бұрыштары);

2) «аралық қырлар» $\beta_0 \leq \beta \leq \beta^*$ (кесу бұрышы $22 - 70^0$);

3) «тік қырлар» $\beta \leq \beta_0$ (кесу бұрышы $70 - 90^0$)

мұндағы β^* мен $\beta_0 -$ β бұрышының өтпелі (шектік) мәндері.

Үйкеліс бұрышы α мен β бұрышы $\alpha = \pi/2 - \beta$ байланысқа тәуелді.

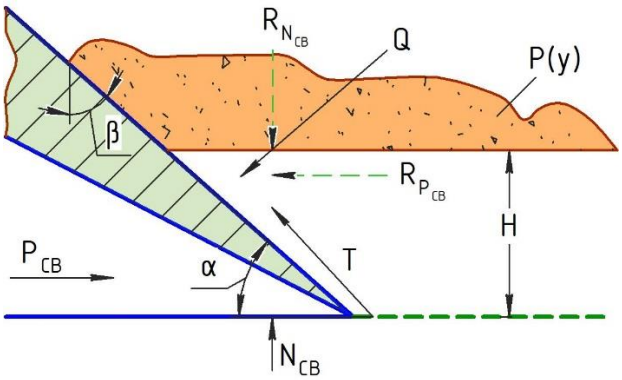
Тіреу қабырғасының артқы жағындағы реактивті қысымдарды есептеу үшін теңдеулерді және пышақтың алдыңғы жағындағы күштердің өзара әрекеттесуінің жеңілдетілген схемасын (2-сурет) қолдана отырып, Ю. А. Ветров кесу күштерінің құрамдас бөліктерін анықтау үшін теңдеулер жүйесін алды (тік R_{NcB} және бойлық R_{PcB}) (Asset Altynbayev, 2024; Ветров Ю.А., 2019):

$$R_{NcB}/l = \theta \cdot sin\alpha + T \cdot cos\alpha \quad (6)$$

$$R_{PcB}/l = \theta \cdot cos\alpha + T \cdot sin\alpha \quad (7)$$

мұндағы, θ мен T – салмақсыз орта үшін q реактивті қысымының компоненттері:

$$\theta = \frac{h \cdot q}{sin\alpha}; \quad T = \frac{h \cdot \tau}{sin\alpha} \quad (8)$$



2-сурет. Ұзын жазық органда кесуге төзімділік күштерінің өзара әрекеттесу схемасы

Ескерту – авторлармен құралған

Алынған өрнектердің негізінде кесу күштері мен эксперименттік күштердің есептік шамаларының сәйкестігін тексеруге, сондай-ақ топырақтың физикалық-механикалық қасиеттерінің және жұмыс органының геометриясының кесу күштерінің есептік шамаларына әсерін талдауға болады. Осы тексерудің нәтижесінде келесі қорытындылар алынды:

1) Кесу күші іс жүзінде адгезияға пропорционалды және ішкі үйкеліс бұрышына ф аз тәуелді (нақты өзгеріс ф диапазонында өзгеріс 10-15%);

2) Кесу күші пышақ бойымен топырақтың үйкеліс бұрышына δ айтарлықтай тәуелді;

3) Кесу күші кесу тереңдігіне пропорционалды;

4) Кесу күші кесу бұрышына байланысты өзгереді, $\alpha = 30 - 35^0$ болғанда минималды мәндерге ие;

5) Кесу күшіне жұмыс органының күңгірттенуі айтарлықтай әсер етеді. Тозу алаңындағы қарсылық заңдылықтары кесу күштерінің аталған факторларға тәуелділігінен ерекшеленеді;

6) Есептелген және эксперименттік шамаларды салыстыру тәжірибелік шамалардың теориялық тұрғыдан екі есе жоғары екенін көрсетті, бірақ топырақтың беріктігінің, үйкеліс бұрыштарының және пышақтың геометриялық параметрлерінің әсерінен негізгі эксперименттік позицияларды сапалы түрде дұрыс көрсетеді.

Бұл тұжырымдар кесу процесін аналитикалық сипаттау бойынша қосымша зерттеулерді белсенді қарастыруға түрткі болады.

Эксперименттік зерттеулер негізінде жер қазу машиналарының әртүрлі жұмыс органдары үшін есептеу схемаларын құра отырып және шекті тепе-теңдік теориясының әдістері мен теңдеулерін қолдана отырып, В.И. Баловнев топырақты кесуге төзімділікті анықтау үшін бірқатар теңдеулер шығарды. Үйінді жұмыс органдарының жұмысына жақын кесу процесінің ең жалпы схемасы келесідей сипатталады:

$$\mathrm{P} = \iint dP\,(x, y) \tag{9}$$

Қазіргі уақытта кесу теориясы A. Haeria, D. Tremblaya, K. Skoniecznya, Г.Н. Карасев, А.И. Доценко, Н.Т. Сурашов және басқа да зерттеушілердің еңбектерінде өз дамуын тапты. Бұл еңбектер кесу күштерін есептеудің аналитикалық әдістерін дамытудағы үрдістерді белгілі бір деңгейде көрсетіп қана қоймай, сонымен бірге олардың барлығын біріктіретін ортақ ғылыми көзқарасты да ұсынады.

А.А. Ганюков пен А.Ж. Алтынбаев әлемдік ғалымдар бұрын шығарған топырақтың кесу күшін горизонталь режимде есептеуге арналған теңдеулерді тәжірибелік және теориялық тұрғыда растады.

$$P_S = \gamma \cdot (\alpha + q/\gamma)^2 \cdot W \cdot N_{s\gamma} + C_0 \cdot W \cdot \alpha \cdot N_{sc} \tag{10}$$

мұндағы: N_{sc} және $N_{s\gamma}$ – графикалық функциялар түрінде берілетін өлшемсіз параметрлер.

Зерттеушілер D.A. Seig, T. Gao және D. Holzb кесу күшін құрастыру үшін кесу бұрышының кесу күші шамасына әсерін ескеру үшін $К_\alpha$– еңіс коэффициентін қолданудың дұрыстығын растады:

$$P_{\text{гор}} = P_f \cdot sin(\alpha + \delta) + P_s \cdot sin\alpha + C_0 \cdot z \cdot ctg\alpha \tag{11}$$

$$P_{\text{верт}} = P_f \cdot cos(\alpha + \delta) + P_s \cdot cos\alpha + C_0 \cdot z \tag{12}$$

мұндағы: P_f және P_s шамалары да өлшемсіз N_f және N_s параметрлерінің көмегімен анықталады.

Топырақтың кесуге төзімділігін анықтау үшін аналитикалық есептеулердің негізі топырақ механикасының маңызды ережелері болып табылады:

А) топырақ еріген, ығысу кернеулерінен бұзылады;

Б) бұзылу процесі пышақтың күш өрісі алдында толық шекті тепе-теңдік жағдайы қалыптасқанда жүзеге асады;

В) ұзын (кең) және жалпақ пышақтың механикалық аналогы ретінде «пассивті қысым» жағдайындағы тіреу қабырғасы алынады.

Кесу бұрышының қазу кедергісінің тік (қалыпты) құраушысына әсерін анықтау бойынша эксперименттік зерттеулерге келетін болсақ, олар көлденең құраушыны зерттеумен салыстырғанда әлдеқайда аз көлемде жүргізілді. Бұл эксперименттегі жүктемені өлшеудегі үлкен қиындықтармен түсіндіріледі. Қалыпты (тік) кесу күші әлі күнге дейін эмпирикалық коэффициенттерді қолдана отырып есептеледі. Мысалы, экскаваторларды жобалау кезінде классикалық формулалар қолданылады, олар бойынша қалыпты қазу күші $N = P \cdot \Psi$ жанамасының үлесі ретінде анықталады.

Бұл ретте ол топырақ массивінің бос бетіне бағытталған және драглайн шөміштері үшін 0,19-0,25 жанама күшіне және жоңғыларды бөлудің қалыпты режимінде тік күректер үшін 0,34-0,38-ге тең деп саналады. Сонымен қатар, зерттеулерде N күші (терең ішіне) массивке (жұмыс органын қатайту) және бос бетке (жұмыс органын итеру) бағытталуы мүмкін екендігі бұрыннан байқалған.

Өткір сынаның топырақпен өзара әрекеттесуінің қарапайым сұлбаларына сүйене отырып және алынған топырақтың қарсыласу күшінің нәтижелік күші пышақтың алдыңғы

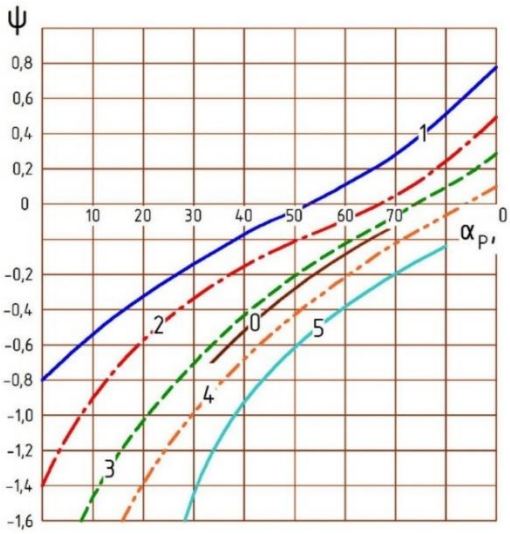
бетіне перпендикуляр бағыттан үйкеліс бұрышына ф қарай ауытқиды деп қабылдай отырып, зерттеушілер N және P күштері арасындағы келесі тәуелділіктерді алды:

$$N = P \cdot ctg(\alpha + \varphi) \tag{13}$$

CJ. Coetzee жүргізген тәжірибелік тексеріс бұл тәуелділіктің шынайылыққа сәйкес келетінін растады, өткір пышақтар үшін (доғалдануды есепке алмағанда) нормаль күшіне арналған жеке заңдылықтарды құрудың қажеті жоқ, өйткені олар көлденең кесу күші үшін алынған тәуелділіктермен бірдей.

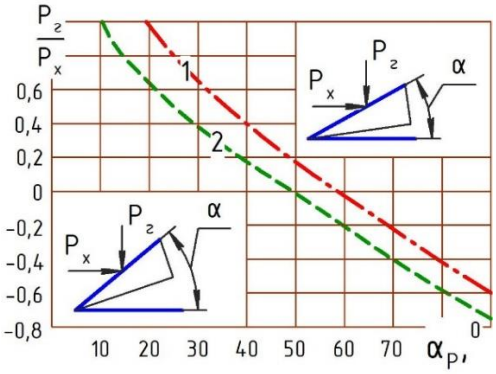
Қалыпты күштің кесу бұрышынан өзгеруі $ctg(\alpha + \varphi)$ өзгерістеріне ұқсас, егер $\alpha < \pi/2 - \varphi$ болса, өткір пышақтар топыраққа тартылады, ал $\alpha > \pi/2 - \varphi$ кезінде олар топырақтан итеріледі (3 және 4-суреттер).

Кесу бұрышынан кесуге төзімділіктің тік құраушының өзгеруінің ұқсас сипаты A. Haeria, D. Tremblaya және т.б. зерттеулерінде кескіш пышақтың физикалық моделінде екі түрлі әдіспен модельдеу кезінде алынған (5-сурет). Мұнда $P_2 = f(\alpha)$ тәуелділігінің сипатына сыртқы үйкелістің әсер ету фактісі қызықты: 1-ші қисық – пышақтың болат бетіндегі жағдайға сәйкес келеді; 2-ші қисық – пышақтың шыны бетіндегі жағдайға сәйкес келеді. Тік құраушы пышақтың шыны бетінде 81^0және болат бетінде 75^0 кесу бұрышында нөлге тең. Бұл графиктің деректері 7, 8-суреттердегі тәуелділіктерді растайды. Бұл эксперименттерде көлденең және тік құраушылардың топырақ тығыздығына тәуелділігі 6-суретте көрсетілген. Тәжірибелердегі тығыздық 1,57 г/см^3-ден 1,75 г/см^3-ке дейін өзгерді. Тығыздықтың жоғарылауымен қисықтардың өсуінің әртүрлі қарқындылығына байланысты тік және көлденең құраушылардың қатынасы, демек, нәтиженің көлбеу бұрышы тығыздықтың жоғарылауымен өзгереді деген қорытынды жасауға болады. Тығыздықтың артуымен қисықтардың өсу қарқындарының әртүрлілігіне байланысты, вертикаль және горизонталь құрамдастардың қатынасы, демек, теңәрекетті күштің көлбеу бұрышы тығыздық артқан сайын өзгеретіні туралы қорытынды жасауға болады.



3-сурет. Теориялық және тәжірибелік (0-сызық) тәуелділіктер ($N/P = f(\alpha_P)$: 1 – μ = 40^0; 2 – μ = 30^0; 3 – μ = 20^0; 4 – μ = 10^0; 5 - μ = 0^0; μ – топырақтың пышаққа қатысты үйкеліс бұрышы
Ескерту – авторлармен құралған

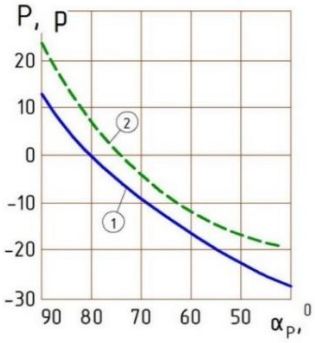
Жер қазатын машиналардың жұмыс органдары бойынша жүргізілген зерттеулердің талдауы көрсеткендей, кесуге қарсыласу күштерінің жалпы сипаты және олардың кесу бұрышына тәуелділігі ұқсас сипатқа ие.



4-сурет. Кесу бұрышының қатынасқа әсері $\frac{P_г}{P_x}$: 1 - μ = 300; 2 - μ = 400

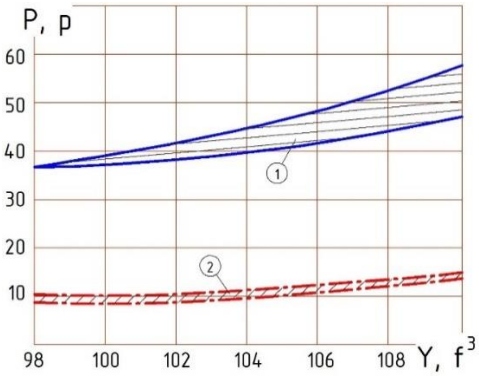
Ескерту – авторлармен құралған

CJ Coetzee-нің теориялық талдауына теориялық талдауында кесу күші $\alpha = 10^0$кезінде минимумға жетсе, оның тәжірибелік өлшеулерінде қарсыласу күші минимумға $\alpha = 20^0$кезінде жеткен.



5-сурет. Кесуге қарсыласу күштерінің кесу бұрышына тәуелділігі

Ескерту – авторлармен құралған

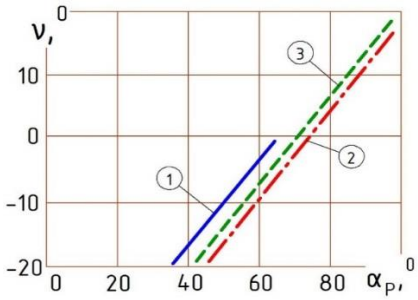


6-сурет. Кесуге қарсыласу күштерінің топырақ тығыздығына тәуелділігі:
1 – горизонталь құраушы; 2 – тік (вертикаль) құраушы

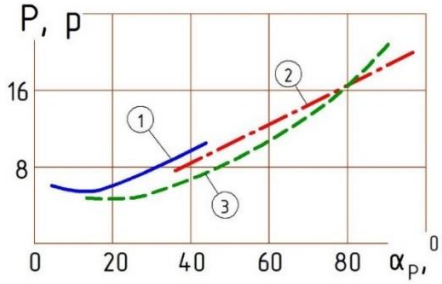
Ескерту – авторлармен құралған

$\alpha = 70 - 80^0$ кезінде топырақтың тік қарсыласу күші төмен бағытталады, бұл ауылшаруашылық құралдарының жұмысында жиі қолданылады. CJ. Coetzee құмда h = 152 мм жұмыс тереңдігінде жүргізген зерттеулерде $\mathcal{V} = f(\alpha)$ тәуелділігінің сызықтық сипаты анықталған.

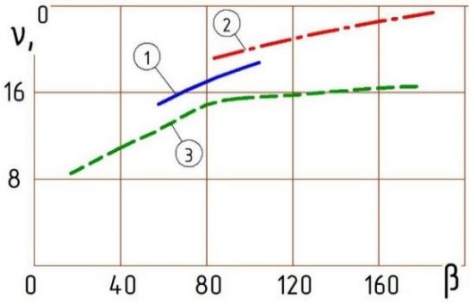
Жұмыс үшін қызықтысы – теңәрекетті күштің көлбеу бұрышы ν -ның жұмыс органының ұшталу бұрышына β тәуелділігі (8-сурет). Аспап ұштала түскен сайын көлбеубұрышы ν азаяды. Бұл жағдайда топырақтың горизонталь қарсыласуы тұрақты болып қалса, тік қарсыласу шамасы төмендейді.



7-сурет. Тең әрекетті күштің көлбеу бұрышының кесу бұрышына тәуелділігі:
1 – А.А. Ганюков бойынша; 2 – S.A. Miedema бойынша; 3 – CJ. Coetzee бойынша
Ескерту – авторлармен құралған



8-сурет. Кесу бұрышының кесуге қарсыласу күшіне тәуелділігі:
1 – А.А. Ганюков бойынша; 2 – S.A. Miedema бойынша; 3 – CJ. Coetzee бойынша
Ескерту – авторлармен құралған



9-сурет. Тең әрекетті күштің еңкею бұрышының (υ) ұшталу бұрышына (β) тәуелділігі:
1– А.А. Ганюков бойынша; 2 – S.A. Miedema бойынша; 3 – CJ. Coetzee бойынша
Ескерту – авторлармен құралған

Жер қазатын-тасымалдаушы машиналардың жұмыс органдарының айрықша ерекшелігі – сүйреу призмасын жинақтайтын үйінді бетінің болуы. Сүйреу призмасының қозғалысына және жоңғылардың үйінді бетіне көтерілуіне қарсылық күштері қазуға қарсылық күштерінің көрінісіне түзетулер енгізеді.

Jiangtao Yu модельденген беттеріндегі үйінді бетіндегі топырақ қысымы гиперболалық заң бойынша биіктікте өзгереді (Yu, J. 2022):

$$P = \mathrm{a} \cdot h^{-k} \tag{14}$$

мұндағы h – кесу жиегінен биіктік; А және К – пышақтың профиліне, кесу тереңдігіне, топырақтың түрі мен күйіне, сүйреу призмасының көлемі мен мөлшеріне байланысты коэффициенттер.

Үйіндідегі нәтижені қолдану нүктесі оның биіктігінің шамамен 1/3 бөлігінде орналасқан, оның бағыты үйінді бетінің профиліне, топырақтың түрі мен күйіне байланысты өзгереді.

Барлық кесу бұрыштарында тығыздалған топырақты қазу кезінде қайырмадағы кедергі күштерінің тік құрамдас күштері қайырманы тереңдетуге тырысады. Борпылдақ топырақты қазу кезінде оның нәтижелері басқа зерттеушілердің нәтижелерімен сәйкес келеді.

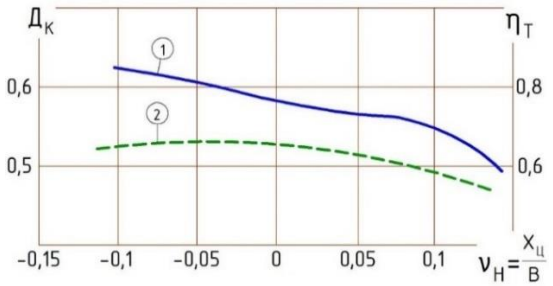
В.И. Баловнев әлемдік зерттеулерді талдай отырып, пышақтарда кесу бұрышы ұлғайған сайын көлбеу ν бұрышы төмендейтінін және қолдану нүктесі төмен қарай жылжитынын анықтады. Қайырманың қазуға алынған қарсылық күштерін қолдану нүктесі үйінді биіктігінің төменгі 1/5 бөлігінде орналасады. Зерттеушілердің көпшілігі нәтиженің қолдану нүктесі пышақтың төменгі бөлігінде пышақтың биіктігінің 1/3 шамасында орналасқандығы туралы ұсыныстар береді.

А.И. Доценконың зерттеулері қазудың энергия сыйымдылығына ең үлкен әсер пышақтың аударылу және көлбеу бұрыштары, қисықтық және оның биіктіктегі өзгеруі екенін көрсетеді. Кесу бұрышының ең қолайлы мәні $40 - 45^0$ құрайды, бұл қазудың ең аз энергия сыйымдылығы қамтамасыз етеді. Пышақтың көлбеу бұрышы және аударылу бұрышы сәйкесінше $75 - 80^0$ и 75^0 болуы керек.

Пышақ профилінің параметрлері тек көлденең құрамасына айтарлықтай әсер етеді. Алайда, олардың тік құрамдасы және көлбеу бұрышына әсері кесу бұрыштары 60^0-дан асқанда айтарлықтай болады. Бұл кесу бұрыштарының диапазоны тік құрамдасы мен нәтиженің көлбеу бұрышы нөлдік мәндерден өтетін кесу бұрыштарында қамтитындықтан, нәтиженің реттелетін көлбеу бұрышы бар пышақтарды жасау кезінде олардың профиль параметрлерін пысықтау қажет. Мұндағы критерий нөлдік немесе нөлге жақын тік құрамдасымен бірге қазуға төзімділік күштерінің көлденең құрамдасының минималды мәні болуы мүмкін.

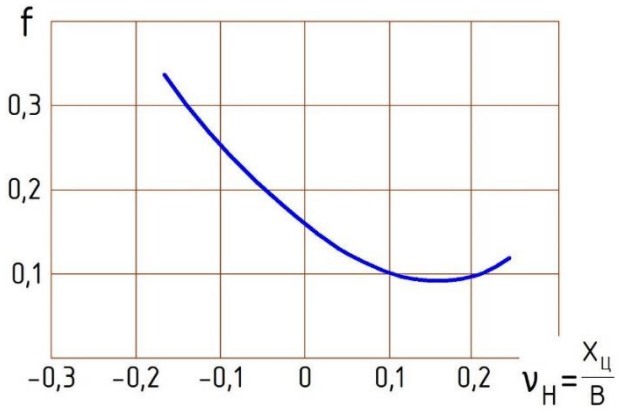
Қазу кедергісінің тік құрамдасының төмендеуі негізгі машинаның тартқыш қасиеттеріне оң әсер етеді. Бұл әсерді қозғалысқа төзімділік көрсеткіштері f бойынша бағалауға болады, меншікті тарту $Д_к$, ПӘТ коэффициенті $\eta_т$.

Khankelov T.K., Mukhitdinov A.S., Alimov T.Y. зерттеулері бойынша 10 және 11-суреттерде $\mathfrak{f} = f(X_ц/B)$; $Д_k = f(X_ц/B)$; $\eta_T = f(X_ц/B)$ байланыстар келтірілген. Мұндағы, $X_ц$ – қысым орталығының жылжуы, В – машинаның базасы.



10-сурет. Қысым ортасы орналасуының меншікті күшке Дк (1-қисық) және тарту ПӘТ ηт (2-қисық) әсері

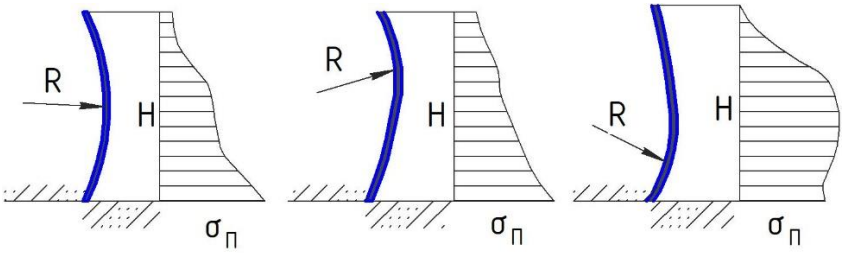
Ескерту – авторлармен құралған



11-сурет. Қысым орталығының орналасуының «ЧЕТРА»-Т35.01 тракторының қозғалысының кедергісіне әсері

Ескерту – авторлармен құралған

Пышақ профилінің пішіні топырақ қабатының қозғалу траекториясына сәйкес келмеген жағдайда пышақ беттінде тоқырау аймақтары пайда болады. Бұл жағдайда қабат кіші иілімділікке ие жолды таңдауға мәжбүр болады, бірақ сонымен бірге топырақ екі жақ бетімен үйкеліс күшін жеңіп өтсе де, иілімділіктің азаюы есебінен топырақты көтеруге қарсылық күші төмендейді. Қисықтықтың әсерін азайтып, тоқырау аймақтарын жою тұрғысынан пышақ бетін жазық етіп (қисаю бұрышы бойынша) орындау қажет. Алайда жоғарғы бөлікте топырақтың төгіліп кетуін болдырмау және жазық, торлы бөлікпен (қазу бұрышымен, ол отвальды бет қисаю бұрышынан кіші) біркелкі қосылу үшін, пышақ беті міндетті түрде белгілі бір қисықтыққа ие болады (12-сурет). Мұнда Р – пышақ биіктігі, R – белгілі аймақтағы пышақтың қисықтығы.Төменгі бөліктегі қисықтық қазылып жатқан топырақтың сынған элементтерінен (қабаттарынан) қабат қалыптасу процесімен анықталады. Бұл жерде қабаттың қалыңдауы, сынған элементтердің бір-біріне қатысты жылжуы, қабаттың иілуі (байланысты, тығыз топырақтарда) сияқты күрделі және теориялық талдауға қиын құбылыстар байқалады. Тік пышақ беттен қиғаш кескіш бетке өтетін сызықтың қисықтығы отвалдың жоғарғы бөлігіндегі қисықтыққа қарағанда үлкен. Сондықтан көптеген зерттеушілер төменге қарай ұлғайып отыратын айнымалы қисықтыққа ие көлденең профильдің рационалды пішінін ұсынады. Бірақ қабаттың қалыптасуы мен оның сүйретпе призмасына түсу құбылыстары топырақ түріне, қазу тереңдігіне, пышақты орнату бұрыштарына байланысты болғандықтан, көлденең профильдің рационалды пішіні тұрақты болмайды, ал ақырында аталған параметрлердің көпшілігінің үйлесімімен анықталады. Оның үстіне, олардың кейбірі жұмыс процесі барысында үздіксіз өзгеріп отырады.



12-сурет. Пышақтың биіктігі бойынша қисықтық радиусының өзгеру мысалдары

Ескерту – авторлармен құралған

Егер пышақ профилі топырақ жағдайына сәйкес келмесе, қазу процесі топырақ қабатының пышақтың бетімен қалыптасуы мен қозғалысынсыз немесе оның итеріліп қозғалуымен өтетіні расталды. Бұл жағдайда сүйретпе призмасы кесілетін топырақтың фонтан тәрізді шашырауы есебінен ұлғаяды, ал пышақ беті толық немесе жартылай жабысып қалады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Тәжірибелік және есептелген деректерді салыстыру аналитикалық модельдердің байланыстардың сапалық сипатын дәл көрсететінін, бірақ олар күш мәндерін төмендететінін көрсетті. Бұл ығысу бетінің сипаты мен топырақтың біртектілігі туралы жеңілдетілген болжамдарға байланысты.

Адаптивті пышақ геометриясын пайдалану нәтиджесінде пайда болған күштің бағытын тұрақтандырады және кедергінің тік компонентін азайтады, бұл негізі машинаның тарту қасиеттеріне оң әсер етеді.

Топырақты қазу бойынша белгілі зерттеулерге шолу жасау және жер қазатын-көлік машиналарының жұмыс органдарының құрылымдарын талдау нәтижесінде қазуды немесе топырақты тасымалдау тиімділігін арттыратын дәстүрден тыс пішіндегі бульдозер пышақтарын әзірлеу немесе жаңғырту, сондай-ақ зерттеу қажеттігі анықталды. Мысалы, ортаңғы пышағы шығыңқы және қозғалмалы бульдозер пышақтары немесе алдыңғы беті қозғалмалы пышақтар.

Пышақтың жұмыс органдарында икемді алдыңғы бетті қолдану топырақ қабатының қалыптасуы мен көтерілу процесінің өзін-өзі оңтайландыруын қамтамасыз етеді, яғни пышақтың көлденең қимасының пішінін қабаттың пішіні мен қозғалыс траекториясына сәйкестендіреді.

ҚОРЫТЫНДЫ

1) Топырақты кесу процесі күрделі және сызықты сипатта емес, жұмыс құралының геометриясы мен топырақ қасиеттерінің біріккен әсерлерімен анықталады.

2) Тиімді кесу бұрышының диапазоны 30-45^0 құрайды, бұл қазуға минимаолды кедергіні қамтамасыз етеді;

3) Икемді алдыңғы беті бар пышақтардың энергия сиымдылығына шешуші әсер етеді.

4) Геометриясы өзгермелі және икемді болатын жұмыс органын әзірлеу перспективалы бағыт болып табылады.

5) Алынған нәтижелерді жер қазу жабдықтарын жобалау және жаңғырту кезінде пайдалануға болады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: жоқ.

АЛҒЫС: Жарияланымға байланысты жүргізілген зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыратын AP22684640 «Геометриясын әртүрлі деңгейде өзгертуге мүмкіндік беретін шарнирлі-буынтық бульдозер пышағыныңң құрылымын әзірлеу» гранты аясында жүзеге асырылуда.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: жоқ.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Chandler, H. W. (1984). The use of non-linear fracture mechanics to study the fracture properties of soils. Journal of Agricultural Engineering Research, 29(4), 321–327. https://doi.org/10.1016/0021-8634(84)90087-8

Altynbayev, A., & Ganyukov, A. (2025). Research on soil cutting with a flat cutter using a simulation model. Communications: Scientific Letters of the University of Zilina, 27(1), B12–B20. https://doi.org/10.26552/com.C.2025.002

Ганюков А. А., & Алтынбаев А. Ж. (2022). Анализ силовых методов расчета разрушения грунтовых сред и обоснование нового подхода к теории резания грунта. Труды университета, 4(89), 274–279. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_274 // Ganyukov, A. A., & Altynbaev, A. Zh. (2022). Analiz silovykh metodov rascheta razrusheniya gruntovykh sred i obosnovanie novogo podkhoda k teorii rezaniya grunta [Analysis of force-based methods for calculating the destruction of soil media and substantiation of a new approach to the theory of soil cutting]. Trudy universiteta [University Proceedings], 4(89), 274–279. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_274 (In Russ.)

Зеленин А. Н. (2018). Основы разрушения грунтов механическими способами. Машиностроение. // Zelenin, A. N. (2018). Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami [Fundamentals of soil destruction by mechanical methods]. Mashinostroenie. (In Russ.)

Dong, Y., Fang, L., Qin, K., Sun, S., & Gong, Y. (2025). Comparison of SPH and CEL methods for simulating the soil cutting process of a biomimetic digging shovel. PLoS ONE, 20(5), Article e0322861. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322861

Ветров Ю. А. (2019). Машины для земляных работ (7-е изд., дораб. и доп.). Вища школа. // Vetrov, Yu. A. (2019). Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Earthmoving machines] (7th ed., rev. and enl.). Vishcha shkola. (In Russ.)

Miedema, S. A. (2011). Soil cutting processes, the cutting of water saturated sand. In Proceedings of OMAE 2011 ASME, Rotterdam, The Netherlands. https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49233

Берестов Е. И. (2012). Сопротивление грунтов резанию. Метод расчета параметров при резании грунта. LAP LAMBERT Academic Publishing. // Berestov, E. I. (2012). Soprotivlenie gruntov rezaniyu. Metod rascheta parametrov pri rezanii grunta [Resistance of soils to cutting. A method for calculating parameters during soil cutting]. LAP LAMBERT Academic Publishing. (In Russ.)

Kozbagarov, R., Zhussupov, K., Zhiyenkozhayev, M., Shalbayev, K., & Kamzanov, N. (2023). Increasing the efficiency of the bulldozer by reducing the energy intensity of the soil cutting process. The Bulletin of KazATC, 1(124), 16–24.

Aluko, O. B., & Seig, D. A. (2000). An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. Soil and Tillage Research, 57(3), 143–157. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00156-2

Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., & Andryukhov, N. (2021). Experimental studies on the interaction process with the environment of an adaptable bulldozer blade with variable geometry. International Review of Mechanical Engineering, 15(11), 554–565. https://doi.org/10.15866/ireme.v15i11.21756

Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., & Andryukhov, N. (2022). Theoretical investigations of the process of interaction with the environment of a bulldozer blade with variable geometry. Journal of Applied Engineering Science, 20(3), 798–807. https://doi.org/10.5937/jaes0-37210

Hu, M., Gao, T., Dong, X., Tan, Q., Yi, C., Wu, F., et al. (2023). Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). Soil and Tillage Research, 229, Article 105671. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671

Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г. и др. (2012). Машины для земляных работ. Конструкция. Расчёт. Потребительские свойства: в 2-х кн. Кн. 1. Экскаваторы и землеройно-транспортные машины: учебное пособие для вузов (2-е изд., стер.; В.И. Баловнев, ред.). Издательство БГТУ // Balovnev, V.I., Glagolev, S.N., Danilov, R.G., et al. (2012). Mashiny dlya zemlyanykh rabot. Konstruktsiya. Raschet. Potrebitel'skie svoystva: v 2-kh kn. Kn. 1. Ekskavatory i zemleroyno-transportnye mashiny [Earthmoving machines. Design, calculation, and consumer properties: In 2 books. Book 1. Excavators and earth-moving-transport machines] (2nd ed.; V. I. Balovnev, Ed.). Izdatel'stvo BGTU. (In Russ.)

Недорезов И. А., & Симонов М. М. (2012). Имитационное моделирование рабочих процессов землеройно-транспортных машин с целью ранжирования их параметров. Вестник ХНАДУ, 57, 63–67 // Nedorezov, I. A., & Simonov, M. M. (2012). Imitatsionnoe modelirovanie rabochikh protsessov zemleroyno-transportnykh mashin s tsel'yu ranzhirovaniya ikh parametrov [Simulation modeling of working processes of earthmoving-transport machines for ranking their parameters]. Vestnik KhNADU [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University], 57, 63–67. (In Russ.)

Кадыров А. С., Муддагалиев З. А., Нурмаганбетов А. С. и др. (2015). Теоретические основы проектирования и расчета бурильных и фрезерных землеройных машин (А. С. Кадыров, ред.). Караганда. // Kadyrov, A. S., Muldagaliev, Z. A., Nurmaganbetov, A. S., et al. (2015). Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rascheta buril'nykh i frezernykh zemleroynykh mashin [Theoretical foundations of design and calculation of drilling and milling earthmoving machines] (A. S. Kadyrov, Ed.). Karaganda. (In Russ.)

Кабашев Р. А. (2014). Грунтовые условия эксплуатации землеройной техники в Казахстане. КазАДИ. // Kabashev, R. A. (2014). Gruntovye usloviya ekspluatatsii zemleroynoy tekhniki v Kazakhstane [Soil conditions for the operation of earthmoving equipment in Kazakhstan]. KazADI. (In Russ.)

Баловнев В.И. (2018). Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. Высшая школа // Balovnev, V.I. (2018). Modelirovanie protsessov vzaimodeystviya so sredoy rabochikh organov dorozhno-stroitel'nykh mashin [Modeling of interaction processes between working bodies of road construction machines and the environment]. Vysshaya shkola. (In Russ.)

Yu, J., Ma, Y., Wang, S., Xu, Z., Liu, X., Wang, H., Qi, H., Han, L., & Zhuang, J. (2022). 3D finite element simulation and experimental validation of a mole rat's digit inspired biomimetic potato digging shovel. Applied Sciences, 12(3), Article 1761. https://doi.org/10.3390/app12031761

Баловнев В. И. (2014). Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты: учебное пособие. МАДИ // Balovnev, V.I. (2014). Opredelenie optimal'nykh parametrov i vybor dorozhno-stroitel'nykh mashin metodom analiza chetvertoy koordinaty [Determination of optimal parameters and selection of road construction machines by the fourth-coordinate analysis method]. MADI. (In Russ.)

Coetzee, C. J. (2014). Discrete and continuum modelling of soil cutting. Computational Particle Mechanics, 1(4), 409–423. https://doi.org/10.1007/s40571-014-0014-7

Haeri, A., Tremblay, D., Skonieczny, K., Holz, B., & Teichmann, M. (2020). Efficient numerical methods for accurate modeling of soil cutting operations. In Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020) (pp. 608–615). https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0085

Карасев Г. Н., Доценко А. И., & Кустарев Г. В. (2012). Машины для земляных работ. Бастет // Karasev, G. N., Dotsenko, A. I., & Kustarev, G. V. (2012). Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Earthmoving machines]. Bastet. (In Russ.)

Сурашов Н.Т., Асматулаев Р.Б., & Толымбек Д.Н. (2021). Определение рациональной формы отвала бульдозера с учетом грунтового фона Республики Казахстан. Вестник СибАДИ, 18(6), 662–677. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677 // Surashov, N.T., Asmatulaev, R.B., & Tolymbek, D. N. (2021). Opredelenie ratsional'noy formy otvala bul'dozera s uchetom gruntovogo fona Respubliki Kazakhstan [Determination of the rational shape of a bulldozer blade considering the soil background of the Republic of Kazakhstan]. Vestnik SibADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 18(6), 662–677. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677 (In Russ.)

Guo, Z., Zhang, S., & Ni, L. (2023). A comprehensive study on the mechanical properties of bulldozing plate soil engaging surface based on the entropy-weighted grey relational analysis method. IEEE Access, 11, 78000–78016. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279263

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Аукенова Бекзат Қабыкенқызы – PhD докторы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Аукенова Бекзат Қабыкенқызы – доктор PhD, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Aukenova Bekzat – PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2724-4447

Айтказина Аяжан Калелхановна – техникалық ғылымдар магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Айтказина Аяжан Калелхановна – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Aitkazina Ayazhan – master of technical sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: aaytkazina@edu.ektu.kz
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6305-4696

Кабдуллина Динара Сайлаубековна – техникалық ғылымдар магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Кабдуллина Динара Сайлаубековна – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Kabdullina Dinara – master of technical sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: DKabdullina@edu.ektu.kz
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8725-1897

Жексембинова Гулим Берикболкызы – техникалық ғылымдар магистрі, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Жексембинова Гулим Берикболкызы – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Zheksembinova Gulim – master of technical sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: GZheksembinova@ektu.com ,
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2540-2948

Leśniewski Tadeusz Teodor – т.ғ.д,, профессор, Вроцлав ғылым және технологиялар университеті, Вроцлав қ., Польша
Leśniewski Tadeusz Teodor – д.т.н., профессор, Вроцлавский университет науки и технологий, г. Вроцлав, Польша
Leśniewski Tadeusz Teodor – Doctor of Technical Sciences, professor, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Wroclaw, Poland
e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1903-3967

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_2
МРНТИ 89.57.21

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА АТМОСФЕРНОМ УЧАСТКЕ ДЕОРБИТАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЯХ

ДЕОРБИТАЦИЯНЫҢ АТМОСФЕРАЛЫҚ КЕЗЕҢІНДЕ ҒАРЫШ АППАРАТЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫН ӘРТҮРЛІ АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ ЖАҒДАЙЛАРДА МОДЕЛЬДЕУ

MODELING THE DYNAMICS OF A SPACECRAFT DURING THE ATMOSPHERIC PHASE OF DEORBITING UNDER VARIOUS AERODYNAMIC CONDITIONS

А.Е. Ашуров [1,3], **Б.Р. Жумажанов** [1], **А.Е. Кулакаева** [1,2*], **А. Зылғара** [4]
[1]ТОО «Ghalam», Астана, Казахстан
[2]Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан
[3]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан
[4]АО «НК «Қазақстан Ғарыш Сапары», Астана, Казахстан
*Автор-корреспондент: Кулакаева Айгуль Ергалиевна, e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

Ключевые слова:
деорбитация, атмосферный вход, космический аппарат, моделирование, ДЗЗ, траектория, аэродинамическое сопротивление

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается модель входа спускаемого с орбиты космического аппарата (КА) в атмосферу, где параметры КА зависят от высоты. Это касается массы, коэффициента лобового сопротивления и площади поперечного сечения. Такой подход позволяет учитывать основные изменения, происходящие с КА при снижении в плотных слоях атмосферы. Эти изменения связаны с нагревом, абляцией и частичной потерей элементов конструкции.

В исследовании анализируются два варианта входа. Первый вариант предполагает, что КА сохраняет свою форму, а второй вариант учитывает разрушение внешних элементов. Для каждого случая выполнены расчеты дальности падения при различных скоростях и углах входа. В результате получены тепловые карты дальности падения КА.

Моделирование показало, что разрушение конструкции приводит к увеличению дальности падения на 25-27 км. Такая закономерность сохраняется во всех рассмотренных случаях. Полученные результаты подтверждают, что даже относительно простая модель учета разрушения КА в атмосфере способна дать существенную разницу в поведениях КА при входе в атмосферу. Такая модель может быть использована для прогнозирования зоны возможного падения и при планировании деорбитации.

Түйінді сөздер:
деорбитация, атмосфераға кіру,

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада орбитадан түсірілетін ғарыш аппаратының (ҒА) атмосфераға кіру моделі қарастырылады, мұнда ҒА параметрлері биіктікке

© 2026 **А.Е. Ашуров, Б.Р. Жумажанов, А.Е. Кулакаева, А. Зылғара**
Данная работа распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ғарыш аппараты, модельдеу, ЖҚЗ, траектория, аэродинамикалық кедергі

тәуелді түрде өзгереді. Бұл, ең алдымен, массаның, тікелей аэродинамикалық коэффициенттің және көлденең қимасының өзгеруін қамтиды. Мұндай тәсіл ҒА тығыз атмосфера қабаттарына кірген кезде орын алатын негізгі өзгерістерді ескеруге мүмкіндік береді. Бұл өзгерістер қызу, абляция және конструкция элементтерінің бір бөлігінің жоғалуы сияқты процестермен байланысты.
Зерттеуде кірудің екі нұсқасы талданады. Бірінші нұсқада ҒА өзінің геометриялық пішінін сақтайды деп болжанылады, ал екінші нұсқада сыртқы элементтердің бұзылуы есепке алынады. Әрбір жағдай үшін әртүрлі жылдамдықтар мен кіру бұрыштарында құлау қашықтығы есептелді. Нәтижесінде ҒА құлау қашықтығының жылулық карталары алынды.
Модельдеу нәтижелері конструкцияның бұзылуы құлау қашықтығын орта есеппен 25–27 км-ге ұлғайтатынын көрсетті. Бұл заңдылық барлық қарастырылған сценарийлерде сақталады. Алынған деректер атмосферада ҒА бұзылуын қарапайым деңгейде ескеретін модельдің өзі де кіру кезіндегі динамикада елеулі айырмашылық тудыратынын дәлелдейді. Мұндай модель ықтимал құлау аймағын болжауда және деорбитацияны жоспарлауда қолдануға жарамды.

keywords:
deorbiting, atmospheric entry, spacecraft, modeling, EO (Earth Observation), trajectory, aerodynamic drag

ABSTRACT
The article examines a model of atmospheric entry for a deorbiting spacecraft (SC), in which key parameters mass, aerodynamic drag coefficient, and cross-sectional area vary with altitude. This allows the model to capture the main changes occurring as the SC descends into denser atmospheric layers, including heating, ablation, and partial structural loss.
Two entry scenarios are considered. The first assumes that the SC preserves its external shape, while the second includes the destruction of outer components. For both cases, downrange distances were calculated at different entry velocities and flight-path angles, resulting in thermal maps of the predicted impact range.
The modeling shows that structural breakup increases the downrange distance by about 25–27 km, a trend observed in all scenarios. The results demonstrate that even a simplified breakup model can significantly affect entry dynamics and may be used to predict impact footprints and support deorbiting planning.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс деорбитации космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли требует точного моделирования фаз атмосферного входа, поскольку в этот момент движение аппарата значительно изменяется под воздействием аэродинамических сил и тепловых нагрузок. Важно понимать, как КА будет вести себя при входе в плотные слои атмосферы. На этом этапе увеличиваются аэродинамические нагрузки и температура, что приведет к частичному или полному разрушению конструкции. Эти факторы влияют на траекторию спуска и, соответственно, на место падения обломков. Поэтому возможность более точно прогнозировать движение КА является важной практической задачей.

Казахстан активно развивает космические технологии и намерен укрепить свои позиции в мировой космической отрасли к 2030 году (Стратегия «Казахстан-2050», 2024). Спутники KazEOSat-1 и KazEOSat-2 достигли предела своего расчетного срока службы. Несмотря на продление срока их эксплуатации, в будущем необходимо будет организовать их утилизацию в соответствии с международными стандартами по снижению космического мусора (International Organization for Standardization, 2023).

Существует множество аэродинамических методов деорбитации, включая мембранные и квадратные паруса, а также пирамидальные конструкции (Ruonan et al., 2024; Niccolai L et al., 2024; Zhang et al., 2022). Эти подходы увеличивают площадь КА и усиливают воздействие с атмосферой, однако их применение связано с проблемами обеспечения устойчивой ориентации, надежности материалов и ограниченным числом орбитальных экспериментов. Надувные конструкции являются еще одним вариантом для увеличения аэродинамического сопротивления (Xu et al., 2024; Olave et al., 2023; Caqueo et al., 2024), но и они сталкиваются с вопросами устойчивости, развертывания и защиты от микрометеоритов. Применение электродинамических тросов рассматривается как эффективный способ деорбитации без использования топлива (Xiao et al., 2020; Sarego et al., 2021), но такие системы требуют уточнения моделей взаимодействия троса с плазмой и космической средой.

Таким образом, становится ясно, что универсального решения для деорбитации нет. В работе (Janovsky et al., 2014) собраны базовые подходы, но на практике они не всегда работают для КА со своей спецификой. Опыт Iridium, описанный (Everetts et al., 2020), как раз показывает, что маленькие отклонения в конструкции или остаточном топливе сильно влияют на итоговую траекторию. Поэтому приходится ориентироваться не только на общие рекомендации, но и на реальные данные. Например, те, что публикует (NASA Orbital Debris Program Office). Европейские материалы (ESA Space Debris Office) тоже помогают понять, как могут оцениваться риски и зоны падения.

Анализ показывает, что существующие методы не всегда подходят для КА со специфическими характеристиками. Поэтому разработка собственного метода деорбитации является актуальной задачей. Такой подход обеспечивает управляемый и безопасный свод КА с учетом его технических параметров и доступного ресурса топлива. Создание национального метода способствует укреплению инженерных компетенций, повышает технологическую независимость и позволяет соответствовать международным стандартам по снижению космического мусора (IADC Space Debris Mitigation Guidelines, 2025; Manhire et al., 2020).

Во многих работах используются сложные модели, требующие большого объема данных и детального описания конструкции. Однако на практике часто необходимо более простое решение, позволяющее быстро получить основные параметры движения и оценить влияние изменений массы, площади и коэффициента сопротивления на траекторию при спуске.

В данной работе рассматривается упрощенная модель атмосферного входа, в которой основные параметры КА изменяются с высотой. Также сравниваются два варианта поведения: вход КА в атмосферу целиком (без разрушения) и с разрушением КА. На основе расчетов оценивается, как эти изменения влияют на дальность падения и насколько результаты чувствительны к начальному углу входа и скорости.

Актуальность исследования обусловлена участившимися случаями неконтролируемого схода космических аппаратов с орбиты. Подтверждением тому служит инцидент, произошедший в феврале 2022 года, когда компания SpaceX потеряла около 40 спутников Starlink из-за геомагнитной бури. Резкое увеличение плотности атмосферы привело к повышенным аэродинамическим нагрузкам, в результате чего аппараты не смогли выйти из безопасного режима и преждевременно вошли в плотные слои атмосферы. Этот случай демонстрирует, что даже прогнозируемые факторы окружающей среды способны существенно влиять на траекторию движения аппарата, что обусловливает необходимость максимально точного моделирования этапов входа в атмосферу. Крайне важно понимать, как изменение параметров аппарата, таких как масса, площадь поперечного сечения и коэффициент аэродинамического сопротивления, влияет на его траекторию для обеспечения безопасности полетов и соблюдения международных стандартов по минимизации космического мусора (Baruah et al., 2024).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использован метод численного моделирования движения КА в атмосфере Земли. Модель основана на системе дифференциальных уравнений, описывающих изменение скорости, высоты, угла движения и горизонтальной дальности со временем. Для расчетов использована Международная стандартная атмосфера, что позволяет учитывать изменение плотности воздуха в зависимости от высоты. В расчетной модели поперечное сечение КА принято прямоугольным. На его основе определялась эффективная площадь, используемая при расчете аэродинамического сопротивления. На каждом шаге вычислялись значения скорости, высоты, угла и горизонтальной дальности. Исходные данные для моделирования представлены в таблице 1. Рассматривается баллистический спуск КА (Cy=0), траектория которого определяется балансом силы тяжести и аэродинамического сопротивления. Скорость входа в плотные слои атмосферы (на высоте 100 км) варьируется в диапазоне 7780–7830 м/с. Направление входа задается углом θ_c между вектором скорости и местным горизонтом; границы вариации этого угла составляют от –0,9° до –1,4°. Данные интервалы позволяют оценить влияние неопределенностей начальных условий на конечную дальность падения L (рисунок 1).

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
Масса КА (m_0), кг	830
Площадь поперечного сечения ($S_м$), м²	2
Аэродинамический коэффициент сопротивления (C_d)	2,2
Подъемный коэффициент (C_y)	0
Начальная скорость (V_0), м/с	7800
Начальный угол движения (θ_0), град	–1
Начальная высота (h), м	100 000
Начальная горизонтальная дальность (L_0), м	0
Ускорение свободного падения (g), м/с²	9,81
Средний радиус Земли (R), м	6 371 000
Пороговая высота, ниже которой параметры начинают изменяться (h_0), км	70
Минимальная масса ($m_{min} = 0{,}4 \cdot m_0$), кг	332,5
Минимальная площадь S_{min}, м²	1
Минимальный коэффициент сопротивления ($C_{d,min}$)	1,8

Примечание – составлено авторами

Рисунок 1. Схема траектории входа КА в атмосферу Земли

Примечание – составлено авторами

Значения минимальной массы и площади выбраны исходя из компоновочной схемы КА. Минимальная масса (m_{min}=332,5кг) соответствует массе наиболее прочного гермокорпуса и внутренних систем, которые сохраняются после абляции наружных покрытий. Минимальная площадь (S_{min}=1м²) принята как площадь поперечного сечения центрального блока КА после разрушения солнечных панелей и антенн на высотах ниже 70 км.

При входе КА в плотные слои атмосферы его масса, аэродинамический коэффициент сопротивления и площадь поперечного сечения могут изменяться. Это связано с абляцией, термическим разрушением и деформацией конструкции. Ниже представлены математические модели зависимости этих параметров от высоты.

1. Масса космического аппарата моделируется как функция высоты. Выше пороговой высоты h_0 масса считается постоянной, а ниже нее уменьшается по экспоненциальному закону с коэффициентом затухания λ_m:

$$m(h) = \begin{cases} m_0, & h > h_0 \\ m_0 - (m_0 - m_{\min}) \cdot (1 - e^{-\lambda_m (h_0 - h)}), & h \le h_0 \end{cases} \quad (1)$$

2. Коэффициент сопротивления принимается постоянным на разреженных высотах и уменьшается после входа в плотные слои атмосферы. Ниже пороговой высоты h_0 изменение $C_d(h)$ описывается экспоненциальным законом с коэффициентом затухания λC_d:

$$C_d(h) = \begin{cases} C_{d,0}, & h > h_0 \\ C_{d,0} - (C_{d,0} - C_{d,min}) \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{C_d}(h_0 - h)}\right), & h \le h_0 \end{cases} \quad (2)$$

3. Площадь лобовой поверхности моделируется как кусочно-непрерывная функция. На высотах выше h_0 площадь остается постоянной $S(h)=S_0$, ниже, h_0 экспоненциально стремится к S_{min} с коэффициентом λ_S:

$$S(h) = \begin{cases} S_0, & h > h_0 \\ S_0 - (S_0 - S_{\min}) \cdot (1 - e^{-\lambda_S (h_0 - h)}), & h \le h_0 \end{cases} \quad (3)$$

4. Баллистический коэффициент показывает, насколько хорошо аппарат пробивает атмосферу. Он уменьшается при снижении высоты, потому что масса убывает, а коэффициент сопротивления и эффективная площадь меняются. Поскольку все параметры задаются как функции высоты, B(h) также рассчитывается как функция высоты:

$$B(h) = \frac{m(h)}{C_d(h) * S(h)} \quad (4)$$

Параметры λ_m, λ_{Cd}, λ_S являются коэффициентами затухания, определяющими скорость перехода соответствующих характеристик от их номинальных значений (m_0, $C_{d,0}$, S_0) к минимальным значениям (m_{min}, Cd_{min}, S_{min}) при снижении ниже пороговой высоты h_0. Чем больше значение коэффициента λ, тем быстрее происходит изменение параметра в плотных слоях атмосферы. Типичное значение λ = 0,2 соответствует изменению параметра примерно на 95% за 15 км снижения.

Так как это модельные расчеты, а не анализ конкретного случая из практики, минимальная масса и минимальная площадь взяты в качестве примера. Они для разных КА разные, и нельзя их заранее определить для всех типов КА. При применении предлагаемого здесь подхода к конкретному КА необходимо будет принимать соответствующие значения этих величин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После определения границ этапов деорбитации и установления начальной высоты КА необходимо перейти к расчетам для атмосферного участка деорбитации. Данный этап можно разделить на несколько частей в зависимости от характеристик КА. Например, деорбитация может осуществляться постепенно с использованием двигательной установки малой тяги на борту или разделена на активные и пассивные фазы. Последний вариант определяется количеством топлива, необходимым для обеспечения активной деорбитации КА на внеатмосферном участке.

Система уравнений, описывающих движение КА в атмосфере Земли, в общем случае выглядит следующим образом:

$$m\frac{dV}{dt} = -C_d S_M \frac{\rho V^2}{2} - mg \cdot \sin\theta \tag{5}$$

$$mV\frac{d\theta}{dt} = -C_y S_M \frac{\rho V^2}{2} + \frac{mV^2}{R+h}\cos\theta - mg \cdot \cos\theta \tag{6}$$

$$\frac{dh}{dt} = V\sin\theta \tag{7}$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{VR\cos\theta}{R+h}. \tag{8}$$

где m – масса КА (кг), V – скорость (м/с), C_d, C_y – аэродинамический коэффициент сопротивления вдоль движения и подъемный коэффициент в перпендикулярном направлении, S_M – площадь поперечного сечения КА (м²), ϱ – плотность воздуха (кг/м³), g – ускорение свободного падения (м/с²), θ – угол между горизонтом и вектором скорости (рад), h – высота над поверхностью Земли (м), L – горизонтальная дальность с точки входа в атмосферу Земли (м), R – средний радиус Земли (м). Используемые обозначения и система уравнений соответствуют классической баллистической модели атмосферного входа [Allen et al., 1958] и приведены, в частности, в работе [Иванов et al., 2016].

Система уравнений, описывающая динамику КА на атмосферном участке, имеет следующий вид:

$$\dot{V} = -\frac{1}{m}X - g\sin\theta; \tag{9}$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{Vm}Y + \frac{V}{R+h}\cos\theta - \frac{g\cdot\cos\theta}{V}; \tag{10}$$

$$\frac{dh}{dt} = V\sin\theta; \tag{11}$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{VR\cos\theta}{R+h}, \tag{12}$$

где $X = C_d\frac{\rho V^2}{2}S$ – аэродинамическая сила сопротивления, $Y = C_y\frac{\rho V^2}{2}S$ – подъемная сила.

Для вычисления плотности на высоте h использована Международная стандартная атмосфера Земли. На уровне Земли плотность ϱ_0=1,225 кг/м³.

На рисунке 2 показана зависимость массы КА от высоты во время атмосферного входа. В модели предполагается, что до достижения высоты около 70 км конструкция КА остается практически неизменной, и его масса сохраняется на уровне примерно 830 кг.

После входа в более плотные слои атмосферы начинается интенсивное аэродинамическое нагревание и абляция наружных элементов, что приводит к постепенной потере материала и снижению массы. В результате масса КА экспоненциально уменьшается и к нулевой высоте достигает значения примерно 332,5 кг, что отражает характерные физические процессы разрушения и сгорания конструктивных компонентов при высокотемпературном входе в атмосферу.

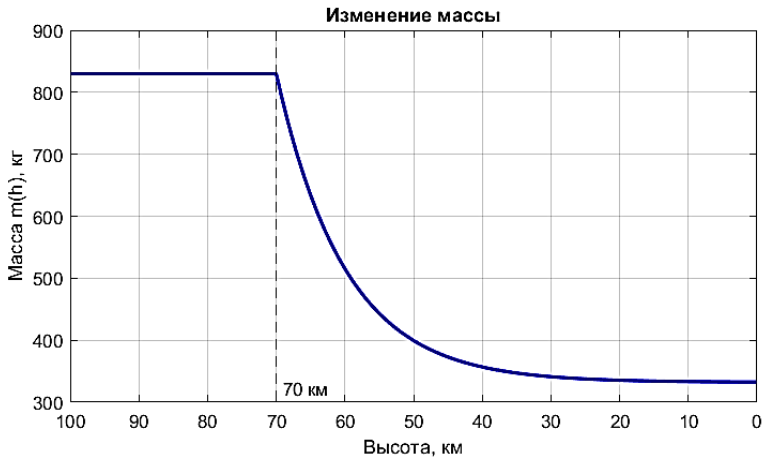


Рисунок 2. Зависимость массы КА от высоты при входе в атмосферу
Примечание – составлено на основе моделирования в MatLab

Представленная зависимость показывает, в рамках принятой модели на высотах выше 70 км масса КА остается постоянной. Однако по мере входа в более плотные слои атмосферы начинается интенсивное тепловое и аэродинамическое воздействие, что приводит к постепенному выгоранию покрытия, оплавлению наружных элементов и потере конструктивных деталей. Эти процессы проявляются в виде экспоненциального снижения массы, которое продолжается до достижения нулевой высоты. Такой характер изменения массы соответствует типичному поведению КА при неконтролируемом входе и является важным фактором, влияющим на дальнейшую динамику траектории и эффективность торможения в атмосфере.

На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента лобового сопротивления $C_d(h)$ КА от высоты в процессе входа в атмосферу. В модели предполагается, что до достижения высоты около 70 км аэродинамическая конфигурация КА остается неизменной, и коэффициент сопротивления соответствует исходному значению. Однако при снижении ниже этой высоты форма КА начинает изменяться из-за нагрева, разрушения выступающих элементов и изменения ориентации в потоке.

График показывает, что на участке от 100 до 70 км коэффициент лобового сопротивления остается постоянным и равным C_d=2,2. Это связано с неизменной геометрией и ориентацией КА в условиях разреженной атмосферы. На высоте примерно 70 км начинается интенсивное аэродинамическое воздействие, которое приводит к деформации внешних элементов конструкции, их частичному отделению и изменению направления потоков вокруг корпуса. В результате коэффициент сопротивления быстро снижается и стабилизируется на уровне C_d≈1,8. Такое поведение полностью соответствует типичным процессам разрушения и «уплотнения» формы КА при входе в плотные слои атмосферы. Снижение коэффициента сопротивления свидетельствует о переходе к более обтекаемой конфигурации, что влияет на характер торможения и увеличивает чувствительность дальности падения к изменениям геометрических параметров.

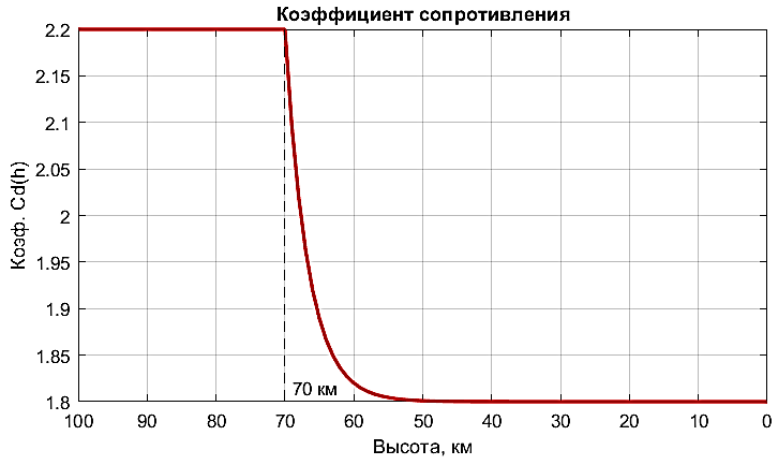


Рисунок 3. Зависимость коэффициента лобового сопротивления КА от высоты при входе в атмосферу

Примечание – составлено на основе моделирования в MatLab.

На рисунке 4 представлена модельная зависимость площади поперечного сечения КА от высоты в процессе атмосферного входа. Предполагается, что до высоты около 70 км геометрическая конфигурация КА остается неизменной, и его эффективная аэродинамическая площадь остается постоянной. Ниже этой высоты начинается интенсивное воздействие аэродинамических нагрузок и тепловых потоков, что приводит к разрушению выступающих конструктивных элементов и уменьшению фронтальной площади корпуса.

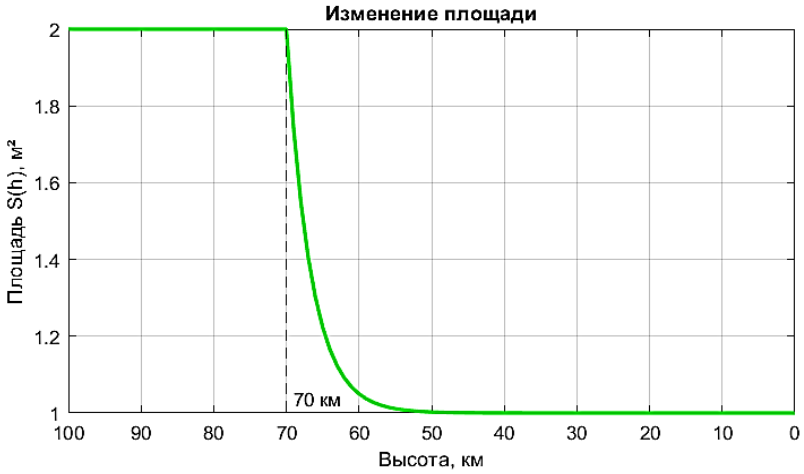


Рисунок 4. Зависимость площади поперечного сечения КА от высоты при атмосферном входе

Примечание – составлено на основе моделирования в MatLab

График показывает, что до высоты 70 км площадь поперечного сечения КА остается почти неизменной на уровне $S_м$=2 м². Это соответствует этапу движения в разреженной атмосфере, где аэродинамические нагрузки малы и не оказывают значительного влияния на форму и конфигурацию КА.

Ниже 70 км начинается быстрое и почти экспоненциальное уменьшение площади. К высоте около 55–50 км площадь снижается примерно в 2 раза с $S_м$=2м² до $S_м$≈1м², а при дальнейшем снижении стабилизируется на этом уровне. Такое резкое уменьшение связано

с разрушением внешних элементов конструкции, солнечных панелей, антенн, креплений и других выступающих частей, которые первыми теряют структурную целостность под воздействием теплового нагрева и высоких аэродинамических давлений.

Снижение площади имеет значение для моделирования траектории, так как приводит к уменьшению аэродинамического торможения, что в свою очередь влияет на скорость, высоту и дальность падения КА. Данный эффект в дальнейшем проявляется в формировании пика баллистического коэффициента и увеличении дальности для сценариев с разрушением корпуса.

На рисунке 5 представлена зависимость баллистического коэффициента $B(h)$ КА от высоты во время атмосферного входа. Поскольку баллистический коэффициент является интегральным показателем, который отражает влияние массы, аэродинамического сопротивления и площади поперечного сечения на торможение КА, изменение этого коэффициента играет важную роль в определении траектории и дальности падения. В модели учитывается сочетание экспоненциального уменьшения массы и резкого снижения коэффициента сопротивления и площади на высотах ниже 70 км.

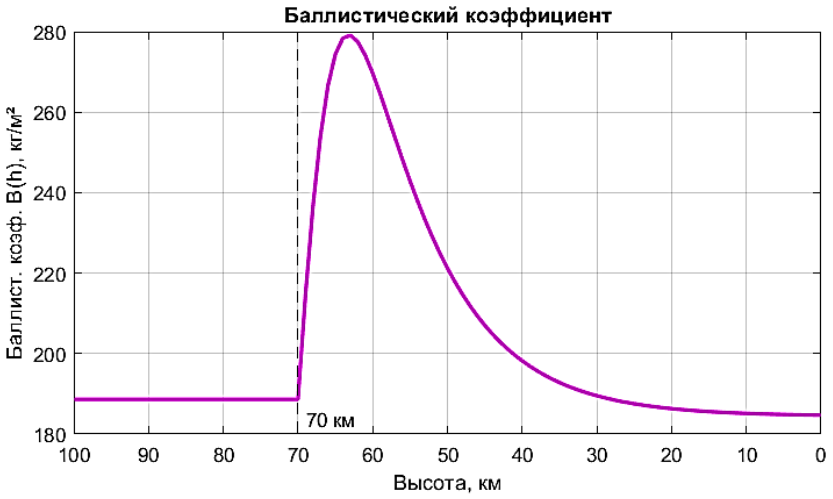


Рисунок 5. Баллистический коэффициент КА как функция высоты при атмосферном входе

Примечание – составлено на основе моделирования в MatLab

График показывает, что в диапазоне высот от 100 до 70 км баллистический коэффициент остается практически неизменным, составляя около 190 кг/м². Это свидетельствует о стабильных аэродинамических параметрах КА в условиях разреженной атмосферы. Однако при снижении ниже 70 км начинается резкое перераспределение параметров. Масса уменьшается постепенно, в то время как коэффициент сопротивления и площадь поперечного сечения снижаются значительно быстрее.

В результате знаменатель выражения $C_d(h)\,S(h)$ уменьшается быстрее, чем масса, что приводит к резкому росту баллистического коэффициента и формированию выраженного пика в диапазоне 269–275 кг/м² на высоте примерно 60–63 км. Такой пик отражает кратковременное увеличение способности КА сохранять скорость и противостоять аэродинамическому торможению.

Ниже 60 км продолжающееся снижение массы начинает доминировать над изменениями площади и коэффициента сопротивления, в результате чего баллистический коэффициент постепенно снижается и стремится к значениям порядка 185–190 кг/м² у поверхности.

Такой профиль B(h) играет важную роль в моделировании траектории: увеличение баллистического коэффициента приводит к уменьшению торможения и, следовательно, к увеличению дальности падения, особенно в сценариях с разрушением конструкции. Этот эффект затем проявляется в различиях дальности L между двумя моделями входа.

Таблица 2 демонстрирует изменение основных аэродинамических параметров КА во время его снижения в атмосферу. Как видно, до высоты 70 км параметры остаются постоянными: масса составляет 830 кг, коэффициент лобового сопротивления C_d=2,2, площадь поперечного сечения составляет S_M=2 м², а баллистический коэффициент поддерживается на уровне 188,6 кг/м². Это соответствует фазе движения в разреженной атмосфере, где аэродинамические нагрузки не оказывают значительного влияния на конструкцию КА.

Таблица 2. Параметры КА на различных высотах

h, км	*m*, кг	C_d	S_M, м²	*B*, кг/м²
100	830	2,2	2	188,6
70	830	2,2	2	188,6
60	515,2	1,82	1,05	269,7
50	399,4	1,8	1	221,9
40	356,8	1,8	1	198,2
30	341,1	1,8	1	189,5
20	335,4	1,8	1	186,3
10	333,2	1,8	1	185,1
0	332,5	1,8	1	184,7
Примечание – составлено авторами				

При снижении высоты ниже 70 км начинается фазовый переход параметров, вызванный увеличением плотности воздуха и ростом аэродинамического нагрева. Масса КА постепенно уменьшается вследствие абляции и разрушения наружных элементов корпуса, достигая 332–340 кг близко к поверхности. Коэффициент сопротивления снижается до значений 1,80–1,82, что отражает переход к более компактной и обтекаемой форме после потери выступающих элементов. Площадь поперечного сечения уменьшается до 1–1,05 м² по той же причине.

Наиболее заметные изменения наблюдаются в динамике баллистического коэффициента B. На высоте около 60 км он достигает максимального значения примерно 269–275 кг/м², что связано с одновременным уменьшением площади и коэффициента сопротивления при достаточно большой массе КА. Затем B постепенно снижается по мере дальнейшей потери массы.

Трансформация параметров определяет характер аэродинамического торможения и влияет на дальность падения КА. Представленные данные служат основой для расчетов траектории входа и анализа различий между сценариями с разрушением и без него.

В таблицах 3 и 4 результаты расчетов разности дальности падения L без учета разрушения КА в атмосфере и с учетом.

На рисунке 6 представлена тепловая карта значений разности дальности падения КА, вычисленной для различных комбинаций начальной скорости V_0 и угла входа θ. Такой подход позволяет наглядно оценить, как траектория атмосферного входа реагирует на изменения аэродинамических параметров, а также определить, насколько существенно разрушение конструкции влияет на конечную дальность падения.

Таблица 3. Дальность падения L (км) без учета разрушения КА в атмосфере

θ	V_0	7780	7790	7800	7810	7820	7830
-0,9		1901.7	1915,9	1930,5	1945,4	1960,6	1976,3
-1,0		1825.2	1837,8	1850,8	1864,0	1877,4	1891,2
-1,1		1754.6	1765,9	1777,4	1789,1	1801,1	1813,3
-1,2		1689.3	1699,4	1709,7	1720,2	1730,9	1741,8
-1,3		1628.7	1637,9	1647,1	1656,5	1666,1	1675,8
-1,4		1572.4	1580,7	1589,0	1597,5	1606,1	1614,9
Примечание – составлено авторами							

Таблица 4. Дальность падения L (км) с учетом разрушения КА в атмосфере

θ	V_0	7780	7790	7800	7810	7820	7830
-0,9		1927,5	1941,9	1956,6	1971,7	1987,2	2003,0
-1,0		1850,9	1863,8	1876,9	1890,3	1904,0	1917,9
-1,1		1780,3	1791,8	1803,5	1815,4	1827,6	1840,0
-1,2		1714,8	1725,1	1735,7	1746,4	1757,3	1768,3
-1,3		1654,0	1663,4	1672,8	1682,5	1692,3	1702,2
-1,4		1597,5	1605,9	1614,5	1623,2	1632,0	1641,0
Примечание – составлено авторами							

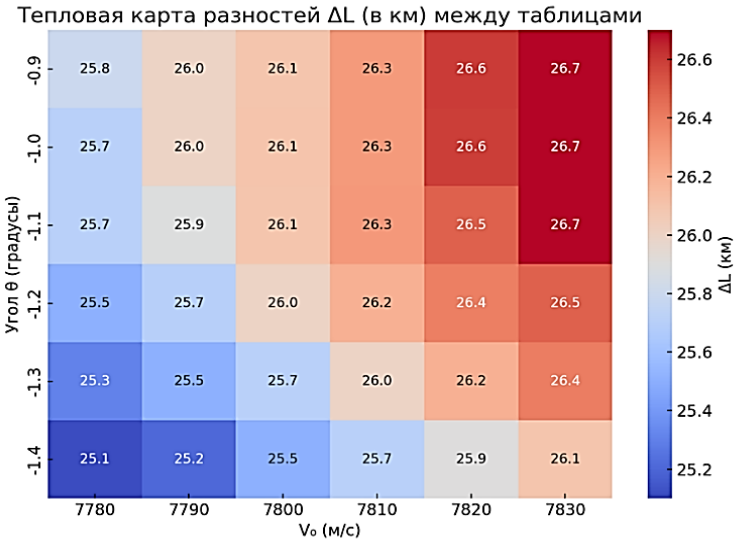


Рисунок 6. Тепловая карта разности дальности падения ΔL между сценариями с разрушением и без разрушения

Примечание – составлено на основе моделирования в MatLab

Тепловая карта показывает, что разность дальности падения ΔL находится в узком диапазоне от 25,1 до 26,7 км для всех сочетаний начальных условий. Независимо от начальной скорости V_0 (7780–7830 м/с) и угла входа θ (от –0,9 до –1,4°), разрушение конструкции приводит к увеличению дальности падения примерно на 25–27 км. Такой стабильный характер указывает на то, что влияние разрушения проявляется одинаково для широкого диапазона условий входа.

Наибольшие значения ΔL≈26,6–26,7 км наблюдаются при более высоких начальных скоростях (V_0≥7820 м/с) и небольших углах входа (–0,9…–1,0°). В таких случаях замедление КА наиболее эффективно компенсируется уменьшением площади и коэффициента сопротивления после разрушения, что приводит к увеличению пройденной дальности.

Минимальные значения ΔL≈25,1–25,3 км соответствуют более крутым углам входа и меньшим скоростям, когда у КА меньше времени для проявления эффекта уменьшенного торможения.

В целом карта демонстрирует, что разрушение корпуса систематически влияет на траекторию, увеличивая дальность падения почти на постоянную величину. Это подчеркивает необходимость учета подобных процессов при моделировании неконтролируемого входа КА и при оценке зон возможного падения фрагментов.

На рисунке 7 показаны зависимости дальности падения КА L от начальной скорости входа V_0 при различных углах наклона траектории θ. Для каждого угла показаны две кривые: одна отражает сценарий без разрушения конструкции, а другая сценарий с разрушением. Такое сопоставление позволяет оценить влияние изменений аэродинамических параметров на траекторию и выяснить, как модернизированная форма КА после разрушения влияет на его эффективное торможение в атмосфере.

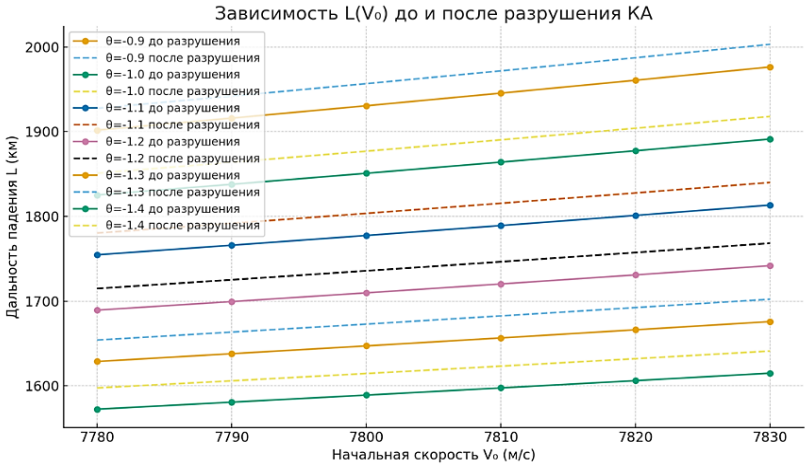


Рисунок 7. Зависимость дальности падения L(V_0) от начальной скорости до и после разрушения КА

Примечание – составлено на основе моделирования в MatLab

График показывает четкую линейную зависимость дальности падения L от начальной скорости входа V_0 для всех рассматриваемых углов θ = -0,9…-1,4°. С увеличением скорости дальность падает практически равномерно, что свидетельствует о росте кинетической энергии КА и сокращении времени, в течение которого аэродинамические силы могут его затормозить.

Для каждого угла входа видно, что кривые, соответствующие сценарию с разрушением конструкции (пунктирные линии), находятся выше кривых без разрушения (сплошные линии). Это свидетельствует о том, что после разрушения корпуса КА проходит на 25–27 км дальше, чем при сохранении исходной геометрии. Такой результат согласуется с наблюдаемым увеличением баллистического коэффициента и снижением аэродинамического сопротивления после разрушения внешних элементов.

Разница между двумя сценариями остается практически постоянной на всех скоростях, что подтверждают выводы, основанные на тепловой карте ΔL. При более пологих углах входа (например, θ=–0,9°) дальность достигает максимальных значений,

свыше 1950–2000 км. В то же время при более крутых углах (θ=−1,4°) дальность снижается до 1600–1700 км. Это связано с усилением вертикального компонента скорости и более быстрым входом в плотные слои атмосферы.

Зависимость $L(V_0)$ подчеркивает важность учета постразрушительных аэродинамических параметров при моделировании неконтролируемого входа. Даже незначительные изменения в геометрии корпуса могут приводить к значительным различиям в конечной точке падения.

Таблица 5 показывает, что разность дальности падения ΔL для всех сочетаний угла входа и начальной скорости остается практически постоянной и составляет 25–27 км. Это указывает на то, что разрушение конструкции стабильно увеличивает дальность падения, независимо от исходных условий входа. Максимальные значения ΔL зафиксированы при более высоких скоростях V_0, однако общий разброс остается незначительным, что подтверждает устойчивость этого эффекта.

Таблица 5. Разность дальности падения ΔL для различных углов входа и начальных скоростей V_0

θ°/V_0 (м/с)	7780	7790	7800	7810	7820	7830
-0,9	25,8	26.0	26,1	26,3	26,6	26,7
-1,0	25,7	26,0	26,1	26,3	26,6	26,7
-1,1	25,7	25,9	26,1	26,3	26,5	26,7
-1,2	25,5	25,7	26,0	26,2	26,4	26,5
-1,3	25,3	25,5	25,7	26,0	26,2	26,4
-1,4	25,1	25,2	25,5	25,7	25,9	26,1
Примечание – составлено авторами						

Полученные результаты показывают, что основные изменения в движении КА происходят после входа в плотные слои атмосферы. На этом этапе масса, коэффициент лобового сопротивления и площадь поперечного сечения начинают быстро уменьшаться, что приводит к увеличению баллистического коэффициента. Этот рост временно снижает эффективность аэродинамического торможения и влияет на дальнейшую траекторию спуска.

Важно отметить, что, несмотря на упрощенный характер модели, зависимость дальности падения от начальных условий остается линейной и предсказуемой. Это подтверждает, что даже простая высотно-зависимая модель параметров может быть использована для оценки зоны падения в практических задачах деорбитации. Результаты также подчеркивают необходимость учета возможного разрушения конструкции, так как оно оказывает заметное влияние на конечную точку падения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была рассмотрена модель атмосферного входа КА, в которой масса, коэффициент лобового сопротивления и площадь поперечного сечения изменяются в зависимости от высоты. Такой подход наглядно показывает, как трансформация аэродинамических параметров влияет на процесс торможения и дальность падения КА.

Результаты расчетов показали, что основные изменения происходят при высоте около 70 км. Масса КА начинает уменьшаться, его форма становится более обтекаемой, а площадь поперечного сечения значительно сокращается. В совокупности это приводит к временному увеличению баллистического коэффициента, что существенно влияет на траекторию спуска.

Сравнение двух сценариев без разрушения и с разрушением конструкции показало, что разрушение стабильно увеличивает дальность падения на 25–27 км независимо от скорости входа и угла траектории. Такой устойчивый эффект свидетельствует о том, что изменение аэродинамических параметров имеет решающее значение для прогноза зоны падения.

В целом проведенный анализ подтверждает, что даже при использовании относительно простой модели можно получить важные оценки поведения спутника при входе в атмосферу. Такой подход может быть полезен в практических задачах деорбитации, когда необходимо быстро и надежно оценить параметры движения и возможные районы падения КА.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR27198365 «Разработка оптикоэлектронной системы в коротковолновой инфракрасной области спектра в контексте развития космических систем ДЗЗ Казахстана»).

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В подготовке данной рукописи инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства. (2012). Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет»; по состоянию на 10.10.2024. https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1200002050 // Strategiya “Kazakhstan-2050”: novyy politicheskiy kurs sostoyavshegosya gosudarstva [Strategy “Kazakhstan-2050”: New political course of the established state]. (2012). Informatsionno-pravovaya sistema normativnykh pravovykh aktov Respubliki Kazakhstan “Adilet”; as of 10.10.2024. https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1200002050 (In Russ.)

International Organization for Standardization. (2023). Space systems: Space debris mitigation requirements (ISO 24113:2023(E), 4th ed.). International Organization for Standardization.

Zhang, R., Yang, K., Zhang, J., & Bi, S. (2024). Overview and key technology of the membrane drag sail for low Earth orbit satellite deorbit. Space: Science & Technology, 4, Article 0115. https://doi.org/10.34133/space.0115

Niccolai, L., & Mengali, G. (2024). Performance estimate of a spin-stabilized drag sail for spacecraft deorbiting. Applied Sciences, 14(2), Article 612. https://doi.org/10.3390/app14020612

Zhang, J., Zhang, R., & Yang, K. (2022). Attitude stability analysis and configuration design of pyramid drag sail for deorbit missions. Journal of Aerospace Engineering, 35(6), Article 04022084.

Xu, Y., et al. (2024). Numerical simulation of rigid-flexible coupled dynamics for an inflatable sphere deorbiting device. Advances in Space Research, 74(1), 373–383.

Olave, D. R., et al. (2023). Inflatable aerodynamic decelerator for CubeSat reentry and recovery: Altitude effects on the flowfield structure. Aerospace Science and Technology, 138, Article 108358.

Caqueo, N., et al. (2024). Inflatable aerodynamic decelerators for CubeSat reentry and recovery: Surface properties. Aerospace Science and Technology, 149, Article 109151.

Xiao, H., Huang, J., Liu, G., & Lv, Y. (2020). Space environment modeling and deorbiting efficiency analysis for electro-dynamic tether system. In 2020 Chinese Control and Decision

Conference (CCDC) (pp. 5063–5067). IEEE. https://doi.org/10.1109/CCDC49329.2020.9164373

Sarego, G., Olivieri, L., Valmorbida, A., et al. (2021). Deployment requirements for deorbiting electrodynamic tether technology. CEAS Space Journal, 13, 567–581. https://doi.org/10.1007/s12567-021-00349-5

Janovsky, R., Kassebom, M., Lübberstedt, H., & Romberg, O. (2014). End-of-life de-orbiting strategies for satellites.

Everetts, W., Rock, K., & Iovanov, M. (2020). Iridium deorbit strategy, execution, and results (pp. 351–357).

NASA Orbital Debris Program Office. (n.d.). NASA orbital debris program office. Retrieved November 12, 2025, from https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/

ESA Space Debris Office. (n.d.). Space debris. Retrieved February 1, 2025, from https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris

Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. (2025). IADC space debris mitigation guidelines (IADC-02-01, Rev. 4). IADC Steering Group and Working Group 4.

Manhire, V. (Ed.). (2019). United Nations handbook 2019–2020 (pp. 58–60). Ministry of Foreign Affairs and Trade of New Zealand. ISSN 0110-1951.

Baruah, Y., Roy, S., Sinha, S., Palmerio, E., Pal, S., Oliveira, D. M., & Nandy, D. (2024). The loss of Starlink satellites in February 2022: How moderate geomagnetic storms can adversely affect assets in low-Earth orbit. Space Weather, 22(4), Article e2023SW003716.

Allen, H. J., & Eggers, A. J., Jr. (1958). A study of the motion and aerodynamic heating of ballistic missiles entering the earth's atmosphere at high supersonic speeds (NACA-TR-1381). National Advisory Committee for Aeronautics.

Иванов Н. М., & Лысенко Л. Н. (2016). Баллистика и навигация космических аппаратов. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. // Ivanov, N. M., & Lysenko, L. N. (2016). Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov [Ballistics and navigation of spacecraft]. Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Ашуров Абдикул Еркулович – «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

Ашуров Абдикул Еркулович – профессор кафедры «Космическая техника и технологии», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан.

Ashurov Abdikul – professor of the «Space Engineering and Technologies» department, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

e-mail: ae_ashurov@yahoo.com,

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6044-5579

Жумажанов Берик Рахымбекович – «Ghalam» ЖШС, пайдалы жүктеме және ғылыми әзірлемелер бөлімінің басшысы, Астана қ., Қазақстан
Жумажанов Берик Рахымбекович – руководитель отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam», г. Астана, Казахстан
Zhumazhanov Berik – head of the Payload and R&D Department, «Ghalam» LLP, Astana, Kazakhstan
e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5926-9619,

Кулакаева Айгуль Ергалиевна – «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан.
Кулакаева Айгуль Ергалиевна – ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан.
Kulakayeva Aigul – associate Professor of the «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications» department, International Information University, Almaty, Kazakhstan.
e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0143-085X,

Зылғара Айгерим Ерболовна – «Қазақстан Ғарыш Сапары» Ұлттық компаниясы АҚ Ғарыштық жүйелер департаментінің инженері, Астана қ., Қазақстан
Зылғара Айгерим Ерболовна – инженер Департамента космических систем АО НК «Қазақстан Ғарыш Сапары», г. Астана, Казахстан
Zylgara Aigerim – engineer, Department of Space Systems, JSC “NC Kazakhstan Gharysh Sapary”, Astana, Kazakhstan.
E-mail: zylgara@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9916-8685.

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_3
ХҒТАР 55.33.41

ҰСАҚТАЛАТЫН МАТЕРИАЛҒА ҚАРАМА-ҚАРСЫ ӘСЕР ЕТЕТІН ЭНЕРГИЯ КЕРНЕУЛІ СОҚҚЫЛЫ ҰНТАҚТАҒЫШТАРДА ЖҰҚА ҰНТАҚТАУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ЭНЕРГОНАПРЯЖЕННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ СО ВСТРЕЧНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ИЗМЕЛЬЧАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

IMPROVING THE EFFICIENCY OF FINE GRINDING IN ENERGY-INTENSIVE IMPACT MILLS WITH COUNTER-IMPACT ACTION ON THE MATERIAL BEING GROUND

Г.А. Гурьянов [1*], **С.Р. Байгереев** [2], **А.В. Ликунов** [1], **М.В. Дудкин** [1], **О.Ю. Васильева** [2]
[1]«ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі» ЖШС, Өскемен қ., Қазақстан
[2]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
*Жауапты автор: Гурьянов Георгий Александрович, e-mail: gguryanov@mail.ru

Түйінді сөздер:
жою, ұнтақтау, ұсақтағыш, диірмен, материал, бөлшек, тиімділік, эксперимент.

ТҮЙІНДЕМЕ
Ұсақтау жабдықтарын жетілдіру мақсатында ұсақ ұнтақтау тиімділігін арттыру үшін материалдарды ұсақ ұнтақтау күйіне талдау жүргізілді, соққы әсерін ұсақ ұнтақтау үшін қолдану негізделген. Материалдарды соққы әсерімен ұсақтау процесін қарқындату мәселесінің мүмкін шешімдерінің бірі ұсынылған, жұмысты ұйымдастырудың жаңа схемасы және жоғары энергия кернеуі бар соққы әрекетін ұсақтағыш жасалған. Соққымен ұнтақтау процесінің Шығыс және кіріс параметрлерін байланыстыратын эмпирикалық-теориялық модель ұсынылады. Жұмысты ұйымдастырудың жаңа схемасымен ұсақтағыштың тиімділігі мен тиімділігін дәлелдейтін жұмысты ұйымдастырудың типтік және жаңа схемасы бойынша соққы әсерімен ұнтақтау процесін салыстырмалы эксперименттік зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Материалға қарсы әсері бар соққыға арналған ұсақтағыштардың жаңа дизайн схемалары келтірілген. Соққымен ұсақтау процесінің тиімділігін арттырудың бір әдісі туралы жаңа ақпарат алынды. Жұмыс нәтижелері соққы әсерінен ұсақ ұнтақтау процестерін одан әрі зерттеуге, ұсақ ұнтақтау процестері мен жабдықтарын дамытуға және жетілдіруге негіз болады.

Ключевые слова:
разрушение, измельчение, измельчитель, мельница, материал, частица,

АННОТАЦИЯ
С целью совершенствования измельчительного оборудования для повышения эффективности тонкого измельчения проведен анализ состояния тонкого измельчения материалов, обосновано примене-

© 2026 **Г.А. Гурьянов, С.Р. Байгереев, А.В. Ликунов, М.В. Дудкин, О.Ю. Васильева**
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы (CC BY 4.0) бойынша таратылады.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

эффективность, эксперимент.

ние для тонкого измельчения ударного воздействия. Представлено одно из возможных решений задачи интенсификации процесса тонкого измельчения материалов ударным воздействием, разработан измельчитель ударного действия с новой схемой организации работы и повышенной энергонапряженностью. Предлагается эмпирико-теоретическая модель, связывающая выходные и входные параметры процесса измельчения ударом. Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований процесса измельчения ударным воздействием по типовой и по новой схеме организации работы, доказывающие работоспособность и эффективность измельчителя с новой схемой организации работы. Приведены новые конструктивные схемы измельчителей ударного действия со встречным воздействием на материал. Получены новые сведения об одном из способов повышения эффективности процесса тонкого измельчения ударом. Результаты работы являются основой для дальнейших исследований процессов тонкого измельчения ударным воздействием, развития и совершенствования процессов и оборудования для тонкого измельчения.

keywords:
destruction, grinding, grinder, mill, material, particle, efficiency, experiment.

ABSTRACT
In order to improve the grinding equipment to increase the efficiency of fine grinding, an analysis of the state of fine grinding of materials has been carried out, and the use of impact for fine grinding has been substantiated. One of the possible solutions to the problem of intensifying the process of fine grinding of materials by impact is presented, an impact grinder with a new work organization scheme and increased energy stress has been developed. An empirical and theoretical model is proposed that relates the output and input parameters of the impact grinding process. The results of comparative experimental studies of the grinding process by impact according to the standard and according to the new scheme of work organization are presented, proving the efficiency and effectiveness of the grinder with the new scheme of work organization. New design schemes of impact grinders with counter impact on the material are presented. New information has been obtained about one of the ways to increase the efficiency of the fine grinding process by impact. The results of the work are the basis for further research of fine grinding processes by impact, development and improvement of processes and equipment for fine grinding.

КІРІСПЕ

Жұқа ұнтақтау процестері құрылыс, кен байыту, металлургия, химия және басқа да көптеген өнеркәсіптік технологиялардың маңызды құрамдас бөлігі болып табылады (Hergesell et al., 2025; Addess et al., 2026; Johanson, 2013). Алайда қазіргі өнеркәсіптің даму деңгейі материалдар мен компоненттерді алудың бұрынғы әдістері олардың сипаттамаларына қойылатын талаптарды толық қанағаттандыра алмайтынын көрсетеді. Бұл ретте материал бөлшектерінің ірілігі мәселесіне ерекше назар аударылады, өйткені қатты күйдегі заттардың қатысуымен жүретін процестердің жылдамдығы, сапасы және толықтығы, мысалы құрылыс қоспаларын дайындау немесе кендерді байыту және т.б., дисперстіліктің артуымен едәуір жоғарылайды.

Ұнтақтау процесі, әдетте, қатты денелерді әртүрлі механикалық әсерлердің бірізді қатары арқылы бұзудан тұрады. Тәжірибеде жұқа ұнтақтау сығу, үйкеу және соққы арқылы жүзеге асырылуы мүмкін.

Алайда ұнтақтау тәсіліне қарамастан, жұқа және әсіресе аса жұқа ұнтақтау кезінде жоғары дисперсті бөлшектерді алу белгілі бір қиындықтарға тап болады. Жұқа ұнтақтау процесінде бөлшектердің дисперстілігі артқан сайын олардың ұнтақталуы алдымен қиындайтын, ал белгілі бір, осы материал мен ұнтақтағыш үшін шекті дисперстілікке жеткеннен кейін мүмкін болмай, тоқтайтын сәт туындайды (Sterling, Breitung-Faes & Kwade, 2024; Rhymer et al., 2024).

Осылайша, материал бөлшегін механикалық жолмен шексіз кіші өлшемге дейін бұзу мүмкін емес, әсіресе бір ғана ұнтақтағышта. Әрбір ұнтақтағыш пен материал үшін бөлшектердің ең төменгі өлшемі болады, осы өлшемнен бастап ұнтақтау әсерін одан әрі күтуге болмайды. Сонымен қатар, қолданыстағы ұнтақтағыштар мұндай ұнтақтау шегіне де жетуге мүмкіндік бермейді, яғни механикалық ұнтақтаудың және оны жүзеге асыратын құрылғылардың әлеуеті толық пайдаланылмаған. Бұл қолданыстағы ұнтақтағыштарды жетілдіруді және тиімділігі жоғары жаңа ұнтақтағыштарды жасауды талап етеді.

Жұмыстың мақсаты — жұқа ұнтақтау процестерінің тиімділігін арттыру үшін ұнтақтау жабдықтарының жекелеген түрлерін жетілдіру.

Айта кету керек, барлық тәсілдер жұқа ұнтақтау кезінде бірдей жақсы нәтиже бере бермейді. Ұнтақталатын материалды сығу және үйкеу процестері жоғары энергия сыйымдылығымен ерекшеленетіні белгілі (Johanson, 2013; Sterling, Breitung-Faes & Kwade, 2024; Rhymer et al., 2024).

Осы тұрғыдан алғанда, материалдардың морт бөлшектерін бұзу процесі үшін соққылы әсер әлдеқайда тиімді болуы мүмкін (Dey & Das, 2013; Nied, 2007; Azhgalieva et al., 2024). Ол бөлшектің деформациялану аймағында кернеулердің өте жоғары шоғырлануын тудырады, бұл бұзуға жұмсалатын жұмыс пен энергия шығындарын азайтады. Соққымен әсер ету процесінің технологиялық және энергетикалық тиімділігінің себебі оның импульстік сипатында, яғни өте қысқа уақыт аралығында әсер ету жылдамдығының аса жоғары болуында. Бұл ұнтақтаудың басқа түрлерімен салыстырғанда бұзушы күштер мен қуаттардың едәуір жоғары мәндерін алуға мүмкіндік береді. Демек, қажетті өлшемге дейін жоғары жылдамдықты соққылы әсер арқылы ұнтақтау кезінде статикалық жүктеумен салыстырғанда қажетті әсерлер саны мен ұнтақтау уақыты азаяды, бұл энергия шығынын төмендетіп, үнемді ұнтақтауды ұйымдастыруға мүмкіндік береді.

Осылайша, «ИННОТЕХ» ҒӨБ» ЖШС-де цементті бастапқы 30 мкм ұнтақтылықтан соңғы 15 мкм ұнтақтылыққа дейін вибродиірменде сығу және үйкеу арқылы ұнтақтау мен дисмембраторда соққы арқылы ұнтақтауды салыстыру бойынша жүргізілген эксперименттер вибродиірменде ұнтақтау қозғалтқыш қуаты 1,4 кВт болғанда 3 минутқа созылғанын, ал дисмембраторда қозғалтқыш қуаты 1 кВт болғанда 30 секундқа созылғанын көрсетті. Энергия шығындарын салыстыру бөлшектерді соққы арқылы бұзудың энергия тиімділігі жоғары екенін көрсетеді.

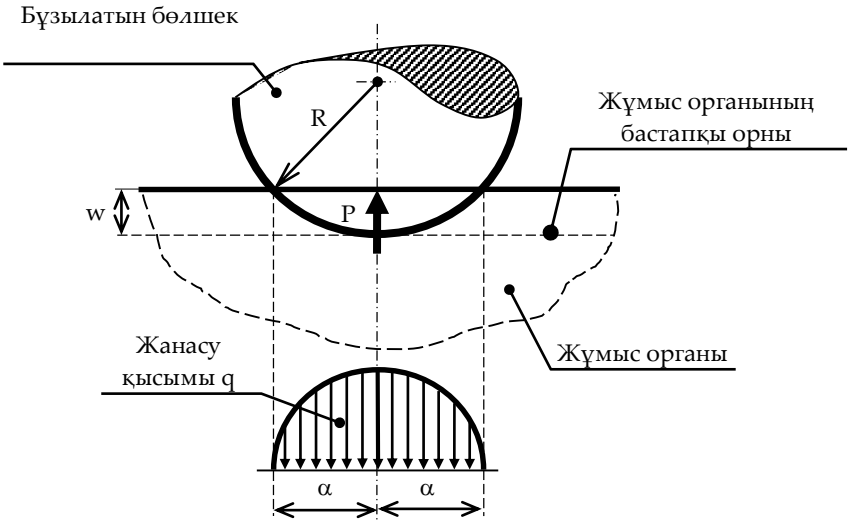
Осылайша, жұқа ұнтақтаудың тиімділігі мен шегін арттыру міндетін соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштарды қолдану есебінен шешу орынды. Демек, соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштарды олардың жұмысын ұйымдастырудың жаңа тәсілдері негізінде жетілдіру қажет: процесті қарқындату және энергия кернеулілігін арттыру; уақыт бірлігінде бөлшектерге көптеген импульстік әсерлерді қолдану; жұмыс органдары мен материал ағындарының жылдамдық градиенттері жоғары болатын аралас қозғалысын пайдалану.

Соққы арқылы ұнтақтауды жүзеге асыратын құрылғылардың ішінде аэробильді диірмендер, дезинтеграторлар және басқа да құрылғылар ерекше қызығушылық тудырады. Оларда материал бөлшектері жұмыс органдарының көп мәрте соққылы әсері, сондай-ақ бөлшектердің өзара соқтығысуы нәтижесінде ұнтақталады (Nied, 2007; Azhgalieva et al., 2024).

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштың жұмыс процесі мен тиімділігіне қандай параметрлер әсер ететінін түсіну үшін және оның жұмыс нәтижелерін болжау мақсатында материал бөлшегінің бұзылу процесінің теориялық механика-математикалық моделін аламыз. Бұл модельде материал бөлшегі диаметрі **D** (м) және массасы **m** (кг) болатын шар ретінде қарастырылады, ал соққылы әсер соқтығысу жылдамдығы **v** (м/с) кезінде жүзеге асып, **w** (м) тереңдікке дейін бұзылуы болжанады (Chimwani & Bwalya, 2021; Mhadhbi, 2023). Жұмыс органының материалдың сфералық бөлшегімен өзара әрекеттесу процесі екі дененің соқтығысуы туралы классикалық механика есебінің дербес жағдайын білдіреді (Guryanov & Abdeev, 2020).

1-суретте соққылы әрекеттегі жұмыс органының материалдың сфералық бөлшегімен жанаспалы өзара әрекеттесуінің есептік сұлбасы көрсетілген.



1-сурет. Соққылы әрекеттегі жұмыс органының сфералық бөлшекпен жанаспалы өзара әрекеттесуінің есептік сұлбасы

Ескерту – авторлар құрастырған

Жұмыс органының бөлшекпен жанасу аймағында пайда болатын жанасу қысымы q (Па) (1-сурет) келесі формула бойынша анықталуы мүмкін (Guryanov & Abdeev, 2020):

$$q = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \alpha^2}, \text{ Па}, \quad (1)$$

мұндағы P – жұмыс органының бөлшекке әсер ету күші, Н;

α – жұмыс органының сфералық бөлшекпен жанасу алаңының радиусы, м.

$$\alpha = \sqrt{w \cdot R}, \text{ м}. \quad (2)$$

мұндағы w – бөлшектің бұзылу деформациясы, м;

R – сфералық бөлшектің радиусы, м.

Сфералық бөлшекке жұмыс органының әсер ету күші P (Н) Ньютонның екінші заңы бойынша анықталып, бөлшектің w жолында деформациялануы кезінде жұмыс органының баяулау үдеуі a (м/с²) табылғаннан кейін, алмастырулар нәтижесінде жұмыс органының бөлшекке түсіретін жанасу қысымы q әсерінен туындайтын кернеудің тәуелділігі алынады (Guryanov et al., 2021):

$$\sigma = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot w^2} \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \geq [\sigma], \text{ Па.} \quad (3)$$

мұндағы m – бөлшектің массасы, кг;

v – соқтығысу жылдамдығы, м/с;

μ – бөлшек материалының Пуассон коэффициенті;

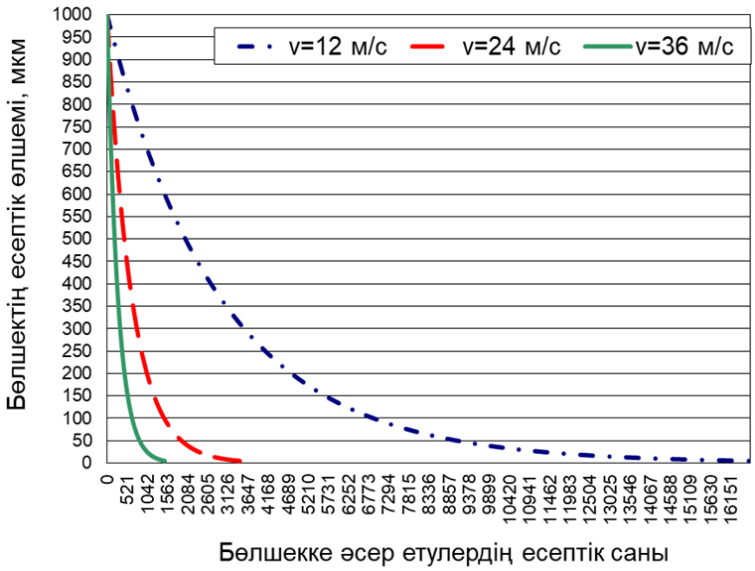
D – бөлшектің диаметрі, м; [σ] – бөлшек материалының беріктік шегі, Па.

(3) формуладан, мысалы, бұзылатын бөлшектің деформация шамасын практикалық есептік анықтауға арналған өрнекті алуға болады:

$$w \leq \sqrt{\frac{m \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot v^2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot [\sigma]}}, \text{ кг.} \quad (4)$$

Алынған формулалар негізінде тәуелділік графиктерін құруға болады. Оларды ұнтақтау процесінде бөлшек өлшемінің өзгеруін ескере отырып, әсер ету санына, бөлшек өлшеміне немесе оның беріктігіне байланысты жұмыс органының бөлшекпен соқтығысу жылдамдығын таңдау үшін пайдалануға болады. 5-суретте жұмыс органының бөлшекке әсер ету санына байланысты бөлшек өлшемінің өзгеру тәуелділігінің графиктері келтірілген.

2-суреттегі теориялық графиктер бөлшектер өлшемі азайған сайын ұнтақтау процесінің баяулайтыны туралы ұнтақтау теориясының белгілі қағидаларын, сондай-ақ соқтығысу жылдамдығының ұнтақтау тиімділігіне айқындаушы әсерін растайды. Бұл соққы арқылы ұнтақтау процесінің ұсынылған механика-математикалық моделінің сапалық тұрғыдан барабар екенін дәлелдейді. Сондықтан оны ұнтақтау процестерін практикалық есептеу үшін қолданудың әлеуетті мүмкіндігі бар деп айтуға болады. Бұл үшін эксперименттік тексеру жүргізіп, қажет болған жағдайда алынған математикалық тәуелділіктерге эмпирикалық түзету енгізу қажет.



2-сурет. Жұмыс органының бөлшекке әртүрлі соқтығысу жылдамдықтары кезінде жұмыс органының әсер ету санына байланысты бөлшек өлшемінің өзгеру тәуелділігі

Ескерту – авторлар құрастырған

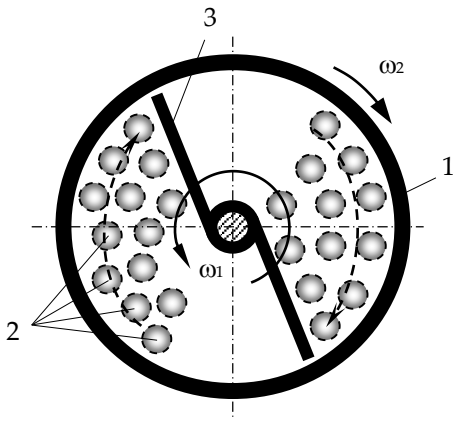
Алынған (3), (4) тәуелділіктерден бөлшекті бұзатын әсердің шамасы мен оның материалында туындайтын σ кернеулері бөлшектің массасы m мен диаметрі D өзгерген кезде өзгеруі мүмкін екені, ал оларды реттеу тек жұмыс органының соққы жылдамдығын v

өзгерту арқылы жүзеге асырылатыны көрінеді. Демек, жұмыс органының бөлшекпен соқтығысу жылдамдығы v соққы арқылы ұнтақтау процесінің тиімділігін арттыру мен ұнтақтау дәрежесін жоғарылатудың шешуші факторы болып табылады.

Осылайша, соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштарды жетілдіру соққы жылдамдығы мен энергиясын, яғни ұнтақтау процесінің энергия кернеулілігін арттыру тәсілдерін іздеу бағытымен жүргізілуі тиіс. Бұл ретте соқтығысу жылдамдығын анықтайтын соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштардың жұмыс органдары қозғалысының жылдамдығының өсу шегі бар екенін және ол ұнтақтағыштың техникалық сипаттамаларымен, сондай-ақ жұмыс органдары мен тірек тораптарының конструкциялық беріктігімен шектелетінін ескеру қажет. Сондықтан жұмыс органының материал бөлшегімен соқтығысу жылдамдығын арттырудың басқа тәсілі қажет.

Типтік аэробильді диірмендердің жұмысын талдау (Aragón et al., 2023; Mokgomola, 2021; Hongcheng et al., 2024) олардың ішінде, әдетте, соққы жылдамдығы тек жұмыс органының жылдамдығымен анықталатынын көрсетеді. Соқтығысу жылдамдығы, шын мәнінде, жұмыс органы мен материал бөлшегінің қарама-қарсы қозғалыс жылдамдығы екенін ескерсек, соқтығысу жылдамдығы мен бұзушы әсерді арттырудың қарапайым әрі тиімді тәсілі — жоғары жылдамдықты қосымша қозғалысты тек жұмыс органына ғана емес, сонымен бірге материал бөлшегіне де беру болып табылады. Бұл кезде жұмыс органы мен бөлшектің қозғалыс (жылдамдық) векторлары қарама-қарсы бағытталуы тиіс (Borg & Scharfe, 2015; Gupta, 2025; Baigereyev et al., 2025). Ол үшін жүйеге бөлшектердің жоғары жылдамдықты қозғалысын тудыратын тағы бір қосымша жұмыс органын енгізу қажет, ол сонымен қатар ұнтақтау камерасының жұмыс кеңістігіне энергияның қосымша берілуін қамтамасыз етеді.

3-суретте соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштың соққыштары мен материалдың қарама-қарсы қозғалысы және соқтығысу жылдамдығы арттырылған сұлбасы көрсетілген. Бұл сұлбада материал бөлшектерінің қарама-қарсы қозғалысы диірмен барабанының (корпусының) соққыштары бар ротордың айналу бағытына қарсы қосымша айналуы арқылы қамтамасыз етіледі.



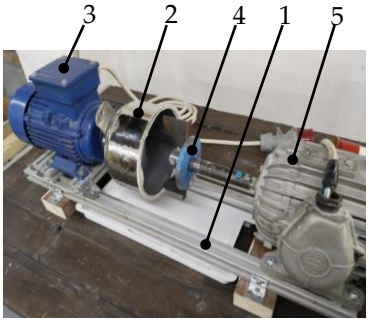
3-сурет. Соққыштар мен материалдың қарама-қарсы қозғалысы бар жетілдірілген соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштың сұлбасы: 1 – диірменнің корпусы (барабаны); 2 – материал бөлшектері; 3 – соққыштары бар ротор

Ескерту – авторлар құрастырған

Жұмысты ұйымдастырудың жаңа сұлбасының тиімділігін анықтау үшін осындай ұнтақтағыш моделінде эксперименттік зерттеулер жүргізілді (Yuhao et al., 2024; Salim et al., 2024; Guoming et al., 2010).

Эксперименттің мақсаты — материал бөлшектеріне қарама-қарсы әсер ететін және соқтығысу жылдамдығы арттырылған жұқа ұнтақтау ұнтақтағыштарының болжамды тиімділігін және қабылданған шешімдердің дұрыстығын тексеру.

Соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштарды эксперименттік зерттеуге арналған модель (4-сурет) көлденең орналасқан барабаннан 2 тұрады. Оның ішінде ұнтақтау камерасы бар және ол рамаға 1 бекітілген электрқозғалтқыштың 3 білігіне қатаң бекітілген. Сондай-ақ рамада 1, барабан қозғалтқышымен бір ось бойында, білігіне соққыштары бар ротор 4 орнатылған электрқозғалтқыш 5 орналасқан. Диірмен жұмыс істеген кезде бұл ротор ұнтақтау камерасына 2 енгізіледі. Диірмен жұмысы кезінде барабан 2 мен ротордың 4 бір мезгілде қарама-қарсы немесе бағыттас айналуы, сондай-ақ барабанның қозғалмайтын күйде болуы мүмкін. Электрқозғалтқыштардың 3 және 5 айналу жиілігін басқару үшін жиілік түрлендіргіштері қолданылады.



4-сурет. Соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау процесін эксперименттік зерттеуге арналған модель: 1 – рама; 2 – ұнтақтау камерасы (барабан); 3 – барабанның электрқозғалтқышы; 4 – соққыштары бар ротор; 5 – соққыштары бар ротордың электрқозғалтқышы

Ескерту – авторлар құрастырған

Эксперименттік зерттеулер жүргізу үшін модельдік ұнтақталатын материал ретінде бастапқы бөлшек өлшемі 0,5…1 мм (500…1000 мкм) болатын фракцияланған құм таңдалды.

Ұнтақтау тиімділігін сипаттайтын шығыс параметрі ретінде ұнтақталған материал бөлшектерінің өлшемі d (мкм), меншікті беті S (см²/г), сондай-ақ ұнтақтау уақыты t (с) таңдалды. Теориялық модельге сәйкес кіріс параметрі ретінде соқтығысу жылдамдығын v (м/с) анықтайтын жұмыс органының айналу жиілігі n (айн/мин) таңдалды.

Эксперименттік зерттеулер екі кезеңде жүргізілді:

1) Материалға ординарлы әсер ету кезінде барабаны қозғалмайтын соққылы әрекеттегі диірменнің тиімділігін бағалау.

2) Материалға қарама-қарсы әсер ету кезінде қарама-қарсы айналатын барабаны бар соққылы әрекеттегі диірменнің тиімділігін бағалау.

Соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау қозғалмайтын және қарама-қарсы айналатын барабан жағдайында, яғни ішінде соққыштары бекітілген айналмалы ротор орнатылған диірменнің барабан-ұнтақтау камерасында жүзеге асырылды (4-сурет). Ұнтақтау процесінде барабан не айналудан қатаң бекітілді, не электрқозғалтқыштың көмегімен соққыштары бар ротордың айналу бағытына қарсы айналдырылды. Ұнтақтағыштың әрбір бес минут жұмысынан кейін ұнтақтау камерасынан ұнтақталған материал сынамасы алынып, ұнтақтау жұқалығының ағымдағы мәні өлшенді. Ұнтақтау жұқалығының өзгеруі тоқтағанға дейін, яғни берілген жағдайлар үшін мүмкін болатын ең жоғары ұнтақтау жұқалығына жеткенге дейін жалғастырылды.

Соққыштары бар ротордың айналу жиілігі: 1350 айн/мин соқтығысу жылдамдығы v=12 м/с. Соққыштары бар ротордың 1350 айн/мин және барабанның 1390 айн/мин қарама-қарсы айналуының жиынтық жиілігі – 2740 айн/мин соқтығысу жылдамдығы v = 24 м/с. Ұнтақталатын материал массасы – 300 г.

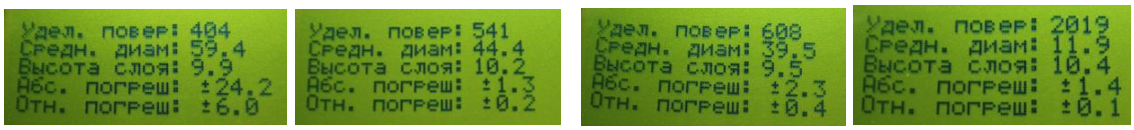
Ұнтақтау жұқалығын өлшеу үшін ПСХ-11М аспабы және PCE-WS-30 электрондық таразысы қолданылды.

Қозғалмайтын және қарама-қарсы айналатын барабан жағдайындағы соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау процесінің нәтижелері 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. Соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау процесінің нәтижелері

Ұнтақтау уақыты	Ұнтақтау процесін ұйымдастыру			
	Қозғалмайтын барабанмен: 1350 айн/мин		Қарама-қарсы айналатын барабанмен: 2740 айн/мин	
	Меншікті беті, S, см²/г Бөлшектердің орташа диаметрі, d, мкм	Меншікті беті, S, см²/г Бөлшектердің орташа диаметрі, d, мкм	Меншікті беті, S, см²/г Бөлшектердің орташа диаметрі, d, мкм	Меншікті беті, S, см²/г Бөлшектердің орташа диаметрі, d, мкм
5 мин	404	59,4	608	39,5
10 мин	475	50,5	1465	16,4
15 мин	521	46,1	1968	12,2
20 мин	535	44,9	2015	11,9
25 мин	541	44,4	2019	11,9
Ескерту – авторлар құрастырған				

5-суретте ПСХ-11М аспабы арқылы ұнтақталған материалдың ұнтақтылығын өлшеудің жекелеген нәтижелері көрсетілген.



а б

5-сурет. Айналу жиілігі 1350 айн/мин (а) және 2740 айн/мин (б) болған кезде бірінші және соңғы өлшеу үшін материалдың ұнтақтау жұқалығын өлшеу нәтижелері (1-кесте)
Ескерту – авторлар құрастырған

Теориялық механика-математикалық ұнтақтау процесі моделін (3-формула) эксперименттік зерттеу нәтижелері негізінде түзету үшін бөлшектің бір соққыш әсерінен бұзылу тереңдігі w көрсетілген туынды (4) формула алынды.

Шынайы жағдайда бөлшекті ұнтақтау үшін қажетті әсерлер санын және бір әсер кезінде бұзылатын материал көлемін физикалық тұрғыдан анықтау мүмкін болмағандықтан, жүргізілген эксперименттер негізінде әзірленген әдістеме бойынша бөлшекті ұнтақтау үшін қажетті есептік әсерлер саны ұнтақтау уақытына келтірілді. Бұл сәйкестік түзетуші эмпирикалық коэффициент арқылы өрнектелді, оның мәні кейін теориялық (4) формулаға қойылды.

Келесі параметрлерді енгіземіз:

– бөлшекті қажетті өлшемге дейін ұнтақтау үшін уақыт бірлігіндегі шартты әсерлер саны in_{γ} (соққы/мин) — ұнтақтағыш билерінің саны z мен жұмыс органының айналу жиілігі nРО көбейтіндісі;

– бөлшекті қажетті өлшемге дейін ұнтақтау үшін есептік әсерлер саны in□ (соққы) — теориялық тәуелділіктер немесе 2-суреттегі график негізінде анықталады;

– шартты ұнтақтау уақыты t_{γ} (мин) — есептік әсерлер санының in□ (соққы) шартты әсерлер санына in_{γ} (соққы/мин) қатынасы;

– нақты ұнтақтау уақыты tф (мин) — 1-кесте бойынша анықталады;

– түзетуші эмпирикалық коэффициент kэ — соққыштың бір әсері кезіндегі нақты бұзылу тереңдігінің wф соққыштың бір әсері кезіндегі теориялық (есептік) бұзылу тереңдігіне w қатынасы немесе шартты ұнтақтау уақытының t_{γ} нақты ұнтақтау уақытына tф қатынасы:

$$k_э = \frac{w_ф}{w_р} = \frac{t_у}{t_ф};$$

– соққыштың бір әсері кезіндегі нақты бұзылу тереңдігі wф (м), (4) формула негізінде:

$$w_ф = k_э \cdot \sqrt{\frac{m \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot v^2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot [\sigma]}}, \text{ м.}$$

Қажетті шамалардың мәндері және әзірленген әдістеме бойынша есептеу нәтижелері 2-кестеде ұсынылған.

2-кесте. Теориялық модельге түзетуші эмпирикалық коэффициентті анықтау нәтижелері

Есептеу параметрлері	Ординарлы әсер ету	Қарама-қарсы әсер ету
Бөлшектердің бастапқы өлшемі, D, мкм	1000	1000
Бөлшектердің соңғы өлшемі, d, мкм	44,4	11,9
Соққыштар саны, z	2	2
Жұмыс органының айналу жиілігі, $n_{РО}$ айн/мин	1350	2740
Бөлшекке әсер етудің шартты саны, $in_у$, соққы/мин	2700	5480
Бөлшекке әсер етудің есептік саны, $in_р$, соққы.	9450	13733
Шартты ұнтақтау уақыты, $t_у$, мин	3,5	2,51
Нақты ұнтақтау уақыты, $t_ф$, мин	25	20
Түзетуші эмпирикалық коэффициент, $k_э$	0,14	0,13
Соққыштың бір әсері кезіндегі нақты бұзылу тереңдігі, $w_ф$, м.	$w_ф = (0{,}13..0{,}14) \cdot \sqrt{\frac{m \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot v^2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot [\sigma]}}$	
Ескерту - авторлар құрастырған		

kэ түзетуші эмпирикалық коэффициентінің мәндері екі жағдайда да жеткілікті түрде жақын, ауытқу 7…8 % құрайды, бұл жұқа ұнтақтау процестері үшін өте дәл нәтиже болып табылады. Бұл қабылданған жорамалдардың, ұсынылған тәсілдердің және ұнтақтау процесінің теориялық моделін түзету әдістемесінің дұрыстығын көрсетеді. Жалпылай алғанда, практика үшін жеткілікті дәлдікпен түзетуші коэффициенттің өзгеру диапазонын kэ = 0,1…0,2 деп қабылдауға болады.

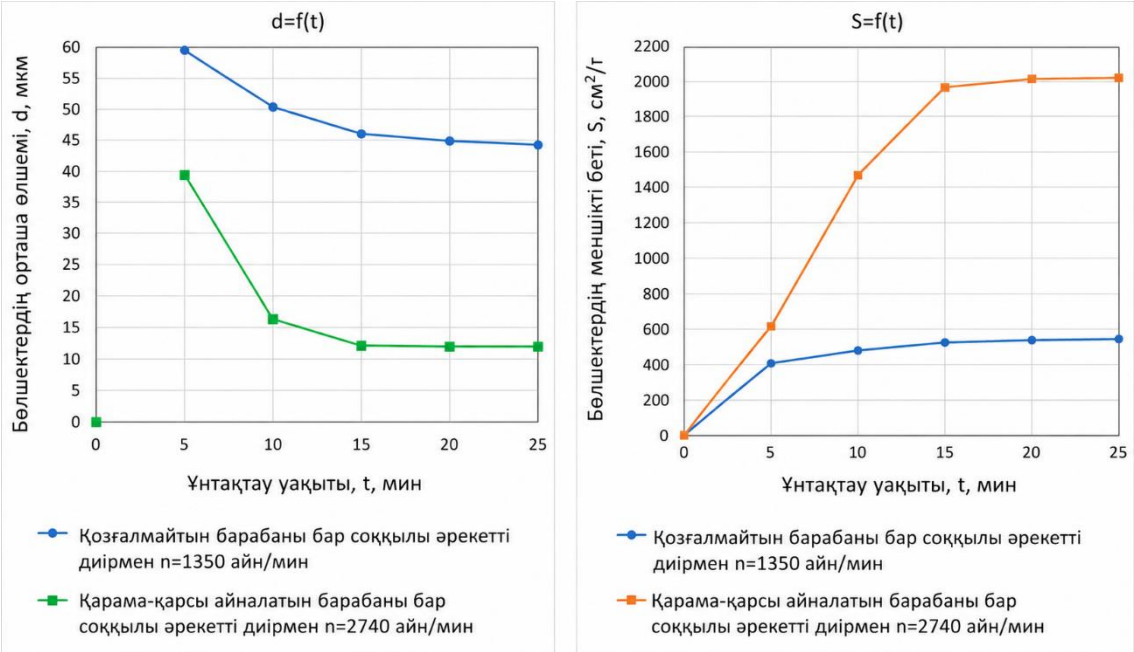
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Салыстыру үшін соққылы әрекеттегі диірменде қозғалмайтын және қарама-қарсы айналатын барабан жағдайындағы ұнтақтау нәтижелерін 3-кестеге жинақтаймыз.

3-кесте. Ұнтақтау процесін әртүрлі ұйымдастыру жағдайында соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау процесінің нәтижелерін салыстыру

1350 айн/мин кезінде қозғалмайтын барабаны бар соққылы әрекеттегі диірмен	Бөлшектердің орташа өлшемі, d_1, мкм	44,4
	Ұнтақтау уақыты, t_1, мин	25
2740 айн/мин кезінде қарама-қарсы айналатын барабаны бар соққылы әрекеттегі диірмен	Бөлшектердің орташа өлшемі, d_1, мкм	11,9
	Ұнтақтау уақыты, t_1, мин	20
Ұнтақтау жұқалығының қатынасы	d_2/d_1=44,4/11,9=3,7	
Шекті өлшемге дейін ұнтақтау уақытының қатынасы (11,9 мкм және 44,4 мкм)	t_2/t_1=20/25=0,8	
≈ 40 мкм өлшемге дейін ұнтақтау уақытының қатынасы	t_2/t_1=25/5=5	
Ескерту – авторлар құрастырған		

6-суретте соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау процесін ұйымдастырудың әртүрлі тәсілдері үшін ұнтақтау кинетикасының графиктері ұсынылған.



6-сурет. Соққылы әрекеттегі диірмендегі ұнтақтау кинетикасының графиктері
Ескерту – авторлар құрастырған

Соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау нәтижелерін, 3-кестеде және 6-суретте келтірілген мәліметтерді салыстыра отырып, келесі қорытындылар жасауға болады.

Материалға қарама-қарсы ұнтақтаушы әсер ету және соқтығысу жылдамдығын 2 есе арттыру жағдайында соққылы әрекеттегі диірменде ұнтақтау процесін ұйымдастырудың жаңа тәсілі қозғалмайтын барабаны бар диірменмен салыстырғанда ұнтақтау жұқалығы бойынша 3,7 есе тиімді. Бұл ретте ұнтақтау уақыты шамалас болған жағдайда қарама-қарсы әсер ету 11,9 мкм ұнтақтау шегіне жетуге мүмкіндік береді, ал қозғалмайтын барабандағы ординарлы соққылы әсер кезінде бұл көрсеткіш 44,4 мкм құрайды. Сондай-ақ ұнтақтау процесін ұйымдастырудың жаңа тәсілі кезінде шамамен 40 мкм ұнтақтау

жұқалығына небәрі 5 минутта қол жеткізілетінін байқауға болады, яғни бұл ординарлы әсер етуге қарағанда 5 есе жылдам.

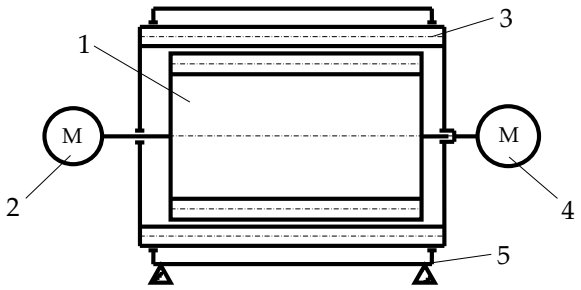
Соққылы әрекеттегі диірменде қарама-қарсы әсер ету арқылы ұнтақтау процесін ұйымдастырудың жаңа тәсілінің жоғары тиімділігі жаңа тәсілдерді қолдану, материалға өте қарқынды қарама-қарсы әсер етуді ұйымдастыру нәтижесінде қамтамасыз етіледі. Бұл алынған ұнтақтау процесінің теориялық моделіне сәйкес (3-формула) ұнтақтау тиімділігінің квадраттық өсуін қамтамасыз етеді, сондай-ақ ұнтақтау процесінің энергия кернеулілігін екі жұмыс органынан бір мезгілде энергия берілуін ұйымдастыру арқылы арттырады.

Сондай-ақ алынған эмпирикалық-теориялық ұнтақтау моделінің барабарлығы және оны соққылы әсер арқылы жұқа ұнтақтау процестерінің нәтижелерін есептеу мен болжау кезінде практикада қолдану мүмкіндігі туралы айтуға болады.

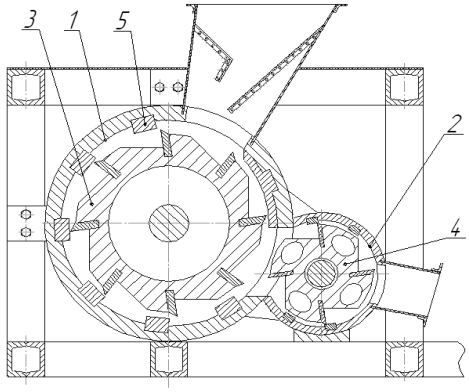
Ұнтақтау процесін ұйымдастырудың жаңа тәсілдері және материал бөлшектеріне қарама-қарсы әсер ету арқылы ұнтақтаудың тиімділігін дәлелдеген эксперименттік зерттеулер нәтижелері негізінде «ИННОТЕХ» ҒӨБ» ЖШС-де ұнтақтау процесінің энергия кернеулілігі арттырылған қарама-қарсы соққылы әсер арқылы жұқа ұнтақтауға арналған құрылғылардың бірнеше жаңа конструктивтік сұлбалары әзірленді (7-сурет).

Соққылы әрекеттегі роторлы ұнтақтағыш бойлық тістері — соққыштары бар айналмалы ротордан 1 және оған қарама-қарсы бағытта айналатын, ішкі бетінде де бойлық тістері бар корпустан 3 тұрады. Материал ротор мен корпус тістері — соққыштарымен жанасу кезінде көп мәрте жоғары жылдамдықты қарама-қарсы соққылы әсер ету есебінен ұнтақталады. Бұл процесс жоғары қарқындылықпен және жоғары энергия кернеулілігімен сипатталады.

Екі роторлы аэробильді диірменде қатты бекітілген соққыштары бар екі қарама-қарсы айналатын ротор болады. Диірмендегі материал бөлшектері соққы және үйкеліс әсерінен бұзылады. Негізгі ұнтақтау ұнтақталатын материал бөлшектері бірінші ротордың соққыштарынан екінші ротордың соққыштарына өткен кезде, бөлшектердің соққыштармен екі еселенген жылдамдықтағы қарама-қарсы соқтығысуы нәтижесінде жүзеге асырылады. Диірмен жоғары энергия кернеулілігімен және ұнтақтау жұқалығымен ерекшеленеді.



Соққылы әрекеттегі роторлы ұнтақтағыш:
1 – тістері-соққыштары бар ротор; 2 – ротор жетегі; 3 – тістері-соққыштары бар корпус; 4 – корпус жетегі; 5 – статор.



Екі роторлы аэробильді диірмен:
1 – жоғарғы корпус; 2 – төменгі корпус; 3, 4 – роторлар; 5 – шағылыстырғыш плиталар.

7-сурет. Қарама-қарсы соққылы әсер ету арқылы жұқа ұнтақтауға арналған құрылғылардың жаңа конструктивтік сұлбалары

Ескерту – авторлар құрастырған

Сондай-ақ патенттелген жұқа ұнтақтау тәсілі негізінде жұмысты ұйымдастырудың жаңа сұлбасы бар соққылы-құйынды ұнтақтағыш әзірленді. Ол бір агрегатта аэробильді және ағынды диірмендердің жұмыс істеу принциптерін біріктіруге негізделген. «ИННОТЕХ» ҒӨБ» ЖШС-де жүргізілген соққылы-құйынды ұнтақтағыштың эксперименттік зерттеулері оның жұмысқа қабілеттілігін, тиімділігін, практикалық қолдану мүмкіндігін және перспективалылығын дәлелдеді (Guryanov et al., 2025).

ҚОРЫТЫНДЫ

Материалдарды тиімді жұқа ұнтақтау үшін жоғары жылдамдықты соққы арқылы динамикалық ұнтақтауды қолдану орынды. Ұсынылған ұнтақтау процесінің механика-математикалық моделі негізінде анықталған соққы арқылы жұқа ұнтақтау процесін жетілдіру бағыты жұмыс органы мен материал бөлшегінің соқтығысу жылдамдығын және энергия кернеулілігін арттырудан тұрады. Соққы арқылы ұнтақтау процесін ұйымдастырудың жаңа тәсілдері негізінде материалға жоғары жылдамдықты қарама-қарсы әсер етуді және екі жұмыс органынан бір мезгілде энергия берілуін ұйымдастыратын диірменнің жаңа конструктивтік сұлбасы ұсынылды.

Әзірленген және жасалған соққылы әрекеттегі диірмен моделінде типтік және жаңа жұмыс ұйымдастыру сұлбасы бойынша материалды ұнтақтау процесіне жүргізілген эксперименттік зерттеулер материал бөлшектеріне қарама-қарсы ұнтақтаушы әсер ету кезіндегі ұнтақтауды ұйымдастырудың жаңа сұлбасы типтік соққылы әсермен ұнтақтауға қарағанда едәуір тиімді екенін көрсетеді. Ұнтақтау нәтижелері алынған ұнтақтау процесінің механика-математикалық моделіне де сәйкес келеді.

Ұнтақтау процесінің теориялық моделіне эмпирикалық түзету енгізу алынған соңғы эмпирикалық-теориялық ұнтақтау моделін соққылы әсер арқылы жұқа ұнтақтау процестерінің нәтижелерін практикалық есептеу және болжау кезінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Материалға қарама-қарсы әсер ететін соққылы әрекеттегі жұқа ұнтақтауға арналған құрылғылардың жаңа конструктивтік сұлбалары ұсынылды.

Жұмыс нәтижелерінің ғылыми және практикалық жаңалығы соққы арқылы жұқа ұнтақтау процесінің тиімділігін арттыру тәсілдерінің бірі туралы жаңа мәліметтер береді, ал соққылы әрекеттегі ұнтақтағыштардың жұмысын ұйымдастырудың жаңа сұлбасының негізінде жатқан тәсілдердің оң іске асырылуы оларды одан әрі жетілдіру үшін кең мүмкіндіктер ашады. Жұмыста алынған нәтижелер материалдарды жұқа және аса жұқа ұнтақтау процестерін одан әрі зерттеу, сондай-ақ жұмыс істеу көрсеткіштері жақсартылған ұнтақтау жабдықтарының жаңа түрлерін әзірлеу үшін негіз болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржыландыруымен жүзеге асырылуда (Грант № AP23488405 «Тиімділігі жоғары материалдарды ұнтақтауға арналған инновациялық жабдық әзірлеу»).

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ: Қолданылмайды.

ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Қолданылмайды.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректерді тиісті сұраныс бойынша жауапты автордан алуға болады.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар әдістемелік қолдау мен пайдалы пікірлері үшін әріптестеріне, сондай-ақ мақаланың сапасын арттыруға септігін тигізген анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар осы ғылыми мақаланы дайындау барысында мәтін жазу, редакциялау, фактілерді тексеру, деректерді талдау немесе басқа да кезеңдерде генеративті жасанды интеллект құралдарын және онымен байланысты технологияларды қолданбағанын мәлімдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Addess, A., Shilo, D., Acharya, S., Li, F., Rabkin, E., Glass, B., Paskovitch, Y., Burkhardt, C., Voge, L., & Faran, E. (2026). Mechanical ball-milling as a powder pretreatment for additive manufacturing of Ni-Ti shape memory alloy. Progress in Additive Manufacturing, (4), 78–89.

Aragón, H., Aragón, C., Miranda-Morales, B., & Sanabria-Sandí, F. R. (2023). Characterization and construction of a compact hammer mill for laboratory use to homogenize natural fibers of Elaeis guineensis and Acrocomia sp. Ingeniería, 33(2), 134–152. https://doi.org/10.15517/ri.v33i2.54419

Azhgalieva, A.S., Borisenko, D.N., Kolesnikov, N.N., & Zhokhov, A.A. (2024). Impact mill. Surface: X-ray, Synchrotron and Neutron Researches, (5), 109–112.

Baigereyev, S., Guryanov, G., Suleimenov, A., & Abdeyev, B. (2025). New approach to effective dry grinding of materials by controlling grinding media actions. Applied Sciences, 15, 7713. https://doi.org/10.3390/app15147713

Borg, G., & Scharfe, F. (2015). Improved particle liberation by high-velocity comminution – The new VeRo Liberator. Cuprum – Czasopismo Naukowo-Techniczne Gornictwa Rud, 75, 5–14. https://doi.org/10.3390/min10080710

Chimwani, N., & Bwalya, M. M. (2021). Milling studies in an impact crusher I: Kinetics modelling based on population balance modelling. Minerals, 11(5), 470. https://doi.org/10.3390/min11050470

Dey, S., & Das, A. (2013). Comminution features in an impact hammer mill. Powder Technology, 235, 914–920. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.003

Gupta, V. K. (2025). Analysis of ball mill grinding kinetics for materials with uncommon breakage characteristics. Advanced Powder Technology, 36(6).

Guoming, H., Liping, L., Hui, W., & Yu, L. (2010). An experimental study of fine powder comminution in a dual cone impact mill. Advanced Materials Research, 97–101, 1150–1153. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.1150

Guryanov, G. A., & Abdeev, B. M. (2020). The applied model of grinding a spherical solid particle with a direct impact on a non-deformable flat surface. PNRPU Mechanics Bulletin, (1), 32–42. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.03

Guryanov, G. A., Abdeev, B. M., Baigereyev, S. R., Kim, V. A., & Suleimenov, A. D. (2021). The applied mechanical and mathematical model of grinding of a solid particle by static crushing. PNRPU Mechanics Bulletin, (3), 58–69. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.3.06

Guryanov, G., Doudkin, M., Kim, A., Vavilov, A., & Vasilyeva, O. (2025). Improving the efficiency of fine grinding of materials in a new inverted impact grinder with enhanced energy-technological performance. Advances in Mechanical Engineering, 17(10), 1–16. https://doi.org/10.1177/16878132251362308

Hergesell, A., Seitzinger, C., Burg, J., Baarslag, R., & Vollmer, I. (2025). Influence of ball milling parameters on the mechano-chemical conversion of polyolefins. RSC Mechanochemistry, 2, 263–272.

Hongcheng, L., Shanchen, J., Rong, Z., Jie, G., & Zhiyou, N. (2024). Numerical simulation and analysis of the airflow field in the crushing chamber of the hammer mill. ACS Omega, 9, 32674–32686.

Johanson, K. (2013). Selecting the proper mill for your product: Understanding breakage behavior is crucial in mills. Chemical Engineering, 120(11).

Mhadhbi, M. (2023). Effect of milling parameters on DEM modeling of a planetary ball mill. Advances in Materials Physics and Chemistry, 13(4). https://doi.org/10.4236/ampc.2023.134004

Mokgomola, T. (2021). Investigation of the mechanisms responsible for high speed impact crusher performance [MSc dissertation, University of the Witwatersrand].

Nied, R. (2007). Rotor impact mills. In Handbook of Powder Technology (Vol. 12, pp. 229–249).

Rhymer, D., Ingram, A., Sadler, K., & Windows-Yule, C. R. K. (2024). Segregation in binary and polydisperse stirred media mills and its role on grinding effectiveness. Powder Technology, 443.

Salim, I., Muhpidah, M., Hardinashinta, G., Mubarak, H., Fauzi, R., & Surur, F. (2024). Performance test of disc mill type FFC-23 production of BBPP Batangkaluku. BIO Web of Conferences, 96, 03006. https://doi.org/10.1051/bioconf/20249603006

Sterling, D., Breitung-Faes, S., & Kwade, A. (2024). Improved energy transfer model for mechanistic scale-up of stirred media mills. Powder Technology, 444.

Yuhao, Z., Guangchao, H., Qingpeng, G., Wenzhi, Z., & Wei, B. (2024). Experimental investigation longitudinal torsional ultrasonic vibration milling for cortical bone. Journal of Manufacturing Processes, 120, 529–541.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Гурьянов Георгий Александрович – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Иннотех ғылыми-өндірістік бірлестігі» ЖШС, Өскемен қ., Қазақстан
Гурьянов Георгий Александрович – кандидат технических наук, профессор, ТОО «Научно-производственное объединение ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Guryanov Georgiy Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, LLP "Scientific and Production Association INNOTECH", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: gguryanov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Байгереев Самат Ракимгалиевич – философия докторы (PhD), қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Байгереев Самат Ракимгалиевич – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Baigereyev Samat Rakimgalievich – doctor of Philosophy (PhD), associate professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: samat.baigereyev@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Ликунов Александр Викторович – инженер, «Иннотех ғылыми-өндірістік бірлестігі» ЖШС, Өскемен қ., Қазақстан
Ликунов Александр Викторович – инженер, ТОО «Научно-производственное объединение ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Likunov Aleksander Viktorovich – Engineer, LLP «Scientific and Production Association INNOTECH», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: likunov65@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5387-3284

Дудкин Михаил Васильевич – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Иннотех ғылыми-өндірістік бірлестігі» ЖШС, Өскемен, Қазақстан
Дудкин Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор, ТОО «Научно-производственное объединение ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Dudkin Mikhail Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, LLP "Scientific and Production Association INNOTECH", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: vas_dud@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Васильева Ольга Юрьевна – аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Васильева Ольга Юрьевна – старший преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан
Vasilyeva Olga Yurievna – Senior Lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: ovasilyeva@ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9426-6322

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_4
МРНТИ 55.33.; 52.13.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ РОБОТИЗИРОВАННЫХ, МАНЕВРИРУЮЩИХ АГРЕГАТОВ

РОБОТТЫҚ, МАНЕВЕРЛІК АГРЕГАТТАРДЫҢ ОПЕРАЦИЯСЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF OPERATIONS OF ROBOTIZED, MANEUVERABLE AGGREGATES

Г.С. Жетесова[1], **К.М. Бейсембаев**[1*], **Ж.Н. Нокина**[1], **Г.Б. Абдугалиева**[1], **Д. Оразбеков**[1]
[1]НАО Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
*Автор-корреспондент: Бейсембаев Каким Манапович, e-mail: kakim1949@mail.ru

Ключевые слова:
конвейер, лава, погрузчик, камера, информационная система, производительность, развороты, эффективность.

АННОТАЦИЯ

Были выявлены особенности нагружения секций крепи при постепенном опускании пород кровли на ранее обрушенные участки, а также установлено, что от растягивающих напряжений по контуру кровли могут возникать трещины, формирующие ступеньки в её профиле, и этот процесс продолжается до поверхности земли с повышением горного давления на забой до 72 %. Предотвращение последствий этого явления – применение камерной выемки с вычислением состояния системы на основе метода конечных элементов и экспериментальных данных в каждом цикле выемки. Для проектирования новой технологии создана информационная система учета эффективности сценариев работ, учитывающая геологические нарушения и развороты агрегата на очередные участки выемки. Это позволяет минимизировать длительность технологического цикла выемки в каждом сценарии. Для камер длина транспортной цепочки в очистном блоке в 1,27 раза, а капитальные затраты в 3 раза меньше, решается и вопрос разработки наклонных и крутых пластов с вовлечением в добычу запасов не менее добытых.

Түйінді сөздер:
конвейер, лава, жүк тиегіш, камера ақпараттық жүйе, өнімділік, бұрылуы, тиімділік

ТҮЙІНДЕМЕ

Төбенің жыныстарын бұрын құлаған жерлерге біртіндеп түсірген кезде тіреу секцияларын жүктемесінің ерекшеліктері анықталды, сонымен қатар төбенің сызығы бойынша созылу кернеулерінен болатын жарықшақтық пайда болуы мүмкін екендігі анықталды және бұл процесс жер бетіне дейін жалғаса-

© 2026 Г.С. Жетесова, К.М. Бейсембаев, Ж.Н. Нокина, Г.Б. Абдугалиева, Д. Оразбеков
Данная работа распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ды, тау қысымы кенжарға 72 % дейін көтеріледі. Бұл құбылыстың салдарын болдырмау – жүйенің күйін есептей отырып және әр қазбаның циклінде эксперименттік мәліметтер негізінде камералық қазбаны қолдану болып табылады. Жаңа технологияны жобалау үшін геологиялық бұзушылықтар мен агрегаттың кезекті қазу учаскелеріне бұрылуын ескеретін жұмыс сценарийінің тиімділігін есепке алатын ақпараттық жүйе құрылды. Бұл әрбір сценарийде қазбаның технологиялық циклінің ұзақтығын азайтуға мүмкіндік береді. Камералар үшін тазарту қондырғысындағы көлік тізбегінің ұзындығы 1,27 есе аз. Ұзын қабырғалы технологиямен салыстырғанда, капиталдық шығындар кем дегенде үш есе төмен. Көлбеу және тік қабаттарды дамыту мәселесі де шешілді, ал олардың минералды қорлары бұрыннан өндірілген қорлармен салыстыруға болады.

keywords:
Conveyor, long wall, loader, chamber mining, information system, productivity turnover, efficiency.

ABSTRACT

Loading characteristics of support sections were identified during the gradual subsidence of roof rock onto previously collapsed sections. It was also established that tensile stresses along the roof contour can cause cracks, forming steps in its profile. This process continues to the ground surface, increasing rock pressure at the face by up to 72%. Prevention of the consequences of this phenomenon is achieved by chamber mining, in which experimental data are measured, and the state of the face is calculated in each mining cycle. To design the new technology, an information system was created that accounts for the effectiveness of work scenarios, considering geological disturbances and the machine's turnover to the next mining section. This minimizes the duration of the technological mining cycle in each scenario. For chamber mining, the transport chain length in the stope unit is 1.27 times shorter. Capital costs are three times lower than for long wall mining The challenge of developing inclined and steep coal seams, whose reserves are comparable to those of already mined coal, has also been addressed.

ВВЕДЕНИЕ

Новая технология камерной отработки, создаваемая в Кемерово и Караганде, решает вопросы вовлечения в добычу сложнозалегающих участков твердых минералов, запасы которых по углю не менее добытых. Разработка камерных агрегатов, средств и методов разворотов для их безмонтажного перевода на очередной добычной участок резко повысит эффективность таких технологий. Современные разработки должны обеспечить быстрое их внедрение при сокращении длительности промышленных экспериментов с выдачей продукта с заданной надежностью и эффективностью. Это возможно при следующих условиях:

- современное проектирование основано на моделировании в 3D, а конструктивные и технологические схемы работы машин - на апробированных модулях;

- программы расчета и прогнозирования состояния движушихся агрегата и забоя для каждого цикла выемки учитывают обратную связь и текущие разрушения пород.

- создание информационной системы (ИС) для сложных условий участка с расчетом сценариев работ с поворотами агрегата и их экономической оценкой.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Опыт применения таких систем для длинных лав с разворотами техники на 180° приведен в (Федунец & Симонов, 1982; Козлов В.В., 2010). Но в лавах их эффективность снижается из-за крепления участка у центра разворота, где возрастает время выстоя кровли, её «топтание», приводящие к разрушению пород и угля. Камерные же технологии основаны на известной школе (Бурчаков и др., 1978). При этом казахстанская школа геомеханики Айталиева Ш.М., Канлыбаевой Ж.М., Сагинова А.С., Векслера Ю.А. (Канлыбаева, 1964; Айталиев, и др., 1992) позволяет уточнить особенности сдвижения пород в зоне работ. Так, метод радиоактивных изотопов Канлыбаевой, учитывающий смещение пород у забоев, получал одобрение ведущих горных школ Франции и США, а работы Векслера применяются в системе автоматизированного управления лавами в германской фирме Marco (Rojter, et. al., 2021). Ими же был достигнут эффективный режим роботизированной выемки в РФ и Китае. В продолжение этих исследований выполнены работы (Буялич и др., 2024; Никонова и др., 2024), направленные на создание метода расчета состояния забоя и нагруженности роботизированных секций в каждом цикле выемки. Вышепоставленные задачи позволят вовлечь в добычу новые запасы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчетов напряженно-деформированного состояния пород при различных схемах взаимодействия был применен метод конечных элементов с использованием программ на языке Ansys APDL. Экспериментальная оценка нарушенности выполнялась анализом шахтных данных карагандинского бассейна и, в частности, ш. Кировской по пласту K_2 в лавах длиной 120 м. Применялся и системный анализ работы технологических схем разворота лав. Но точный учет эффективности разворота можно провести средствами, учитывающими и новые сценарии работ. Таким требованиям отвечают электронные таблицы, имеющие программные средства сложного логического анализа и сортировки данных, которые, как альтернативное средство традиционным, могут использоваться и для создания механизмов управления роботами (Буялич и др., 2024).

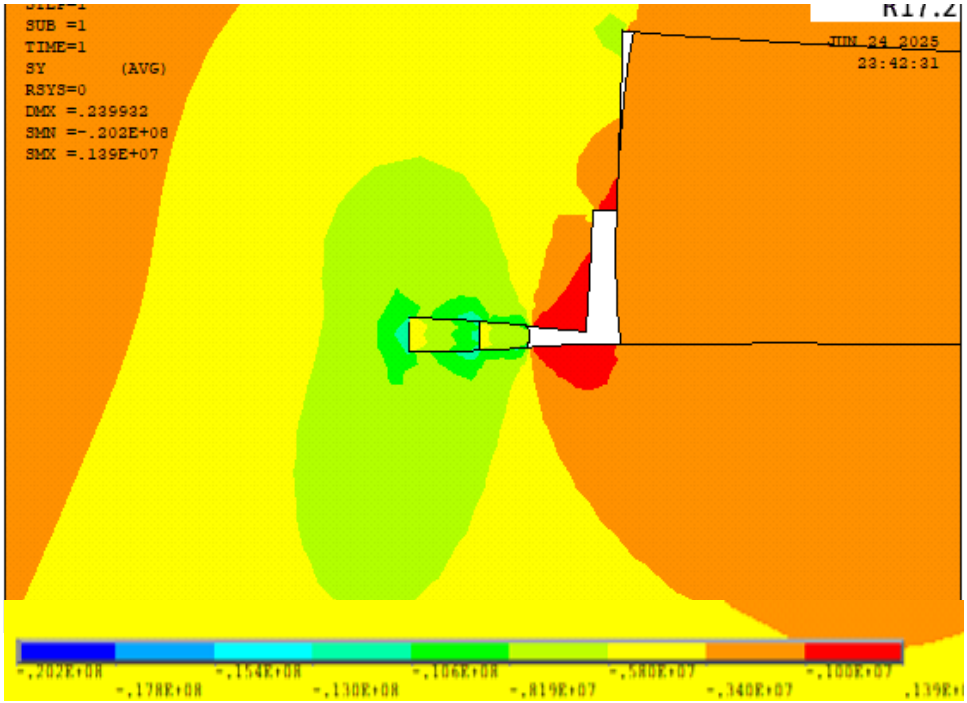
Исследуется новое средство для процессного анализа движения агрегата при разворотах, учета операций при различных параметрах системы в автоматическом режиме с применением логических условий готовности к их выполнению с программированием в электронных таблицах *ЭТ*. Длительность операций передвижки забойного конвейера или погрузчика и секций крепи:

$$Tzk = (Tvd + Tv + Tpr + Tras + Tsrr + Tbu(L)) * (Ll / bc)\,, \qquad (1)$$

где *Tvd*, *Tvt* – время на движения поршня при его выдвижении и втягивании, *Tpr* – переключение распределителя рабочей жидкости, *Tras* – распор секции после передвижки, *Tsrr* – снятие с распора, *by(L)* – управление боковыми зазорами между секциями крепи (нормативы для одной секции); *Ll* – длина лавы (забоя), *bc* – ширина секции крепи. Если время движения комбайна для выемки одной стружки вдоль лавы *Tkl*, а общее время передвижки секций агрегата для крепления обнажения от одной стружки *Tzk*, то для современного оборудования фактически имеет место условие:

$$Tzk >> Tkl \qquad (2)$$

Поэтому время подвигания лавы определяется *Tzk* за счет медленного движения секций, при этом и комбайн проектируется из этого условия.



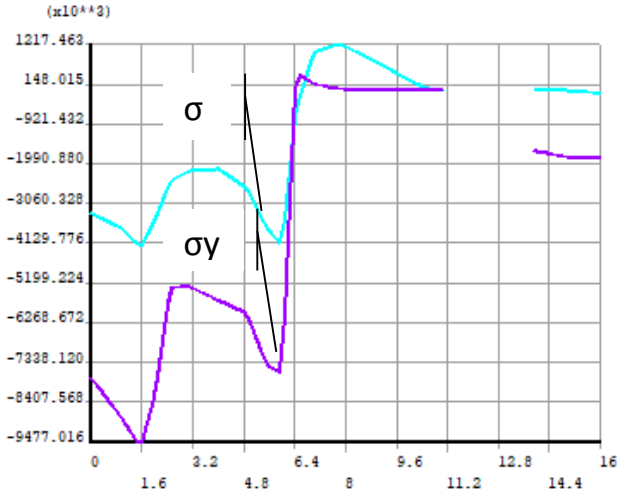


Рисунок 1. Напряжения при плавном опускании вышележащих пород на обрушенные и создание давления на крепь и забой

Примечание – составлено авторами на основе программирования на языке Ansys APDL

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Было выявлено, что в традиционной схеме со ступенчатым обрушением слоев кровли и плавным опусканием вышезалегающих пород на обрушенные породы (рис. 1 и рис. 2) имеются случаи, когда на контуре их соединения возникают растягивающие напряжения, превышающие предел прочности пород, что приводит к появлению новой ступени и т.д. до достижения земной поверхности. Реальность такой схемы также следует из многочисленных исследований обрушения пород на стендах с эквивалентными материалами. Как следует из сопоставления графиков и картин распределения напряжений у забоя, в этом случае давление на забой существенно выше и разница достигает 72 % по сравнению со схемой с плавным опусканием пород, но характер изменения напряжений на прилегающую к забою часть пласта и выработанного пространства практически одинаков.

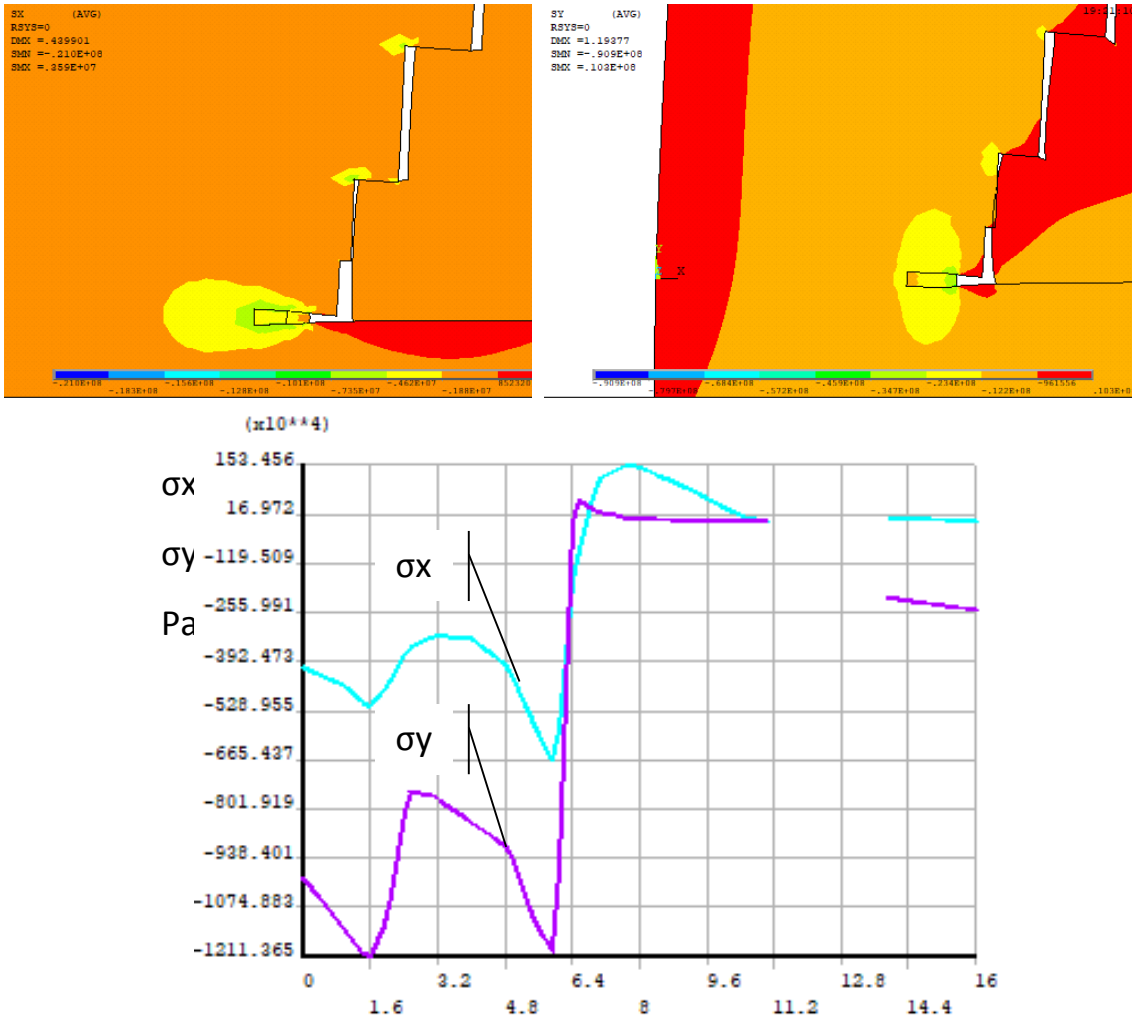


Рисунок 2. Напряжения, характеризующие нагружение крепи при ступенчатой структуре пород кровли с поддержкой ступеней обрушенными породами
Примечание – составлено авторами на основе программирования на языке nsys APDL

В соответствии с методологией (Акижанова и др., 2024), увеличение давления приведет к удлинению зоны опорного давления и возрастанию опасности газодинамических явлений, а это потребует и пропорционального увеличения сопротивления крепи. Программа расчета сформирована так, что она позволяет изменять степень поддержки ступеней обрушенными породами за счет коэффициента разубоживания пород и модуля их деформации, а также условиями формирования зон дезинтеграции пласта у забоя. А это также позволяет сформировать многовариантные сценарии обрушения. При этом в условиях лавы схема расположения пород за забоем визуально наблюдается в зазоры между секциями, особенно в случаях, когда мелкораздробленная порода не перекрывает все выработанное пространство над ними. При предельном состоянии призабойной зоны шириной около 1,5 м её модуль деформации имеет значение, близкое к модулю обрушенных пород, поддерживающих ступени, и их влияние на смещение кровли минимально, что подтверждено и расчетом. Новая технология должна строиться не только разработкой её конструкции, но и созданием уточненной методики расчета давления на пласт и крепь, а также аппарата технико-экономического обоснования – эффективности *(Э)*. Сравнение технологии обычно производится с традиционными. Лавы имеют длину

200-300 м. Их Э зависит от времени отработки одной стружки. Ширина секции *1,5 м*, шаг передвижки *lp = 0,5*. При *Ll = 200 м* в лаве размещаются *n = Ll/bc* секций, т.е. около *133 шт*. Самым медленным звеном забоя считаются связанные гидродомкратами конвейер и секции крепи, поэтому при расчете производительности в первую очередь учитывают время их передвижки. В расчеты включают время на заполнение поршневой и штоковой полости домкратов, так как при прямом и обратном ходе их поршни со штоками передвигают конвейер, а затем секции, одна за другой, подтягиваются к его борту. Учитывают и время на переключение распределителей t_{ras}, снятия с распора секции, а затем и её повторный распор T*srr*, время на управление боковыми зазорами между секциями *Tbu(L)*. Учитывают и операции сопряжения, связанные с передвижкой привода скребкового конвейера, перекрепления сопряжений t_{sopl}, t_{Sopp}. Во время выемки стружки учитывают и время выполнения постепенной зарубки комбайна в пласт угля за счет непрерывной подачи конвейера домкратами перемещения. При разворотах лав особенно следует учитывать боковое выравнивание секций, которые «разбегаются» из-за ручной передвижки. Для сложнозалегающих участков эти недостатки преодолевались камерной выемкой. Кроме того, камеры в случае необходимости легко локализовать скважинами, уменьшая выбросоопасность вредных газов в атмосферу, упрощая использование в их забоях робототехники (Łukasz Bołoz1a, 2022; Edward et al., 2022).

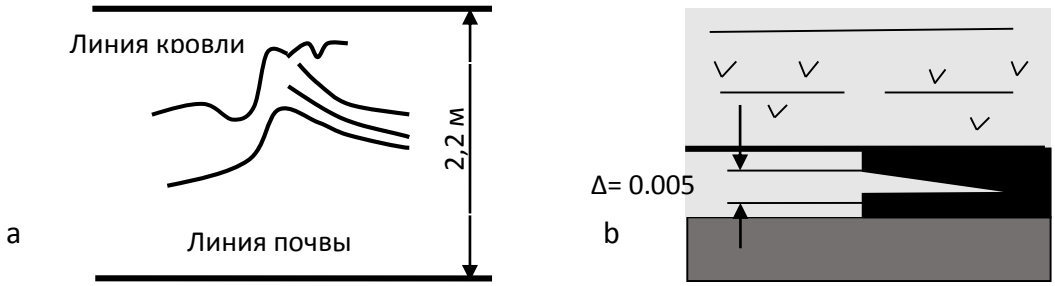


Рисунок 3. Нарушения и аномалии в лавах на ш. Кировской:
a – волнообразная слоистость, b – подъем передней части забоя
Примечание – составлено авторами на основе данных шахты Кировской

Сложность условий разработки угольных пластов обычно определяется разрывными нарушениями вдоль лавы (это сдвиг, когда одна часть смещается относительно другой по «сместителю» или происходит резкое изменение направлений слоистости в виде выпуклости, которое длится на участках длиной 3-7 м и продолжается в глубину пласта до 10 - 15 м (рис. 3). На ш. Кировской в лаве длиной 120 м в среднем по длине располагалось около 4 крупных нарушений (рис. 3, a), что приводило к обрушению кровли и возникновению протяженных неподдерживаемых полостей, которые крепились вручную, а также возникала необходимость отбойки твердых включений, на что затрачивается время *Tkn*. Аномалии типа (рис. 3, b) наблюдались при пересечении лавой старого штрека, проходящего через выемочный столб лавы. При этом разрушение пород и пласта резко усиливалось, сдерживая работы в забое. В расчетах также учитываются данные (Meshkov et al., 2021; Акижанова и др., 2023; Андреева, 2021), поэтому для расчета длительности цикла выемки одной полосы угля добавлено выражение:

$$Tkn = (Ll / Ln) * Nn, \quad (3)$$

где *Ln* – средняя протяженность лавы без крупных нарушений (25 м);
Nn – время крепления в сек.

Эти данные помещаются в ЭТ, и выражения записывают через ссылки на ячейки. На сопряжении лавы в процессе передвижки необходимо переустанавливать крепь (обычно это гидравлические или индивидуальные стойки, поддерживающие деревянные верхняки). Эти дополнительные операции легко осуществляются в ЭТ (Арский, 2021; Feliks Mun, 2024; Новоселов, 2021) и снижают эффективность лав по сравнению с камерной выемкой. По такой же методике расчета длительности цикла можно рассчитывать и время операций для камерного агрегата с погрузчиком и крепью с учетом его поворотов (рис. 4). При ширине камеры до 20 м нарушения маловероятны, или они будут обойдены, а роботизировать такой забой за счет дополнительного визуального контроля рабочих процессов оператором гораздо проще. Выбор *ЭТ для ИС* объясняется тем, что программирование задач в них облегчено за счет встроенных средств в ячейки таблиц, изменение данных которых легко наблюдаемы. При этом *ЭТ* обладает большими ресурсами памяти для данных и макросов, которые могут записываться в авторежиме. Рассмотрен разворот с углом α, обеспечивающий шаг 1-й секции в 0,5 м (рисунки 4-6).

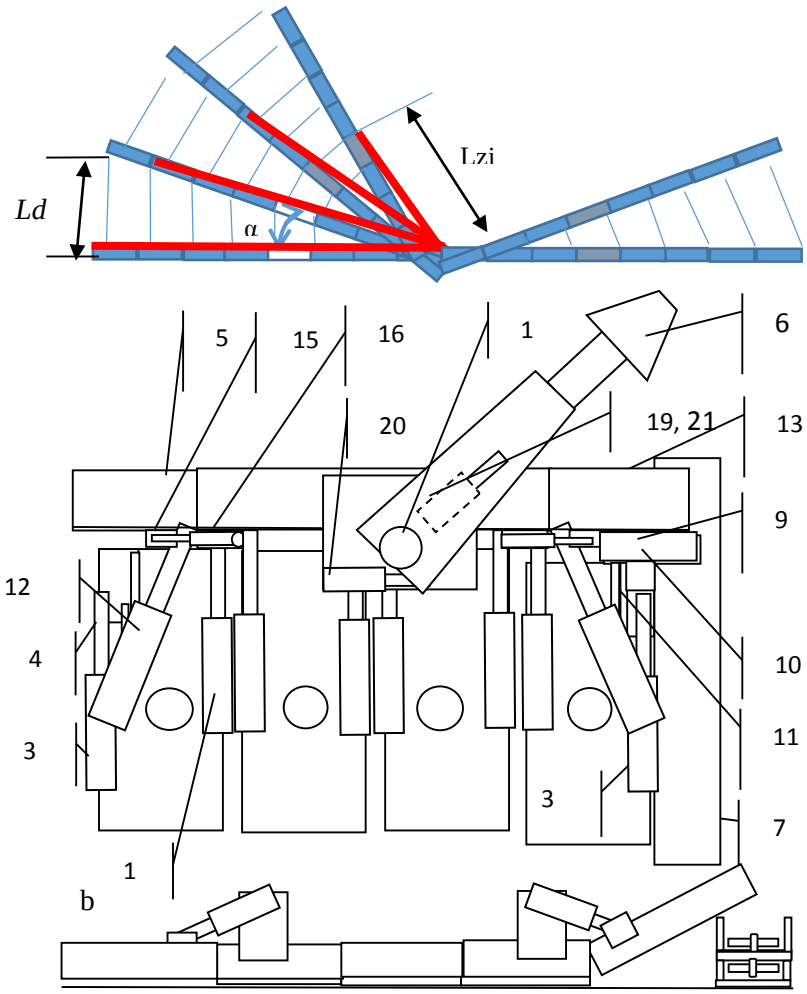


Рисунок 4. Манипуляции погрузчика и агрегата при развороте камеры
Примечание – составлено авторами на основе евразийского патента № 034478

В ИС созданы и дополнительные таблицы для управления передвижением секций – роботов. Конструкция агрегата (рис. 4, b), а также содержание евразийского патента №. 034478 показывают, что такая технология разворотов вполне осуществима для типового

стреловидного комбайна. Заметим также, что в КарТУ имеется и опыт его применения с базы скребкового конвейера в условиях ш. Долинской. Для аналитического описания вначале рассматриваем разворот на угол α, например, в 1,435°, при котором шаг передвижки крайней секции равен стандартному захвату лавного комбайна 0,5 м, затем ситуацию повторяем до полного поворота на 180°, табл. 1. Шаг возможной передвижки секции, отстоящей от центра разворота на расстояние Dyi = Lzi* sin α, по мере приближения к центру будет уменьшатся. Здесь Lzi – длина участка при развороте агрегата малыми углами α, для которого определяется шаг передвижения секции с номером i. Но передвижка осуществляется при условии, когда величина шага станет больше или равной стандартному 0,5 м (рис. 2). Расчетные шаги фиксируются в процессоре ЭТ (рис. 5), а команда на включение передвижки выдается в момент достижения установленной величины, и в ячейку, где это произошло, вставляется 1, например, в ячейку AD8, отмеченную прямоугольником.

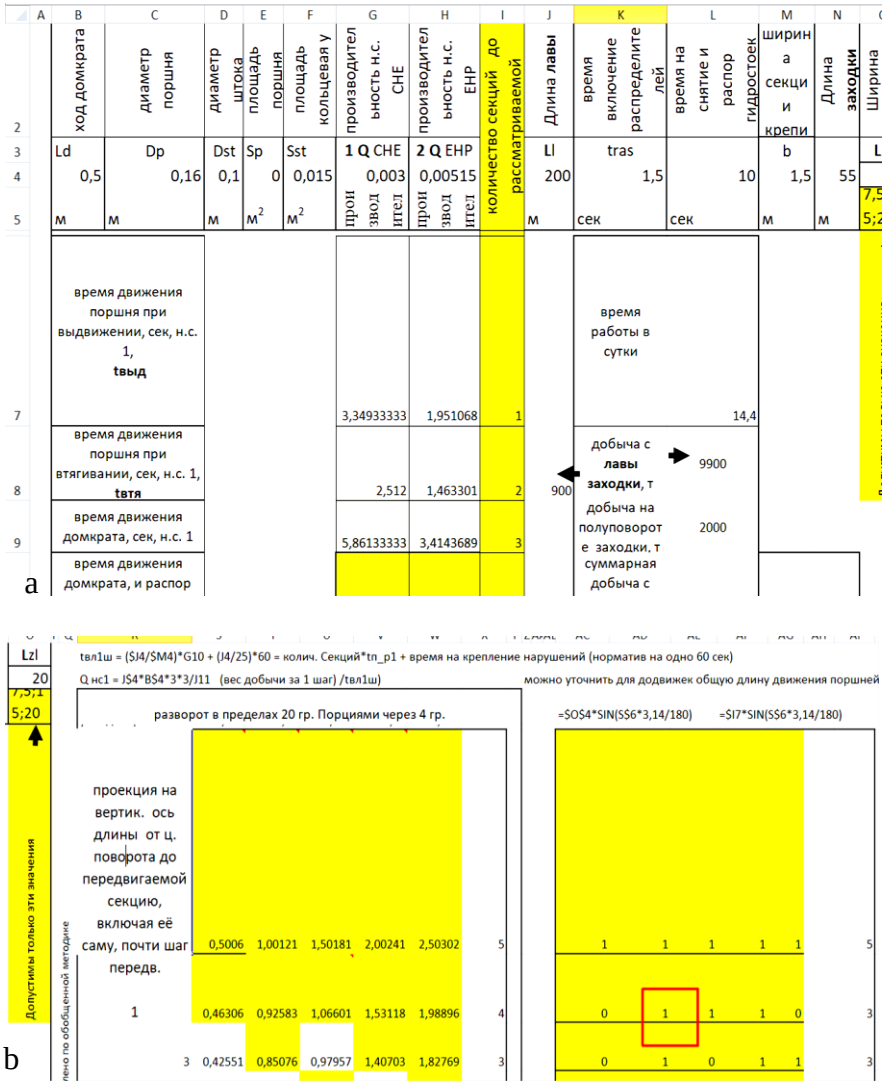


Рисунок 5. Фрагменты состояния электронной таблицы при расчете эффективности камерной технологии и сравнении с лавой в сложных условиях: а – левая часть с исходными данными и результатами, b – правая часть (смещена вниз) для управления передвижой

Примечание – составлено авторами на основе программирования в MS Excel

Таким образом при развороте лишних операций по додвижке секций не возникает и его осуществление мало чем отличается от линейной передвижки. Ячейки таблицы содержат формулы для расчета проекции на ось нормальную к оси погрузчика, равную расстоянию *Lzi* от передвигаемой секции до центра поворота для каждого из его положений. Шаги по величине α выбраны так, чтобы для первой секции слева величина *Dy1 = Ld* была равна установленному шагу передвижки. Включение домкрата наступает в момент, когда логическим оператором анализа состояния величины передвижения в ячейку будет сброшена 1, что происходит при условии *«=ЕСЛИ (T12-СУММ (AC12:AG12)*B4>=B4;1;0)»*.

Из всех возможных вариантов расчета критерий начала передвижки секции крепи принят как разница между суммарным ходом поршня домкрата (функция *СУММ(AC12:AG12))* и величиной, определяемой количеством реальных передвижек, уже совершенным этим домкратом (*СУММ(AC12:AG12)*), умноженным на В, при условии, что он станет больше или равным шагу передвижки. Получив 1, процессор переключит шток домкрата на втягивание, но предварительно секция вначале будет снята с распора, а после вновь расперта. В остающихся неподвижными секциях вслед за перемещающимся погрузчиком происходит вытягивание штоков, что должно быть учтено в работе электрогидравлической роботизированной системы, проектируемой на основе ф. Marco. В камерах и на сопряжениях лавы имеем операции с крепями штреков для создания в выработанном пространстве транспортной выработки. Их количество и порядок возведения рассчитываются из (рис. 6). Для создания алгоритмов расчета показана последовательность выемки заходок, поворотов агрегата типа 10, где представлены и перецепления поворотного конвейера при пересечениях основного штрека.

По мере перемещения забоя из блока А и Б к выработке конец конвейера должен переместиться по стрелке 13 вправо за время *toc*, чтобы освободить проход агрегату в заходку В, затем поворотный конвейер 5, после перецепления с погрузчиком, вводится за агрегатом по стрелке 4 (*tпрц*). После отработки блока В с разворотом в блок *Г* поворотный конвейер по направлениям 6, 7 вновь выводится на основной штрек с перецеплением с погрузчиком для выемки очередного блока *Д*, а конвейер основного предварительно смещается вправо на *Lzl*.

Смещения конвейера основного штрека показаны тонкими прямыми, а развороты камеры дугообразными стрелками, направления отработки блоков показаны контурными стрелками. Далее работы проводятся аналогично. Расчет потерь минерала (они выделены в виде треугольников) между прежним и новым выемочным полем 9 дает величину в 2, 3 %. Эти криволинейные целики служат дополнительной охраной для забоя. Два целика типа 11 у забоя сохраняют целостность, а затем в положении 12 при перемещении забоя обрушаются. Порядок формирования в выработанном пространстве транспортных выработок, закрепленных стационарно-переносной крепью (СПК) типа 14 и 8, с учетом (Zholmagambetov, et. al., 2023) позволяет оценить и интенсивность использования конвейеров. Работа агрегата (рисунки 4 и 6) производится так: с основного штрека агрегат с комбайном 6, погрузчиком 5 и секциями крепи внедряется в стенку и вынимает заходку А, за агрегатом, связанный с погрузчиком 5, движется поворотный конвейер 7, и отбитый минерал погрузчиком 5 грузится на конвейер 7, а с него на конвейер основного штрека. Если он установлен справа от заходок, то по мере выемки заходки он должен перемещаться на шаг заходки вправо. Возведение СПК, если это требуется, начинается сразу же с отбойкой минерала в блоке, далее штоки домкратов 4 и 12, расположенных по бокам секций, втягиваются, и секции, предварительно снятые с распора, с разворотом «причаливают» к погрузчику, и т.д. На концевых секциях и рештаках 5 и 13 погрузчика

имеются специальные устройства 10 и 32 перецепления, проушины и домкраты подъёма 15, 16.

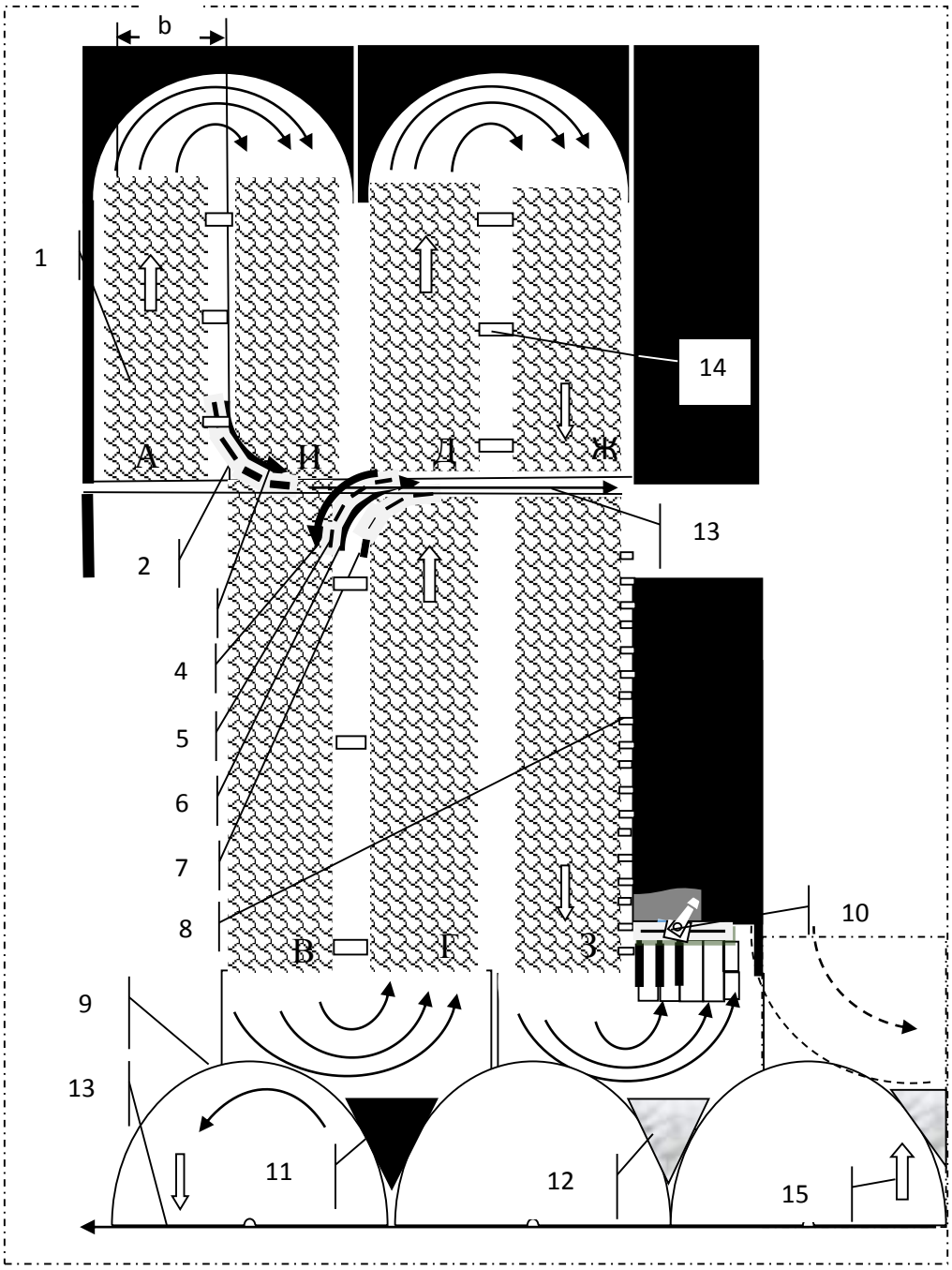


Рисунок 6. Схема движения камер

Примечание – составлено авторами на основе евразийского патента № 034478

Технология защищена патентами ЕАПО, и её можно применять для наклонных и крутых пластов, поскольку управление устойчивостью секций при выемке по простиранию пласта облегчено за счет их малого количества и наличия на секциях выдвижных бортов и погружных контуров с возможностями их распора в бока соседних секций и внедрения в почву пласта. Причем факт менее производительной работы

стреловидного комбайна 10 по сравнению с лавным шнековым преодолевается возможностью безопасной подрубки пласта (Акижанова и др., 2023; Ройтер и др., 2021). Для камеры коэффициент машинного времени стреловидного комбайна существенно больше, чем в лаве, и он реализует свою производительность практически полностью, а в лаве она сдерживается недостаточной скоростью движения системы конвейер – крепь, особенно при наличии нарушений. Учтено и время перекрепления сопряжений и возведения крепи транспортной выработки *Tks*. Поэтому в *ЭТ* внедрено дополнение (расчеты для насосных станций двух типов СНЕ и ЕНР):

$$Tks = (Td + n * Tgs + Tzr) * Lk / tspk, \tag{4}$$

где *Td, n, Tgs, Tzr, Lk, tspk,* – время на доставку *СПК* к зоне установки – 20 с; количество гидростоек и время раздвижки одной, время на подготовительно-заключительные работы; длина камеры – заходки, шаг установки *СПК.* Время раздвижки гидростойки:

$$Tgs = (3{,}14 * Dn^2 / 4) * Lzc / Qche + tras, \tag{5}$$

где *Dn, LZc, Qche* – диаметр поршня, величина выдвижения, производительность насосной станции.

Исходя из диаграмм на рисунке 7 и данных на рисунке 8, суточная производительность практически не изменяется для длин лав от 100 до 200 м.

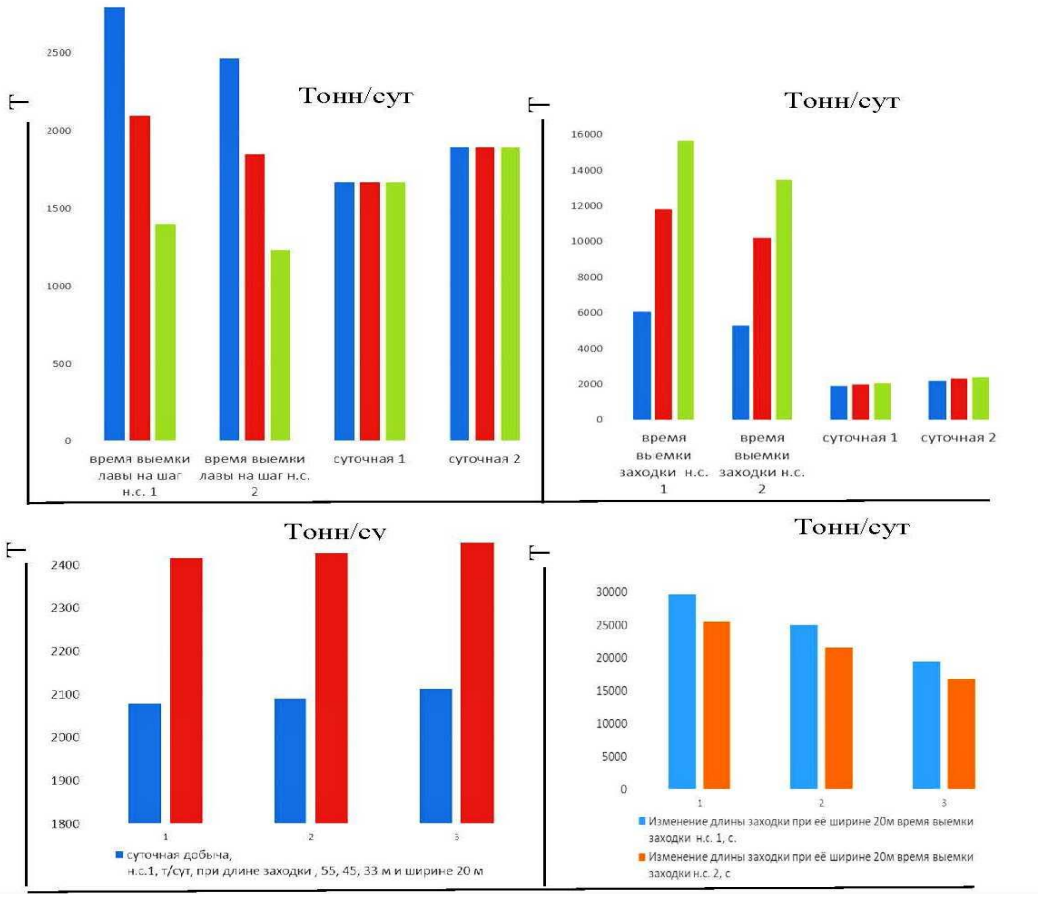


Рисунок 7. Диаграммы зависимости суточной добычи для сложнозалегающих месторождений

Примечание – составлено авторами (MS Excel, 2010)

Уменьшение длины лавы в сложных условиях компенсируется уменьшением количества нарушений. В соответствии с расчетом суточная добыча с камер выше на 11-12 %. С увеличением ширины камеры показатели улучшаются ненамного, что объясняется и соответствующим повышением радиуса разворота. Показатели на одного рабочего очистного забоя в камере еще выше, чем в лаве из-за уменьшения обслуживающего персонала и оборудования. Эти данные подтверждаются и опытом разработок США. Потери же минералов не более чем для лав. Уменьшается и количество оборудования в забое. Если ранее применялось 133 секции крепи шириной 1,5 м на лаву длиной 200 м, то в камере их количество можно сократить при ширине заходки 20 м в 10 раз, а вес каждой секции составляет до 7 тонн, и на ней 6-7 дорогостоящих гидроцилиндров. При этом работы по выемке можно начать при капитальных вложениях, в несколько раз меньших. Таким образом, длительность цикла позволяет простыми и точными методами определить эффективность и перспективные направления технологий.

Важным дополнением к нему является экономический анализ, позволяющий определить эффективность и срок окупаемости технологий, рис. 8. Такая методика также внедрена в ИС ЭТ и позволяет оценить любой сценарий для комплекса оборудования.

	A	B	C	D	H	I
14		Себестоимость применяемого оборудования (1 единица шахтного самоходного вагона) и конвейера, тыс. тенге С1 и С2:	174755	21030,4	$Э=\left[З_1\cdot\frac{B_2}{B_1}\cdot\frac{0{,}25+E_н}{0{,}20+E_н}+\frac{(И'-И'_2)-E_н\cdot(K'_2-K')+Э_{кос}}{0{,}20+E_н}-З_2\right]\cdot A_2,$	
15		Стоимость производительных фондов на 1 тенге себестоимости товарной продукции для шахтного самоходного вагона, тенге (1), и предлагаемого скребкового конвейера, тенге a1, a2	1,05	1,065	Годовые размеры амортизационных исчислений нового оборудования, тыс. тенге	2628,8
16		Предпроизводственные капитальные затраты, тыс. тенге		570	Срок окупаемости	0,07677

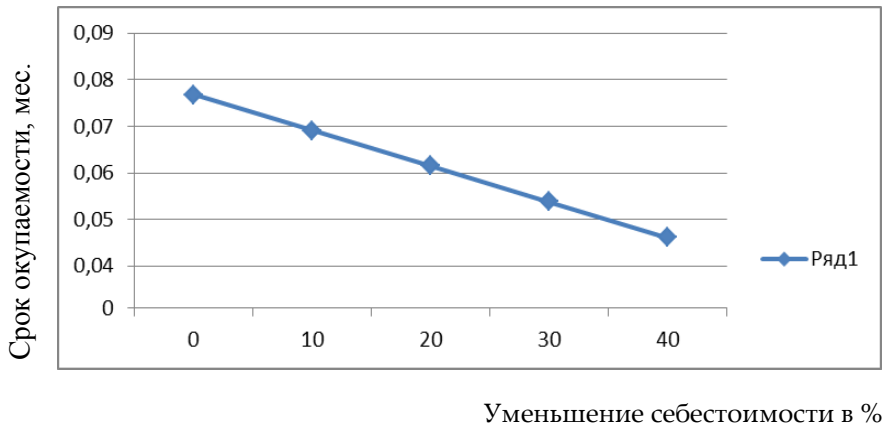


Рисунок 8. Фрагмент системы расчета годового эффекта и изменение срока окупаемости поворотного конвейера за счет сокращения его себестоимости (длины камеры 33 м)
Примечание – составлено авторами (MS Excel 210)

Все формулы введены в столбцы D и I. Так, для схемы (рис. 4) определено изменение срока окупаемости поворотного конвейера при снижении его себестоимости. Его пропорциональное уменьшение отражает возможность устранить факторы, связанные с дополнительными затратами на новую технику, что вполне реально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены данные о возможности существенного повышения нагрузки на секции у забоя лавы в сложных условиях. В этом случае камерные технологии с маневрированием агрегата (конструкция и технология работ защищены евразийскими патентами) позволяют вести эффективную разработку и сократить количество секций более чем в 10 раз и, соответственно, объемы капитальных вложений. Роботизация сокращает перерывы между операциями и особенно при разворотах секций, производя их перемещение при достижении стандартной величины шага передвижки (0,5 м). Длительность технологического цикла движения конвейеров и крепи в цикле выемки – основной момент эффективности технологий. Она определяется скоростью движения погрузчика и секций роботизированной крепи, которая отстает от выемки угля. При меньшей длине транспортирования длительность использования транспортного оборудования и крепления камер, пропорциональная объему добытого минерала, соответственно превышает лавную, что требует и соответствующих подходов к проектированию и повышению надежности оборудования и, в частности, обеспечения точности расчетов нагруженности забоя и секций крепи на основе предложенного метода конечных элементов. Эти данные подтверждаются и опытом разработки США, где специально для камер разработан ленточный поворотный конвейер. Процент же потерь минералов не превышает потери при лавной добыче. В разработанной ИС расчет эффективности легко выполняется при изменении любого основного параметра и для различных сценариев технологии работ, которые позволят вовлечь в добычу запасы с объемом не менее уже добытых.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований Министерством науки и образования по теме № AP05134441 «Разработка, изготовление и испытание новой конструкции поворотного конвейерного узла с поворотом потока груза под углом до 90 градусов в плоскости выработок для забойных и криволинейных горных работ».

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ: Все необходимые данные содержатся в статье.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Edward, S. E., Idowu, I. O., John, O. O., & Abdulwahab, G. (2022). Modelling and simulation of an adsorption process using activated carbon from coconut shells. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 17(9), 932–946. https://apastyle.apa.org/instructional-aids/reference-examples.pdf

Łukasz, B. (2022). Dynamic model of a longwall shearer with a chain haulage system. Acta Montanistica Slovaca, 27(3), 589–606.

Meshkov, A.A., Kazanin, O.I., & Sidorenko, A.A. (2021). Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines. Journal of Mining Institute, 5, 342–350. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.3

Mun, F. (2024). Excel formulas and functions. Independently Published. https://dtf.ru/topraiting/3264197-luchshie-knigi-po-excel-top-10-reiting

Акижанова, Ж. Т., Жетесова, Г. С., Бейсембаев, К. М., Буялич, Г. Д., & Нокина, Ж. Н. (2023). К методике расчета горного давления у короткого забоя. Уголь, 7, 50–55. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-50-55 // Akizhanova, Zh. T., Zhetesova, G. S., Beisembaev, K. M., Buyalich, G. D., & Nokina, Zh. N. (2023). K metodike rascheta gornogo davleniya u korotkogo zaboya [On the method for calculating rock pressure at a short face]. Ugol', 7, 50–55. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-50-55 (In Russ.)

Андреева, Л.И. (2021). Методический подход к оценке состояния горной техники и целесообразного срока ее эксплуатации. Горное оборудование и электромеханика, 6(158), 38–43. // Andreeva, L.I. (2021). Metodicheskiy podkhod k otsenke sostoyaniya gornoy tekhniki i tselesoobraznogo sroka ee ekspluatatsii [Methodological approach to assessing the condition of mining equipment and the appropriate period of its operation]. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika, 6(158), 38–43. (In Russ.)

Анферов, Б.А., & Кузнецова, Л.В. (2021). Разработка трудноизвлекаемых запасов угля крутых и крутонаклонных пластов. Вестник Кузбасского государственного технического университета, 5(147), 91–101. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-5-91-101 // Anferov, B. A., & Kuznetsova, L. V. (2021). Razrabotka trudnoizvlekaemykh zapasov uglya krutykh i krutonaklonnykh plastov [Development of hard-to-recover coal reserves in steep and steeply inclined seams]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 5(147), 91–101. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-5-91-101 (In Russ.)

Арский, А. А. (2021). Повышение эффективности методики комплексного экономического анализа. Вестник МФЮА, 2, 7–11. https://doi.org/10.52210/2224669X_2021_2_7 // Arskiy, A. A. (2021). Povyshenie effektivnosti metodiki kompleksnogo ekonomicheskogo analiza [Improving the efficiency of the methodology for comprehensive economic analysis]. Vestnik MFYuA, 2, 7–11. https://doi.org/10.52210/2224669X_2021_2_7 (In Russ.)

Айталиев, Ш.М., Алексеева, Л.А., Дильдабаев, Ш.А., & Жанбырбаев, Н.Б. (1992). Метод граничных интегральных уравнений в задачах динамики упругих многосвязных тел. Гылым // Aytaliev, Sh. M., Alekseeva, L.A., Dildabaev, Sh.A., & Zhanbyrbaev, N.B. (1992). Metod granichnykh integral'nykh uravneniy v zadachakh dinamiki uprugikh mnogosvyaznykh tel [The method of boundary integral equations in problems of dynamics of elastic multiply connected bodies]. Gylym. (In Russ.)

Козлов, В.В. (2010). Анализ существующих классификаций технологических схем с разворотом лавы. Уголь, 3, 57–63. // Kozlov, V.V. (2010). Analiz sushchestvuyushchikh klassifikatsiy tekhnologicheskikh skhem s razvorotom lavy [Analysis of existing classifications of technological schemes with longwall face rotation]. Ugol', 3, 57–63. (In Russ.)

Канлыбаева, Ж.М. (1965). Закономерности и методика изучения процесса сдвижения горных пород в массиве и некоторые вопросы подземных разработок: На примере Карагандинского бассейна [Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Институт горного дела им. А.А. Скочинского]. Москва. // Kanlybaeva, Zh.M. (1965). Zakonomernosti i metodika izucheniya protsessa sdvizheniya gornykh porod v massive i nekotorye voprosy podzemnykh razrabotok: Na primere Karagandinskogo basseyna [Patterns and methodology for studying the process of rock displacement in a massif and some issues of underground mining: Based on the Karaganda Basin] [Doctoral dissertation abstract, A.A. Skochinsky Institute of Mining]. Moscow. (In Russ.)

Никонова, Т.Ю., Жетесова, Г.С., Бейсембаев, К.М., Абдугалиева, Г.Б., Жаркевич, О.М., & Скаскевич, А. А. (2024). Камерная выемка минералов в сложных горно-геологических условиях без выбросов углерода. Уголь, 2, 57–63. // Nikonova, T.Yu., Zhetesova, G.S., Beisembaev, K.M., Abdugalieva, G.B., Zharkevich, O.M., & Skaskevich, A.A. (2024). Kamernaya vyemka mineralov v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh bez vybrosov ugleroda [Room mining of minerals in complex mining and geological conditions without carbon emissions]. Ugol', 2, 57–63. (In Russ.)

Новоселов, С.В. (2021). Оптимизация производственного цикла в очистном забое сверхкатегорных угольных шахт. Уголь, 4, 40–42. // Novoselov, S.V. (2021). Optimizatsiya proizvodstvennogo tsikla v ochistnom zaboe sverkhkategornykh ugol'nykh

shakht [Optimization of the production cycle in a longwall face of extra-hazardous coal mines]. Ugol', 4, 40–42. (In Russ.)

Ройтер, М., Крах, М., Кислинг, У., & Векслер, Ю. А. (2021). Разработка метода сейсмоакустического мониторинга динамических явлений в очистных забоях угольных шахт. ФТПРПИ, 1, 28–35. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210104 // Royter, M., Krakh, M., Kisling, U., & Veksler, Yu. A. (2021). Razrabotka metoda seysmoakusticheskogo monitoringa dinamicheskikh yavleniy v ochistnykh zaboyakh ugol'nykh shakht [Development of a method for seismic-acoustic monitoring of dynamic phenomena in longwall faces of coal mines]. FTPRPI, 1, 28–35. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210104 (In Russ.)

Федунец, В.И., & Симонов, В. М. (1982). Эффективность отработки пологих пластов. Недра. http://opac.skunb.ru/app/webroot/index.php?url=/notices/index/IdNotice:1331372/Source:default // Fedunets, V.I., & Simonov, V.M. (1982). Effektivnost' otrabotki pologikh plastov [Efficiency of mining gently dipping seams]. Nedra. http://opac.skunb.ru/app/webroot/index.php?url=/notices/index/IdNotice:1331372/Source:default (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Жетесова Гульнара Сантаевна – техника ғылымдарының докторы, Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Жетесова Гульнара Сантаевна – доктор технических наук, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
Zhetesova Gulnara Santaevna – Doctor of Technical Sciences, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan
e-mail: zhetesova@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6504-3405,

Бейсембаев Каким Манапович – техника ғылымдарының докторы, Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Бейсембаев Каким Манапович – доктор технических наук, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
Beisembayev Kakim Manapovich – Doctor of Technical Sciences, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan
e-mail: kakim1949@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0954-2936

Нокина Жаннель Нуртаевна – PhD докторы, Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Нокина Жаннель Нуртаевна – доктор PhD, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
Nokina Zhannel Nurtaevna – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: zh.nokina@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-0086-4293

Абдугалиева Гульнур Баймурзаевна – техника ғылымдарының кандидаты, Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Абдугалиева Гульнур Баймурзаевна – кандидат технических наук, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
Abdugalieva Gulnur Baimurzaevna – Candidate of Technical Sciences, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: gulnura84@mail.ru,ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3469-3901.

Оразбеков Дархан – технологиялық машиналар және жабдықтар магистрі, Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Оразбеков Дархан – магистр в области технологических машин и оборудования, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
Orazbekov Darkhan – Master's Degree in Technological Machinery and Equipment, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: darik.krg@gmail.com,ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1699-0676

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_5
ХҒТАР 55.03.14

ТУРБОКОМПРЕССОРЛАРДЫ СЫНАУҒА АРНАЛҒАН СТЕНДІНІҢ КОНСТРУКЦИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ АРҚЫЛЫ ПОМПАЖ ҚҰБЫЛЫСЫН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОМПАЖА ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

STUDY OF THE PHENOMENON OF SURGE BY IMPROVING THE DESIGN OF A TURBOCHARGER TEST RIG

Б.К. Калиев [1], **Ж.А. Бекмырза** [2], **Т.В. Бедыч** [3], **Р. Ғабдысалық** [4*], **С.Р. Байгереев** [5]
[1,2]Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., Қазақстан
[3]ЖУ «Міржақып Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті», Қостанай қ., Қазақстан
[4,5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
*Жауапты автор: Риза Ғабдысалық, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru

Ключевые слова:
помпаж, подшипники, турбонаддув, турбокомпрессор, заслонка, резонанс, частота, выбег.

АННОТАЦИЯ

Помпаж – это нестабильный режим работы компрессора, при котором происходят резкие скачки давления и неравномерная подача воздуха или газа. Это возникает, когда разница давлений между входом и выходом компрессора становится слишком большой. В двигателях с турбонаддувом это часто связано с изменяющимися нагрузками во время эксплуатации, из-за чего нарушается нормальная работа насосного и турбинного колёс турбокомпрессора.

Комплекс мероприятий по совершенствованию конструкции стенда для испытаний турбокомпрессора был ориентирован на моделирование реальных эксплуатационных режимов его работы и определение границ возникновения помпажных явлений. Исследования проводились с применением измерительного комплекса Polytec CLV-3D. Для регистрации вибрационных характеристик на вал турбины устанавливались специальные кольцевые элементы, прижатые к диску, посредством которых осуществлялось возбуждение колебаний. Полученные экспериментальные результаты подтвердили воспроизводимость метода и позволили установить соответствие каждого выявленного режима определённым собственным частотам колебаний. Обнаруженные частотные диапазоны целесообразно исключить из допустимых эксплуатационных режимов. Реализация данного подхода направлена на повышение надёжности и долговечности турбокомпрессора за счёт предотвращения работы в зоне помпажа.

© 2026 **Б.К. Калиев, Ж.А. Бекмырза, Т.В. Бедыч, Р. Ғабдысалық, С.Р. Байгереев**
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы (CC BY 4.0) бойынша таратылады.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Түйінді сөздер:
Помпаж, мойынтіректер, турбомен үрлеу, турбокомпрессор, жапқыш, резонанс, жиілік, еркін айналу

ТҮЙІНДЕМЕ

Помпаж – бұл компрессордың тұрақсыз жұмыс режимі, оның барысында қысымның күрт секірулері және ауаның немесе газдың біркелкі емес берілуі байқалады. Бұл компрессордың кірісі мен шығысы арасындағы қысым айырмашылығы тым үлкен болған кезде пайда болады. Турбокомпрессорлы қозғалтқыштарда бұл көбінесе жұмыс кезінде өзгеретін жүктемелерге байланысты, бұл турбокомпрессордың сорғы және турбина дөңгелектерінің қалыпты жұмысын бұзады.

Турбокомпрессорды сынауға арналған стендтің конструкциясын жетілдіру жөніндегі іс-шаралар кешені оның нақты пайдалану режимдерін модельдеуге және помпаж құбылыстарының пайда болу шектерін анықтауға бағытталды. Зерттеулер Polytec CLV-3D өлшеу кешенін қолдану арқылы жүргізілді. Діріл сипаттамаларын тіркеу үшін турбинаның білігіне дискіге басылған арнайы сақина элементтері орнатылды, олардың көмегімен тербелістер қозғалды. Алынған эксперименттік нәтижелер әдістің қайталануын растады және әрбір анықталған режимнің белгілі бір табиғи тербеліс жиіліктеріне сәйкестігін анықтауға мүмкіндік берді. Анықталған жиілік диапазондарын рұқсат етілген пайдалану режимдерінен алып тастаған жөн. Бұл тәсілді іске асыру помпаж аймағында жұмыстың алдын алу есебінен турбокомпрессордың сенімділігі мен беріктігін арттыруға бағытталған.

keywords:
surge, bearings, turbocharging, turbocharger, valve, resonance, frequency, coasting.
.

ABSTRACT

Surge is an unstable compressor operating mode characterized by sudden pressure surges and uneven air or gas delivery. This occurs when the pressure difference between the compressor inlet and outlet becomes too great. In turbocharged engines, this is often due to changing loads during operation, which disrupts the normal operation of the turbocharger pump and turbine wheels.

A series of measures to improve the turbocharger test rig's design focused on simulating real-world operating conditions and determining the limits of surge phenomena. The studies were conducted using the Polytec CLV-3D measuring system.

To record vibration characteristics, special ring elements were installed on the turbine shaft, pressed against the disk, through which vibrations were excited. The experimental results obtained confirmed the reproducibility of the method and allowed us to establish the correspondence of each identified mode to specific natural vibration frequencies. It is advisable to exclude the detected frequency ranges from the permissible operating conditions. The implementation of this approach is aimed at increasing the reliability and durability of the turbocharger by preventing operation in the surge zone.

КІРІСПЕ

Ауыл шаруашылығы машиналарының қозғалтқыштарында турбокомпрессорларды қолдану қуат агрегаттарын мәжбүрлеуді және олардың меншікті қуатын арттыруды ғана емес, сонымен қатар отын үнемділігін, экологиялық сипаттамалары мен сенімділігін қоса алғанда, техникалық деңгей көрсеткіштерін кешенді арттыруға ықпал етеді. Қолданылатын тәсілдер мен жекелеген құрамдас бөліктерді бағалау әдістемелерінің белгілі бір шарттылығына қарамастан, жылу қозғалтқыштарының энергетикалық балансының сапалық сәйкестігі сақталады (Ханин және т.б., 1991).

Турбокомпрессордың помпажы оның жұмысының төтенше режимі болып табылады, ол шығуда қысым пульсациясының пайда болуымен сипатталады, бұл жұмыс дөңгелегінің қалақша аппаратына соққы жүктемелерінің пайда болуына әкеледі. Бұл жүктемелер қысқа уақыт ішінде турбокомпрессор элементтеріне айтарлықтай зақым келтіруі мүмкін. Қозғалтқыштың жұмыс сипаттамасы мен помпаж шекарасы арасындағы қашықтықтың азаюына байланысты қысымның жоғарылау дәрежесі төмендеген кезде турбокомпрессор помпаждық тұрақсыздық аймағында, оның ішінде қозғалтқышқа есептелмеген ауа көлемінің түсуіне байланысты жұмыс істейтін режим сөзсіз пайда болады. Бұл жағдайларда диффузордың қалыпты жұмысы бұзылады және критикалық мәндерге жеткенде, жұмыс дөңгелегінің қалақтарынан ағын бұзылады, тән импульстік жүктемелер мен акустикалық әсерлермен бірге жүреді (Zadorozhnaya, 2015).

Трактор қозғалтқыштарына тән жүктемелердің жоғары стохастикасы олардың негізгі тораптары мен агрегаттарының істен шығу динамикасының өсуіне әкеледі (Плаксин және т.б., 2014). Қалыпты пайдалану барысында турбонаддув жүйелерімен жабдықталған қозғалтқыштарда жүктемелердің айнымалы сипаты турбокомпрессордың сорғы және турбиналық дөңгелектерінің геометриялық және пайдалану параметрлерінің өзгеруіне әкеледі, бұл практикалық зерттеулердің деректері бойынша оның элементтерінің бұзылуына себеп болады (Плаксин және т.б., 2015а). Турбокомпрессорлардың істен шығу үлесі қозғалтқыштардың жалпы істен шығу санының 7–15 % құрайтынын ескерсек (Калиев және т.б., 2019), оларды нақты пайдалану жағдайларын жаңғырта отырып, мамандандырылған стендтерде сынау жүргізудің объективті қажеттілігі туындайды. Осыған байланысты турбокомпрессорлардың сынақ стендтерінің конструкциясын жетілдіру және помпаждық құбылыстарды бақылау әдістерін енгізу пайдалану процесінде істен шығу ықтималдығын төмендетудің тиімді шаралары болып табылады (Кабанов және Грыжебовский, 2016).

Жоғарыда айтылғандарға сәйкес мақсат қойылды:

Гидравликалық аккумуляторды қолдана отырып майлау процесін жетілдіру негізінде ішкі жану қозғалтқышының турбокомпрессорларын сынау әдісі мен стендін әзірлеу.

Зерттеудің келесі міндеттері тұжырымдалды:

1. Турбокомпрессордың техникалық күйіне байланысты оның параметрлерінің, еркін айналу және үдеу үдерістерінің өзгеру заңдылықтарын анықтау.

2. Турбокомпрессордың техникалық жай-күйін кешенді және элементтік бағалау бойынша техникалық құралдар, әдістемелер кешенін әзірлеу және негіздеу.

3. Іштен жану қозғалтқышын және арнайы әзірленген конструкциядағы стендпен жабдықталған жүйені стендтік сынақтан өткізуге арналған әдістеме мен сынақ бағдарламасын әзірлеу және іске асыру.

4. Газ турбиналық үрлеу жүйелерін пайдалану сынақтарының бағдарламасын әзірлеу және іске асыру, жүргізілген зерттеулердің тиімділігін бағалау.

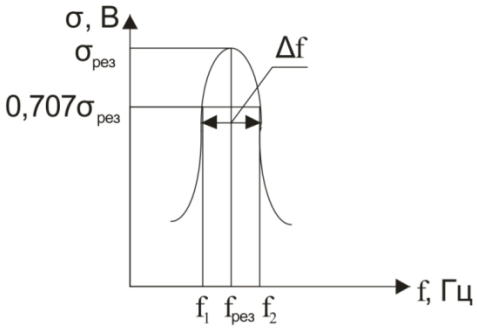
Ауыл шаруашылығы машиналарының қозғалтқыштарында турбокомпрессорларды қолдану қуат агрегаттарын мәжбүрлеуді және олардың меншікті қуатын арттыруды ғана емес, сонымен қатар отын үнемділігін, экологиялық сипаттамалары мен сенімділігін қоса алғанда, техникалық деңгей көрсеткіштерін кешенді арттыруға ықпал етеді. Жеке компоненттерді бағалау үшін қолданылатын тәсілдер мен әдістердің белгілі бір шарттылығына қарамастан, жылу қозғалтқыштарының энергетикалық балансының сапалық сәйкестігі сақталады (Ханин және т.б., 1991).

Турбокомпрессордың помпажы оның жұмысының төтенше режимі болып табылады, ол шығуда қысым пульсацияларының пайда болуымен сипатталады, бұл жұмыс дөңгелегінің қалақша аппаратына соққы жүктемелерінің пайда болуына әкеледі. Бұл жүктемелер қысқа уақыт ішінде турбокомпрессор элементтеріне айтарлықтай зақым

келтіруі мүмкін. Қозғалтқыштың жұмыс сипаттамасы мен помпаж шекарасы арасындағы қашықтықтың азаюына байланысты қысымның жоғарылау дәрежесі төмендеген кезде турбокомпрессор помпаждық тұрақсыздық аймағында, оның ішінде қозғалтқышқа есептелмеген ауа көлемінің түсуіне байланысты жұмыс істейтін режим сөзсіз пайда болады. Бұл жағдайларда диффузордың қалыпты жұмысы бұзылады және критикалық мәндерге жеткенде, жұмыс дөңгелегінің қалақтарынан ағын бұзылады, тән импульстік жүктемелер мен акустикалық әсерлермен бірге жүреді (Zadorozhnaya, 2015).

Трактор қозғалтқыштарына тән жүктемелердің жоғары стохастикасы олардың негізгі тораптары мен агрегаттарының істен шығу динамикасының өсуіне әкеледі (Плаксин және т.б., 2014). Турбокомпрессорлық жүйелермен жабдықталған қозғалтқыштардың қалыпты жұмысы кезінде жүктемелердің ауыспалы сипаты турбокомпрессордың сорғы мен турбиналық дөңгелектерінің геометриялық және пайдалану параметрлерінің өзгеруіне әкеледі, бұл практикалық зерттеулердің деректері бойынша оның элементтерінің бұзылуына себеп болады (Гимадиев және т.б., 1998). Турбокомпрессорлардың істен шығу үлесі қозғалтқыштардың жалпы істен шығу санының 7-15 % құрайтынын ескерсек (Калиев және т.б., 2019), оларды нақты пайдалану жағдайларын жаңғырта отырып, мамандандырылған стендтерде сынау жүргізудің объективті қажеттілігі туындайды. Осыған байланысты турбокомпрессорлардың сынақ стендтерінің конструкциясын жетілдіру және помпаждық құбылыстарды бақылау әдістерін енгізу пайдалану процесінде істен шығу ықтималдығын төмендетудің тиімді шаралары болып табылады (Кабанов және Грыжебовский, 2016).

Серпімді жүйелердің тербеліс теориясынан жүйенің меншікті жиіліктерінің әрқайсысы белгілі бір тербеліс формасына (белгілі бір тербеліс жиілігі) сәйкес келетіні белгілі сурет 1 (Игнатьев және т.б., 2017b).



1-сурет. Виброкернеулер амплитудасының тәуелділігі: виброкернеулерінің амплитудасының σ, В жиілігіне тәуелділігі f, Гц

Ескерту – Авторлмен жасалған (Калиев Б.К. 2025)

Ең үлкен тербелмелі процестер теориясында резонанстық қисықты зерттеу қызығушылық тудырады.

Резонанстық қисық алынғаннан кейін ол формула бойынша өңделеді,

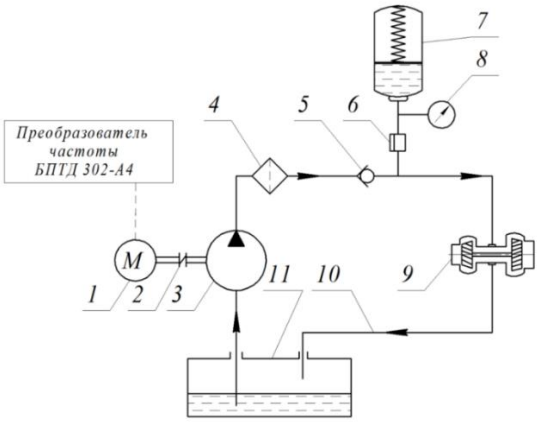
$$\delta = \frac{\pi \cdot \Delta f}{f_P}, \quad (1)$$

мұнда δ – тербелістердің декременті; Δf – резонанстық кернеу деңгейіндегі резонанстық қисықтың ені резонанстық кернеуден 0,707; f p – резонанстық жиілік.

Ұсынылған әдіс кез-келген тербелмелі жүйеде демпферлік шаманы өлшеудің бір әдісі болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

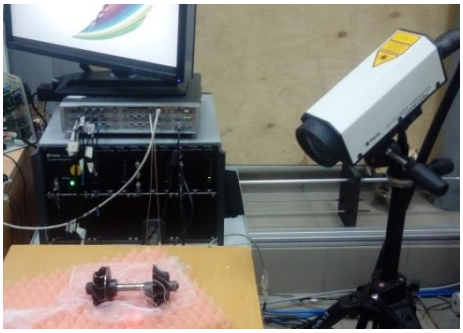
Әдеби дереккөздерді талдау және сынақтар негізінде помпажды құбылыстарын болдырмау үшін эксперимент жүргізу қажет болды. ТКР роторын айналдырған кезде ең үлкен әсер, әсіресе, компрессор доңғалағына тез өзгеретін тербелістер кезінде көрінді Эксперименттік зерттеулер жүргізу кезінде гидроаккумуляторы бар стенд пайдаланылды. Стендте турбокомпрессордың нақты жұмыс режимдерін пайдалану және сынақтар жүргізу кезінде помпаж шекараларын зерттеуден тұратын ТКР сынау үшін стенд дизайнын жетілдіру (2-сурет). Қазіргі уақытта зерттеу стендінің алдыңғы нұсқаларының кемшіліктерін ескере отырып, стендтің дизайны жетілдірілуде (Плаксин және т.б., 2015b).



2-сурет. Стендтің құрылымдық схемасы: 1 – асинхронды электр қозғалтқышы; 2 – муфта; 3 – тісті май сорғысы; 4 – май фильтрі; 5 – қайтармалы клапан; 6 – электромагниттік (соленоидтің) клапан; 7 – гидроаккумулятор; 8 – манометр; 9 – турбокомпрессор; 10 – құбыр; 11 – Майлы бак

Ескерту – Авторлмен жасалған (Калиев Б.К. 2025)

Эксперименттік зерттеулер жүргізу турбокомпрессордың стендте өткізілген критикалық сынақтардан кейінгі геометриясын тексеру және бақылауды қамтыды.. Зерттелетін объект – турбокомпрессор роторы, ол қанатшалары бар компрессордың алюминий дискінен және турбинасы бар болат біліктен тұрады. (3-сурет).



3-сурет. Өлшеу кешені лазерлік виброметр Polytec CLV-3D Laser Vibrometer және зерттелетін жүйесі ротор ТКР

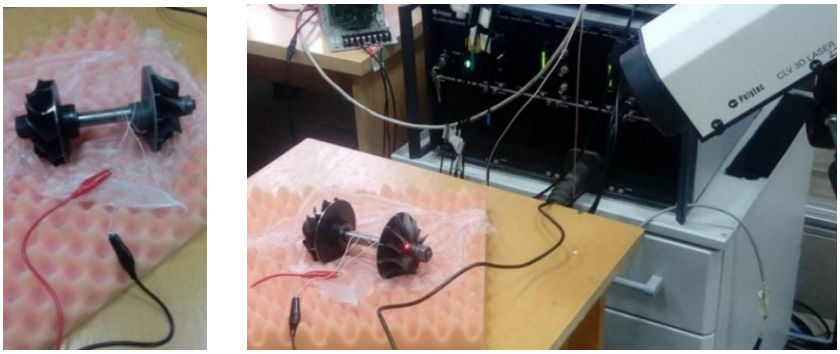
Ескерту – Авторлмен жасалған (Калиев Б.К., 2025)

Стендте сынақтан кейін жүргізілетін ТКР пайдалану параметрлерін өлшеу әдістемесі келесідей болды:

- турбина білігін дискімен алу;

- үш компонентті лазерлік виброметр polytec CLV-3D Laser Vibrometer өлшеу кешенінде сынауға дейін және сынаудын кейін турбина мен диск параметрлерін өлшеуді жүргізу. CLV-3D кең динамикалық диапазоны, тамаша өткізу қабілеті және төмен шу оны көптеген заманауи қолданбаларда пайдалануға мүмкіндік береді. Өлшеу нүктесінің диаметрі небәрі 80 мкм кез келген акселерометрге қарағанда әлдеқайда аз және тіпті миниатюралық компоненттерде де өлшеуге мүмкіндік береді [CLV-3D Compact 3-D Laser Vibrometer for simultaneous 3-D measurement of dynamics].

Сынақтар – бұл аналогтық координаталық түрлендіруді жүзеге асыратын және x, y және z координаттары бойынша шынайы компоненттерді шығаратын дербес компьютердегі жиіліктің біркелкі өзгеруімен синусоидалы тербелістердің қозуы. Өлшеу үшін сақиналар дискіге басылған турбинаның білігіне қойылып, тербелістер "сақиналардың" көмегімен қозғалды (4, а-сурет). Жүйе үш арналы CLV лазерлік виброметрді басқару блогынан тұрады, ол CLV-3D оптикалық сенсорлық басымен қосылған, бұл бас үш тәуелсіз CLV оптикалық жүйесін қамтиды, олардың барлығы бірдей өлшеу нүктесіне, алдыңғы линзадан 310 мм қашықтықта фокусталған. (4, б-сурет). Әрбір шығатын лазер сәулесі бетке қатысты 12° бұрышпен еңкейген, бірақ өлшеу нүктесіне үш түрлі бағыттан бағытталған, олар шығу жазықтығында 120° бұрышпен бөлінген.. Зерттелетін объектіге сәулелер нүктесінде өлшемі 3×3 мм^2 болатын арнайы фотоқағаз (5, а-сурет) желімделеді, оның көмегімен нәтиже байланыссыз тәсілмен анықталады. Біз ТКР компрессорының қалақтарында салмақпен және онсыз әртүрлі өлшеулер жүргіземіз. Салмағы 6 мм және диаметрі 5 мм, олар элементтің жергілікті өзгерістерін анықтауға көмектеседі (5, а-сурет). Үш жазықтықтағы ТКР әртүрлі элементтерінің резонанстық жиіліктері анықталады.



а б

4-сурет. Зерттелетін жүйе

Ескерту – Автормен жасалған (Калиев Б.К. 2025)

а б в

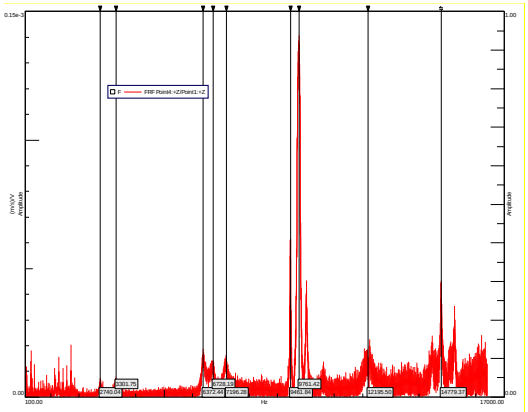
5-сурет. Зерттелетін жүйе

Ескерту – Автормен жасалған (Калиев Б.К. 2025)

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу стендінен турбокомпрессордың роторы алынып тасталды. Сыртқы бағдарламалық есептеулер үшін бұл шикі шығыстар үш арналы деректерді жинау тақтасына қосылады және компьютермен өңделеді. Компрессор роторының резонанстық жиіліктері мен тербеліс амплитудасы дәйекті түрде тексерілді. Қанатшадан (салмақпен және салмақсыз), диск, білік және турбинаның сигналдарын өңдеу кезінде графиктерде 9500 Гц жиілігінде және компрессор дөңгелегінің қанатшасында 12100 және 17479 Гц аймақтарында өте шашыраңқы шыңдар байқалады (6-сурет).

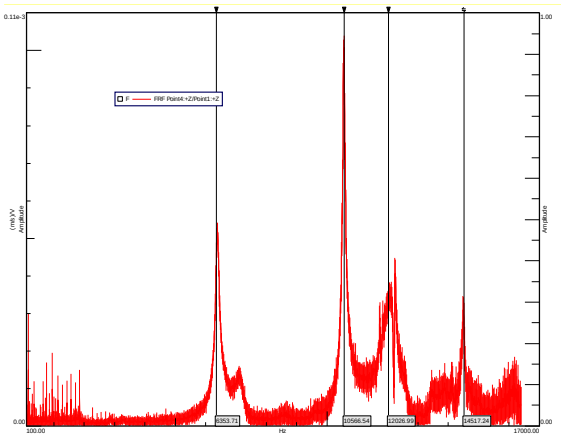
Эксперимент барысында иық пышақтарының тербеліс жиіліктері 2740, 3301, 6372, 6728 және 7196 Гц диапазонында көптеген шыңдармен байқалды. Төменде Z осі бойынша сигналдар талданады, өйткені оларда амплитудалық тербелістердің көптеген жарылыстары бар. Пышақтарды өлшеу кезінде лазер шамамен 310 мм және сәл жоғары болды, сондықтан координаттар жүйесі айтарлықтай өзгерген жоқ. Жалпы нәтижені көрсету үшін компрессор дөңгелегінің әртүрлі нүктелерінде өлшеулер жүргізілді.



6-сурет. Компрессорлық доңғалақ роторының тербеліс амплитудасы ТКР

Ескерту – Авторлмен жасалған (Калиев Б.К. 2025)

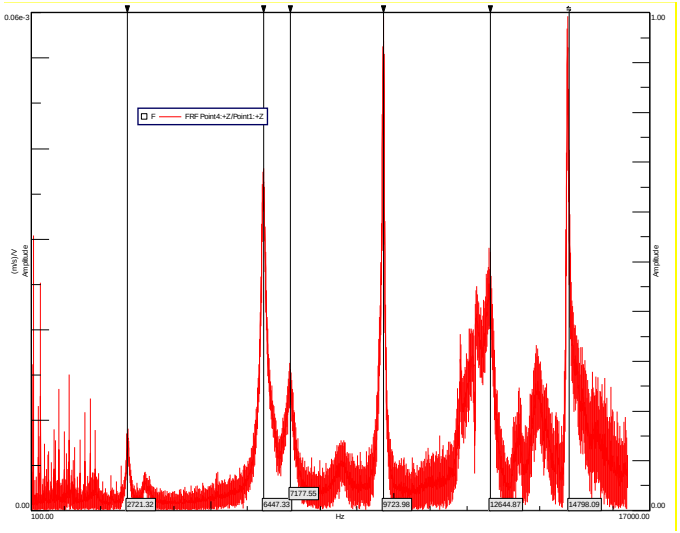
Мүжілген лопатканы жүкшесімен бірге зерттеу (5а сурет). Компрессор дөңгелегінің қалақшасында өлшеу жүргізілетін біреуінен басқа, диаметрі 5 мм жүкшелер жапсырылады. Графикте сигналдарды өңдеу (7-сурет) 6353 Гц жиілікте және 10566 Гц, 12026 Гц және 14517 Гц аймағында айқын шыңдар бар.



7-сурет. Мүжілген компрессор дөңгелегіндегі тербеліс амплитудалары (қалған жүкшелерде)

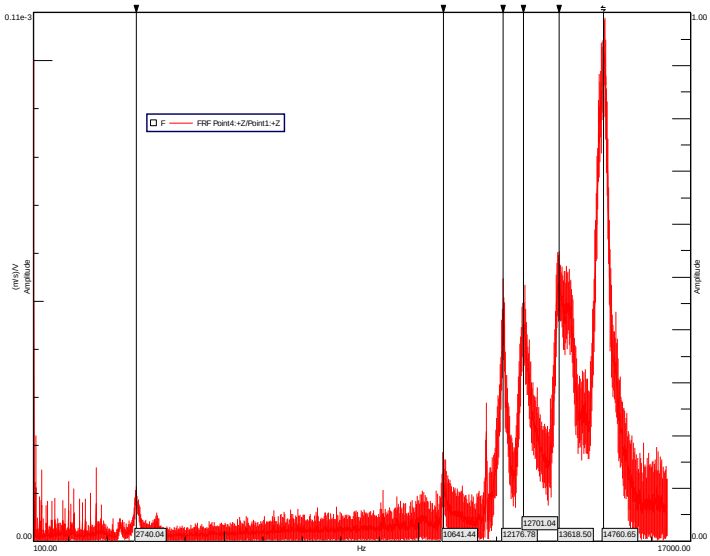
Ескерту – Авторлмен жасалған (Калиев Б.К. 2025)

Иық пышағын салмақпен зерттеу (5, б-сурет). Сигналдарды өңдеу кезінде (8-сурет) 2721 Гц, 6447 Гц, 7177 Гц жиіліктерінен бастап, сондай-ақ 9723 Гц, 12644 Гц және 14798 Гц аймақтарында көптеген әртүрлі шыңдар байқалады.



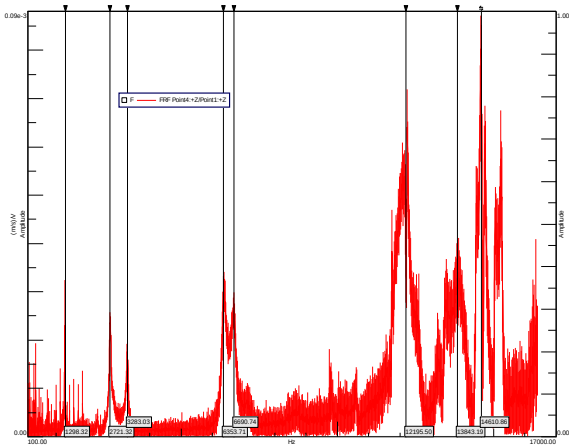
8-сурет. Компрессорлық доңғалақтың тербеліс амплитудасы
Ескерту – Авторлмен жасалған (Калиев Б.К., 2025)

Салмағы бар компрессорлық доңғалақтың шағын қалақшасын зерттеу (5, в сурет). Компрессор дөңгелегінің қалақшасына фотобумаға жапсырылады, құрылғы бапталып, өлшеу нүктесі фокустауға келтіріледі. Графикте сигналдарды өңдеу (9-сурет) 2740 Гц жиілікте және 10641-14780 Гц аймағында айқын шыңдар бар.



9-сурет. Дөңгелектің кіші лопаткасының тербеліс амплитудалары
Ескерту – Авторлмен жасалған (Калиев Б.К. 2025)

Дискіні зерттеу. Шағын шыңдар 1298, 2721 және 3283 Гц. 6353, 6690 Гц графиктің ортасында айқын шыңдар. 12195, 13843 және 14610 Гц айқын шыңдар (10-сурет).



10-сурет. Компрессор дискісінің тербеліс амплитудасы

Ескерту – Авторлар жасалған (Калиев Б.К. 2025)

ҚОРЫТЫНДЫ

Помпаж бұл турбокомпрессор мен айдау құбырындағы қысымның ауытқу процесін білдіретіндіктен, қозғалтқыш білігіндегі жүктеме де өзгереді, сондықтан токта жоғары гармоника немесе оның амплитудасының тербелісі пайда болады, оны түзетуге болады (Хадиев және т.б., 2014). Соңғы жылдары зерттеу техникасының дамуы спектрлік пульсацияларды шешімнің көпөлшемділігін және ағын параметрлерінің теңсіздігін ескере отырып талдауға мүмкіндік берді. Тәжірибе мен есептеулерге негізделген турбоүрлеу жүйелерінің түйіндік элементтерін жобалауды қолдану цилиндрлерден газдарды шығару және турбокомпрессор турбиналарын қамтамасыз ету процестерінің жағдайларын жақсарту нәтижесінде қозғалтқыш көрсеткіштерін елеулі түрде арттыруға мүмкіндік берді (Gritsenko et al., 2017).

Зерттеулер көрсеткендей, кешенді шаралар қолданбай, турбокомпрессордың жеке бөлшектерінің бұзылуына әкелуі мүмкін. Турбокомпрессор роторының учаскелеріндегі параметрлердің пульсациясын өлшейтін эксперименттік зерттеулер 14610 Гц-ке дейінгі үлкен шашырауды көрсетті.

Жоғарыда айтылғандар аналитикалық зерттеулер кезінде қолданылатындығын растайды және турбокомпрессор помпаждың пайда болмауы үшін одан әрі тәжірибе кезінде пайдалану режимдерінен алып тастаймыз.

Бұл тәсілдің практикасы тәжірибелі мәліметтермен толық расталады олардың әрқайсысы өз жиілігіне жауап береді. Турбокомпрессордың сенімділігін қамтамасыз ету үшін одан әрі жұмыс помпаждың пайда болуын болдырмауға бағытталатын болады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: мүдделер қақтығысы жоқ.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл мақала авторлардың бірінің диссертациялық зерттеулерін орындау аясында, өз қаражаты есебінен дайындалды.

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКАЛЫҚ КОМИТЕТТІҢ (IRB) МАҚҰЛДАУЫ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Қолданылмайды.

АҚПАРАТТАНДЫРЫЛҒАН КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Қолданылмайды.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректер негізделген сұрау бойынша жауапты автордан ұсынылуы мүмкін.

АЛҒЫС: Авторлар әріптестеріне әдістемелік қолдау және пайдалы талқылаулар үшін, сондай-ақ мақаланың сапасын жақсартуға ықпал еткен құнды ескертулер үшін анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар түйіндеме мәтінін қысқарту және пайдаланылған әдебиеттер тізімін безендіру үшін жасанды интеллект құралдарын пайдаланған.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Ханин Н.С., Аболтин Э.В., Лямцев Б.Ф., Зайченко Е.Н., & Аршинов Л.С. (1991). Автомобильные двигатели с турбонаддувом: учебник для вузов. Машиностроение. // Khanin, N.S., Aboltin, E.V., Lyamtsev, B.F., Zaichenko, E.N., & Arshinov, L.S. (1991). Avtomobil'nye dvigateli s turbonadduvom [Automobile engines with turbocharging]. Mashinostroenie. (In Russ.)

Zadorozhnaya, E.A. (2015). Solving a thermohydrodynamic lubrication problem for complex-loaded sliding bearings with allowance for rheological behavior of lubricating fluid. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 44(1), 46–56.

Плаксин А.М. и др. (2014). Повышение надежности турбокомпрессоров автотракторной техники применением гидроаккумулятора. Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 8, 176–180 // Plaksin, A.M., et al. (2014). Povyshenie nadezhnosti turbokompressorov avtotraktornoy tekhniki primeneniem gidroakkumulyatora [Improving the reliability of turbochargers of automotive and tractor equipment using a hydraulic accumulator]. Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University], 8, 176–180. (In Russ.)

Игнатьев А.Г., Гриценко А.В., Бурцев А.Ю., Глемба К.В., Карпенко А.Г., & Руднев В.В. (2017a). Исследование помпажа турбокомпрессора в режимах его торможения регулируемой заслонкой. Фундаментальные исследования, 10–2, 222–227. // Ignat'ev, A.G., Gritsenko, A.V., Burtsev, A.Yu., Glemba, K.V., Karpenko, A.G., & Rudnev, V.V. (2017a). Issledovanie pompazha turbokompressora v rezhimakh ego tormozheniya reguliruemoy zaslonkoy [Study of turbocharger surge in braking modes using an adjustable damper]. Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research], 10–2, 222–227. (In Russ.)

Плаксин А. М. и др. (2015a). Продление срока службы турбокомпрессоров автотракторной техники применением гидроаккумулятора в системе смазки. Фундаментальные исследования, 6–4, 728–732. // Plaksin, A. M., et al. (2015a). Prodlenie sroka sluzhby turbokompressorov avtotraktornoy tekhniki primeneniem gidroakkumulyatora v sisteme smazki [Extending the service life of turbochargers of automotive and tractor equipment using a hydraulic accumulator in the lubrication system]. Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research], 6–4, 728–732. (In Russ.)

Гимадиев А.Г. и др. (1998). Снижение виброакустических нагрузок в гидромеханических системах. В.П. Шорин & Е.В. Шахматов (ред.). СГАУ // Gimadiev, A.G., et al. (1998). Snizhenie vibroakusticheskikh nagruzok v gidromekhanicheskikh sistemakh [Reduction of vibroacoustic loads in hydromechanical systems]. V.P. Shorin & E.V. Shakhmatov (Eds.). SGAU. (In Russ.)

Калиев Б.К., Исинтаев Т.И., Гриценко А.В., & Бурцев А.Ю. (2019). Анализ отказов систем наддува автотракторных ДВС. В Байтурсыновские чтения 2019: материалы Международной научно-практической конференции «Многогранность великой степи: духовное возрождение, знание и инновации» (с. 415–420) // Kaliev, B. K., Isintaev, T. I., Gritsenko, A. V., & Burtsev, A. Yu. (2019). Analiz otkazov sistem nadduva avtotraktornykh DVS [Failure analysis of boost systems of automotive and tractor internal combustion engines]. In Baitursynovskie chteniya 2019: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Mnogogrannost' velikoy stepi: dukhovnoe vozrozhdenie, znanie i innovatsii” [Baitursynov Readings 2019: Proceedings of the

International Scientific and Practical Conference "The Versatility of the Great Steppe: Spiritual Revival, Knowledge and Innovations"] (pp. 415–420). (In Russ.)

Кабанов О.В., & Грыжебовский А.О. (2016). Современные тенденции противопомпажной защиты компрессорного оборудования. Актуальные проблемы современной науки, 2(87), 266–269 // Kabanov, O.V., & Gryzhebovskiy, A.O. (2016). Sovremennye tendentsii protivopompazhnoy zashchity kompressornogo oborudovaniya [Modern trends in anti-surge protection of compressor equipment]. Aktual'nye problemy sovremennoy nauki [Current Problems of Modern Science], 2(87), 266–269. (In Russ.)

Игнатьев А.Г., Гриценко А.В., & Бурцев А.Ю. (2017b). Исследование помпажа турбокомпрессоров. АПК России, 24(4), 985–989 // Ignat'ev, A.G., Gritsenko, A.V., & Burtsev, A.Yu. (2017b). Issledovanie pompazha turbokompressorov [Study of turbocharger surge]. APK Rossii [Agro-Industrial Complex of Russia], 24(4), 985–989. (In Russ.)

Плаксин А.М., Гриценко А.В., Бурцев А.Ю., & Глемба К.В. (2015b). Способ обеспечения работоспособности турбокомпрессора дизелей с применением автономного смазочно-тормозного устройства. Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 5, 89–94. // Plaksin, A.M., Gritsenko, A.V., Burtsev, A.Yu., & Glemba, K.V. (2015b). Sposob obespecheniya rabotosposobnosti turbokompressora dizeley s primeneniem avtonomnogo smazochno-tormoznogo ustroystva [A method for ensuring the operability of diesel turbochargers using an autonomous lubrication and braking device]. Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University], 5, 89–94. (In Russ.)

CLV-3D Compact 3-D Laser Vibrometer for simultaneous 3-D measurement of dynamics. (n.d.). https://em.susu.ru/wp-content/uploads/2017/01/Polytec-CLV-3D-3220.pdf

Хадиев М.Б., Зиннатуллин Н.Х., & Нафиков И.М. (2014). Механизм помпажа в центробежных компрессорах. Вестник Казанского технологического университета, 17(8), 262–266. // Khadiev, M.B., Zinnatullin, N.Kh., & Nafikov, I.M. (2014). Mekhanizm pompazha v tsentrobezhnykh kompressorakh [Mechanism of surge in centrifugal compressors]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 17(8), 262–266. (In Russ.)

Gritsenko, A., Plaksin, A., & Shepelev, V. (2017). Studying lubrication system of turbocompressor rotor with integrated electronic control. Procedia Engineering, 206, 611–616. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817352104

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Калиев Бейбит Кансбаевич – Философия докторы (PhD), аға оқытушы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Қостанай қ., Қазақстан

Калиев Бейбит Кансбаевич – Доктор философии (PhD), старший преподаватель, Некоммерческое акционерное общество «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Казахстан

Kaliyev Beibit Kansbayevich – Doctor of Philosophy (PhD), Senior Lecturer, Non-profit limited company «Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University», Kostanay, Kazakhstan

e-mail: kaliyevb@mail.ru

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3438-0067

Бекмырза Жұмаш Айтжанұлы – Философия докторы (PhD), «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Қостанай қ., Қазақстан
Бекмырза Жұмаш Айтжанұлы – Доктор философии (PhD), Некоммерческое акционерное общество «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Казахстан
Bekmyrza Zhumash Aitzhanuly – Doctor of Philosophy (PhD), Non-profit limited company «Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University», Kostanay, Kazakhstan
e-mail: 5112431@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5086-4127

Бедыч Татьяна Витальевна – техника ғылымдарының кандидаты, М.Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті, Қостанай қ., Қазақстан
Бедыч Татьяна Витальевна – кандидат технических наук, Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова, г. Костанай, Казахстан
Bedych Tatyana Vitalievna – Candidate of Technical Sciences, Kostanay Engineering and Economics University named after M.Dulatov, Kostanay, Kazakhstan
e-mail: tbedych@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3642-8917

Ғабдысалық Риза – PhD, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
Ғабдысалық Риза – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Gabdysalyk Riza – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-9184-0897

Байгереев Самат Ракимгалиевич – PhD, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Байгереев Самат Ракимгалиевич – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Baigereyev Samat – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_6
МРНТИ 61.01.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В АППАРАТЕ С ТРУБЧАТОЙ НАСАДКОЙ ИЗ НЕПРЕРЫВНО СОЕДИНЕННЫХ ТРУБ

ҮЗДІКСІЗ ЖАЛҒАНҒАН ҚҰБЫРЛАРДЫҢ ҚҰБЫРЛЫ ҚАПТАМАСЫ БАР ҚҰРЫЛҒЫДАҒЫ ЖЫЛУ БЕРУ ПРОЦЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

MODELING THE HEAT TRANSFER PROCESS IN A DEVICE WITH A TUBULAR PACKING OF CONTINUOUSLY CONNECTED PIPES

Д.К. Камалбек [1], Л.М. Ульев [2], А.А. Волненко [1], Д.К. Жумадуллаев [1]*, А.А. Абжапбаров [1]
[1] Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан
[2] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
*Автор-корреспондент: Жумадуллаев Даулет Кошкарович, e-mail: daulet_ospl@mail.ru

Ключевые слова:
тепломассообменный аппарат, регулярная трубчатая насадка, отводы, теплопередача, коэффициент теплоотдачи, математическая модель, тепловая нагрузка, тепловой баланс.

АННОТАЦИЯ
Для проведения экспериментальных исследований и численных экспериментов процесса теплопередачи, исходя из анализа конструкции аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры с внешним и внутренним расположением коллекторов, создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата. Предложена простая зонная схема, которая позволяет получить систему линейных уравнений для температур теплоносителей в выбранных зонах аппарата. Решение полученной системы уравнений удовлетворяет тепловым балансам в аппарате. Распределение температур теплоносителей вдоль аппарата показывает, что лимитирующей стадией процесса теплообмена является теплообмен со стороны газа к поверхности теплообмена. Для исключения этой лимитирующей стадии необходимо, чтобы площадь поверхности теплообмена со стороны газового теплоносителя была больше площади теплообмена со стороны жидкости во столько раз, во сколько раз коэффициент теплопередачи со стороны газового теплоносителя h_g меньше коэффициента теплопередачи жидкого теплоносителя h_l к внутренней поверхности трубы.

Түйінді сөздер:
жылу және масса алмасу аппараты, тұрақты құбырлы орау, иілу, жылу беру, жылу беру коэффициенті, математикалық модель, жылу жүктемесі, жылу балансы.

ТҮЙІНДЕМЕ
Жылу беру процесі бойынша тәжірибелік зерттеулер мен сандық тәжірибелер жүргізу үшін коллекторлардың сыртқы және ішкі орналасулары бар қалыпты құрылымның құбырлы орамасы бар құрылғылардың конструкциясын талдау негізінде құрылғы корпусының ішінде диаметрі бірдей үздіксіз және тізбекті жалғанатын құбырлар жүйесі түрінде жасалған қалыпты орамасы бар аппарат құрылды. Құрылғының таңдалған аймақтарындағы салқындатқыш сұйықтықтардың температуралары үшін сызықтық теңдеулер

© 2026 Д.К. Камалбек, Л.М. Ульев, А.А. Волненко, Д.К. Жумадуллаев, А.А. Абжапбаров
Данная работа распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

жүйесін алуға мүмкіндік беретін қарапайым аймақ схемасы ұсынылған. Алынған теңдеулер жүйесінің шешімі құрылғыдағы жылу баланстарын қанағаттандырады. Салқындатқыш сұйықтықтардың температураларының құрылғы бойымен таралуы жылу алмасу процесінің шекті сатысы газ жағынан жылу алмасу бетіне жылу алмасу екенін көрсетеді. Бұл шектеу сатысын жою үшін газ жағындағы жылу алмасу бетінің ауданы сұйық жағындағы жылу алмасу ауданынан газ жағынан h_g жылу беру коэффициенті сұйық салқындатқыштың h_l құбырдың ішкі бетіне жылу беру коэффициентінен қанша есе аз болса, сонша көп болуы қажет.

keywords:
heat and mass transfer apparatus, regular tubular packing, bends, heat transfer, heat transfer coefficient, mathematical model, heat load, heat balance.

ABSTRACT

To conduct experimental studies and numerical experiments on the heat transfer process, based on the analysis of the design of devices with a tubular packing of a regular structure with external and internal arrangement of collectors, an apparatus with a regular packing made in the form of a system of continuously and sequentially connected pipes of the same diameter inside the device body was created. A simple zone scheme is proposed, which allows obtaining a system of linear equations for the temperatures of the coolants in the selected zones of the device. The solution to the resulting system of equations satisfies the heat balances in the device. The distribution of the temperatures of the coolants along the device shows that the limiting stage of the heat exchange process is heat exchange from the gas side to the heat exchange surface. To eliminate this limiting stage, it is necessary that the area of the heat exchange surface on the gas side be greater than the area of heat exchange on the liquid side as many times as the heat transfer coefficient from the gas side h_g is less than the heat transfer coefficient of the liquid coolant h_l to the inner surface of the pipe.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих технологических процессах теплообмен между контактирующими фазами является основным или присутствует наряду с протеканием процессов сорбции или пылеулавливания. Непосредственный контакт взаимодействующих фаз при передаче тепла в разной степени изучен для полых форсуночных скрубберов, пенных аппаратов, скрубберов Вентури, насадочных аппаратов со стационарной и взвешенной насадкой (Айнштейн В.Г. и др., 2003; Балабеков О.С. и др., 1984; Балабеков О.С. и Волненко А.А., 2015).

Для проведения процесса теплопередачи представляет интерес использование регулярной трубчатой насадки. Известно, что аппараты с регулярным расположением насадочных элементов хорошо зарекомендовали себя в процессах абсорбции и пылеулавливания в производствах фосфора и хромовых соединений благодаря низкому гидравлическому сопротивлению и сравнительно высокой эффективности (Towler G. и Sinnott R., 2021; Couper J.R. и др., 2010; Hall S.M., 2018). Применение трубчатой насадки позволит использовать дополнительные преимущества, связанные с подачей или отбором тепла непосредственно в зоне контакта взаимодействующих фаз (Волненко А.А. и др., 2023).

Аппараты с регулярной структурой трубчатой насадки создавались применительно к проведению различных сорбционных процессов и пылеулавливания с обязательным присутствием процесса теплопередачи. Созданный класс аппаратов с регулярной трубчатой насадкой можно разделить на две группы – с внешним и внутренним расположением коллекторов (Волненко А.А. и др., 2023). Аппараты первой группы выполняются с гладкими прямыми трубами (Волненко А.А. и др., 2013), а также с применением турбулизаторов (Волненко А.А. и др., 2015а; Волненко А.А. и др., 2014). Сюда

же относится аппарат с насадкой с раздельными коллекторами для подачи и слива теплоносителя нечетных и четных слоев регулярной кольцевой трубчатой насадки (Волненко А.А. и др., 2021). Для очистки газовых потоков, содержащих высокоадгезионную пыль, созданы аппараты с комбинированной трубчато-взвешенной (Бишимбаев В.К. и др., 2017) и трубчато-фонтанирующей насадкой (Волненко А.А. и др., 2019).

К аппаратам второй группы относятся аппараты с трубчатой насадкой регулярной структуры и расположением коллекторов в зоне контакта (Волненко А.А. и др., 2020), двухступенчатый аппарат ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой (Волненко А.А. и др., 2022), а также аппарат, обеспечивающий чередование противоточного движения потоков холодных и горячих теплоносителей в трубах по сечению рабочей зоны трубчатой насадки (Волненко А.А. и др., 2024).

На основании анализа рассмотренных аппаратов нами предложен аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата (Волненко А.А. и др., 2023а). Для изучения процесса теплопередачи от газового потока к теплоносителю, движущемуся по трубам, проведено математическое моделирование, что и определяет актуальность данной статьи.

Новизной темы является получение математической модели процесса теплопередачи в аппарате с регулярной трубчатой насадкой из непрерывно соединенных труб.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Условием для проведения исследований является подготовка исходных данных, включающих физико-химические свойства теплоносителей и конструктивные параметры трубчатого пучка: размеры труб и отводов, шаги расположения труб в вертикальном и радиальном направлении.

Методы исследования – вычислительные эксперименты на основе полученной математической модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Математическое моделирование процесса теплопередачи в противоточном режиме проведем для аппарата, который представляет вертикальную емкость квадратного поперечного сечения с насадкой из непрерывно соединенных труб с помощью отводов. В трубе происходит вынужденная конвекция жидкости, течение которой направлено с верхней части аппарата в нижнюю. В аппарат жидкость поступает с температурой tl_0 и выходит из него с температурой $tl_в$. В нижнюю часть аппарата подается газ с температурой tg_6 (рисунок 1). Трубы соединены так, что они образуют пятислойную конструкцию, расположенную внутри емкости.

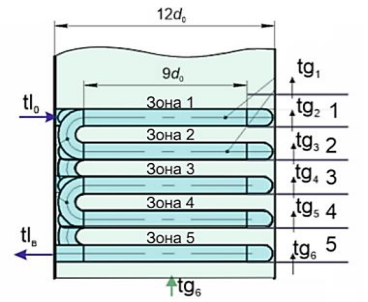


Рисунок 1. Зонная схема теплообменного аппарата (вид спереди): tl_0 – температура жидкости на входе; $tl_в$ – температура жидкости на выходе; tg_1 – tg_6 – температура газа в соответствующих зонах аппарата; d_0 – внешний диаметр трубы

Примечание – составлено автором на основе результатов собственных исследований

В каждом слое трубный пучок состоит из 6 прямолинейных участков, которые соединены между собой искривленными отрезками труб – отводами (рисунок 2).

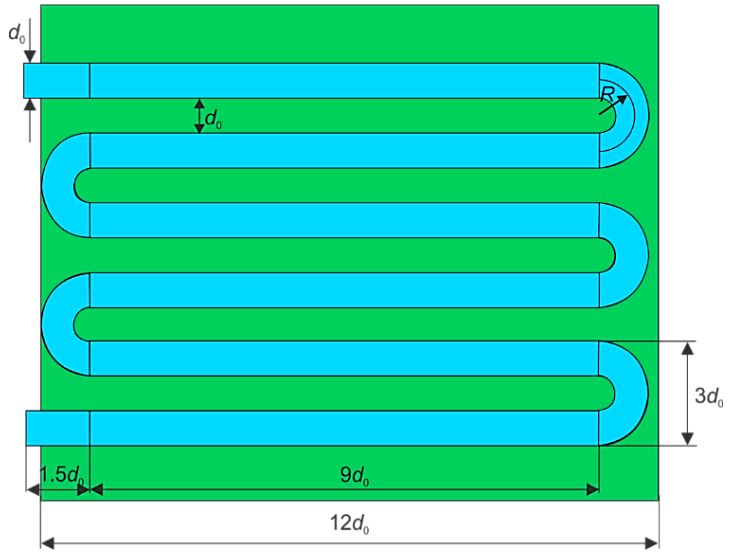


Рисунок 2. Горизонтальное расположение труб трубного пучка в зоне, на которые условно разделен аппарат (вид сверху): d_0 – внешний диаметр трубы; R – осевой радиус тороидального отвода

Примечание – составлено автором на основе результатов собственных исследований

Предположим, что внешний диаметр трубы равен d_0 = 0,026 м, расстояние между осями прямолинейных участков труб в одном слое равно $2d_0$, поэтому искривленные отрезки труб, которые соединяют прямолинейные трубы, можно представить как половину тора с осевым радиусом, равным $R = d_0$, и образующей окружностью с диаметром, равным d_0.

Далее для оценки теплообмена в аппарате предположим, что длина прямолинейного участка трубного пучка в слое равна $L = 9\ d_0$, тогда расстояние между крайними точками на соединяющих отводах будет равно 12 d_0, а расстояние между краями граничных участков прямолинейных труб будет равно 11 d_0. Поэтому можно заключить, что трубный пучок помещен в вертикальный контейнер с квадратным поперечным сечением со стороной квадрата, равной 12 d_0. Также будем считать, что внутренний диаметр трубы равен d = 0,02 м, т.е. внутренний радиус равен r = 0,01 м, а внешний радиус трубы равен r_0 = 0,013 м.

В процессе движения теплоносителей газ (воздух) поступает в нижнюю часть аппарата с заданной температурой tg_6 (рисунок 1) и, поднимаясь через насадку, которую формирует непрерывная труба с поворотными коленами, где происходит теплообмен с потоком жидкости в трубах, выходит из аппарата через его верхнюю часть с температурой tg_1 (рисунок 1).

Для анализа теплообмена в аппарате разделим его на 5 зон (секций), в каждой из которых располагается горизонтальная часть трубной насадки с поворотными отводами (рисунок 1). Также будем считать, что поворотное колено, по которому жидкость перетекает из верхней зоны в нижнюю зону, принадлежит зоне, из которого оно выходит, т.е. верхней зоне.

Нумерацию зон выполним, начиная с верхней зоны, которой присвоим номер 1, до нижней зоны с номером 5 (рисунок 1).

В патрубок трубной насадки зоны 1 поступает вода с заданной температурой tl_0. Протекая по трубе из правой секции (рисунок 4), поток воды обменивается теплотой

с газом, поступающим в зону 1 из зоны 2 с температурой tg_2. Жидкость сначала течет в первой зоне в прямолинейном участке трубы, где ее температура изменяется от температуры tl_0 до температуры tl_1. Затем в тороидальном отводе приобретает температуру tl_2. Будем различать теплообмен в прямолинейном и тороидальном участках трубы, поскольку в этих частях будут различные коэффициенты теплоотдачи внутри трубы, а значит и различные коэффициенты теплопередачи.

После теплообмена с потоком воды в зоне 1 газ выходит из верхней части аппарата (рисунок 1) с температурой tg_1 и покидает аппарат.

Аналогичный теплообмен происходит и в зоне 2. Вода из зоны 1 через вертикально расположенный тороидальный отвод поступает в зону 2 с приобретенной в зоне 1 температурой tl_{12} за счет теплообмена с газом в зоне 1. Далее поток воды в трубах насадки в зоне 2 вступает в теплообмен с потоком газа в зоне 2. Газ поступает в зону 2 из зоны 3 с температурой tg_3. В процессе теплообмена с потоком воды в зоне 3 газ приобретает температуру tg_2 и поступает в зону 1 (рисунок 1).

Также рассматривается теплообмен во всех зонах 3–5. В зону 5 жидкость из зоны 4 поступает с температурой tl_{48}, в процессе теплообмена с газом в зоне 5 приобретает температуру tl_{59} и через патрубок покидает аппарат. Заметим, что в зоне 5 отсутствует вертикально расположенный тороидальный соединительный отвод. Газ в зону 5 поступает с заданной температурой tg_6, в процессе теплообмена с потоком жидкости в трубах насадки приобретает температуру tg_5 и поступает в зону 4 (рисунок 1).

Для упрощения постановки задачи анализа теплообмена в рассматриваемом аппарате уменьшим количество неизвестных в уравнениях, описывающих процесс теплообмена в аппарате. Значительное количество переменных возникает из-за различных коэффициентов теплоотдачи в потоке жидкости вследствие наличия изогнутых тороидальных участков труб. Чтобы избежать этого, усредним коэффициенты теплоотдачи внутри трубы по длине всей трубы.

Сначала определим общую длину трубы и длины участков, на которых коэффициенты теплоотдачи различны.

Длина тороидальных участков равна $6\cdot\pi\cdot d_0\cdot 4+5\cdot\pi\cdot d_0=29\cdot\pi\cdot d_0$. В нижней зоне нет тороидального отвода вниз.

Длина прямолинейных участков равна $9\cdot d_0\cdot 6\cdot 5+3\cdot d_0=273\ d_0$. Здесь добавлена длина патрубков входа и выхода.

Следовательно, средний по длине трубы коэффициент теплоотдачи будет равен:

$$\overline{h_l} = \frac{29\pi d_0\cdot h_l\cdot \varepsilon_{изг}+273 d_d\cdot h_l}{29\pi d_0+273 d_d} = 1{,}447 h_l. \quad (1)$$

Что составит значение $\overline{h_l} = 6{,}923\cdot 10^3$, Вт/(м^2·°С), а коэффициент теплопередачи составит значение $\overline{K} = 127{,}265$, Вт/(м^2·°С).

Также отметим, что общая длина входного и выходного патрубков равна $3\cdot d_0$, а эта величина достаточно близка к длине тороидального участка трубы – πd_0. Поэтому для вычисления тепловых балансов в слоях предположим, что в последней, нижней зоне аппарата существует отрезок трубы длиной πd_0, т.е. мы как бы перенесли патрубок входа в нижнюю зону и соединили его с патрубком выхода. Это позволит нам записать подобные тепловые балансные соотношения для каждой зоны.

Поскольку при редуцировании системы уравнений число переменных сократится, из-за уменьшения числа неизвестных температур жидкости нам необходимо сменить нумерацию переменных. Будем считать, что жидкость поступает в аппарат с известной температурой tl_1, приобретает в зоне 1 температуру tl_2 за счет теплообмена с газом в зоне 1, и с этой температурой переходит в зону 2 (рисунок 3). В зоне 2 жидкость приобретает температуру tl_3, и переходит с ней в зону 3, где приобретает температуру tl_4, с которой

переходит в зону 4, где приобретает температуру tl_5, с которой покидает зону 4 и переходит в зону 5, где приобретает температуру tl_6, с которой покидает аппарат.

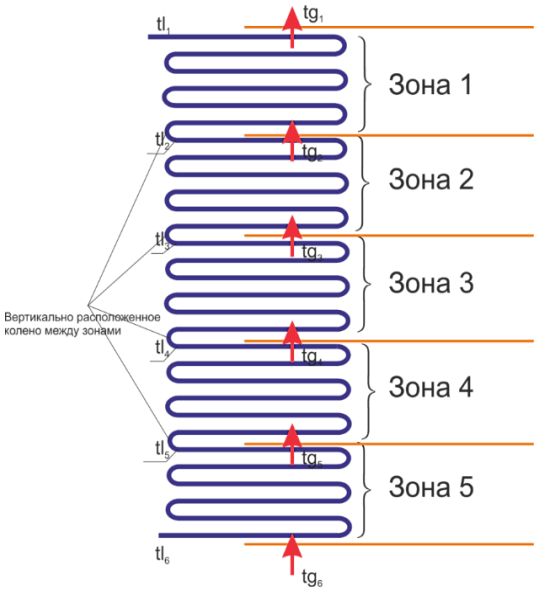


Рисунок 3. Условное расположение зон, на которые условно разделен аппарат: tl – температура жидкости; tg – температура газа

Примечание – составлено автором на основе результатов собственных исследований

Предполагаем, что температура в каждой зоне постоянна и изменяется при переходе из одной зоны в другую зону. Изменение температуры газа определяется в соответствии с тепловым балансом в рассматриваемой зоне.

Величина теплового потока через элемент длины прямолинейного участка трубы dx на внешней ее поверхности в рассматриваемой секции (зоны) определится как:

$$dq = 2\pi r_0 K(tg - tl)dx, \tag{2}$$

где r_0 – внешний радиус трубы, м.

Тепловой поток (3) изменяет внутреннюю энергию потока жидкости на величину:

$$dq_l = CP_l \cdot dtl, \tag{3}$$

где $CP_l = c_{pl} \cdot M_l$ – потоковая теплоемкость жидкого теплоносителя, Вт/°С; c_{pl} – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); M_l – массовый расход жидкости, кг/с.

Элементарные приращения тепловых потоков (2 3) и (3 4) равны между собой, и поэтому можно записать:

$$2\pi r_0 K(tg - tl)dx = CP_l \cdot dtl. \tag{4}$$

Для определения изменения средней температуры жидкости, текущей в насадочной трубе, разделим в выражении (4 5) переменные:

$$\frac{2\pi r_0 K}{CP_l} dx = \frac{dtl}{(tg - tl)}. \tag{5}$$

Выполняя интегрирование уравнения (5) вдоль всей трубы, расположенной в зоне 1 (рисунок 3), получим выражение для определения температуры, которую жидкость приобретает в результате теплообмена с потоком газа на переходе из зоны 1 в зону 2:

$$tl_2 = tg_2 + (tl_1 - tg_2)e^{-\frac{2\pi r_0 \bar{K} L}{CP_l}}. \quad (6)$$

В результате теплообмена мощность тепловой нагрузки на трубу с потоком жидкости в зоне 1 равна:

$$\Delta Q_{l1} = CP_l(tl_2 - tl_1). \quad (7)$$

Подставляя значение tl_2 из выражения (6) в соотношение (7), получим уравнение для определения тепловой нагрузки на всю трубу в зоне 1:

$$\Delta Q_{l1} = CP_l(tg_2 - tg_1)\left(1 - e^{-\frac{2\pi r_0 \bar{K} L}{CP_l}}\right) = CP_l(tg_2 - tg_1)R, \quad (8)$$

где $R = 1 - e^{-\frac{2\pi r_0 \bar{K} L}{CP_l}}$.

Изменение потокового теплосодержания газа в первой зоне равно:

$$\Delta Q_{g1} = CP_g(tg_1 - tg_2), \quad (9)$$

где $CP_g = c_{pg} \cdot M_g$ – потоковая теплоемкость газа, Вт/°С; c_{pg} – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); M_g – массовый расход газа, кг/с.

Тогда изменение потоковой энтальпии газа в зоне 1 будет равно изменению потоковой энтальпии потока жидкости во всей трубе в этой зоне:

$$\Delta Q_{l1} = -\Delta Q_{g1}. \quad (10)$$

Подставляя выражения (8) и (9) в (10), получим для первой зоны:

$$CP_l(tg_2 - tl_1)R = -CP_g(tg_1 - tg_2). \quad (11)$$

Записывая аналогичный тепловой баланс для всех зон, получим 5 уравнений:

$$CP_l(tg_{i+1} - tl_i)R = -CP_g(tg_i - tg_{i+1}), i = 1, \dots, 5. \quad (12)$$

Уравнение (12) можно привести к виду:

$$(CP_l \cdot R - CP_g)tg_{i+1} + CP_g \cdot tg_i - CP_l \cdot R \cdot tl_i = 0, i = 1, \dots, 5. \quad (13)$$

Изменение потоковой теплоемкости потока воды в первой зоне, учитывая (7) и (8), можно записать в виде:

$$CP_l(t_{g2} - t_{l1})R = CP_l(t_{l2} - t_{l1}). \quad (14)$$

Раскрывая скобки в выражении (14) и перенося все члены в левую сторону уравнения, получим для первой зоны:

$$R \cdot t_{g2} - t_{l2} - (R - 1)t_{l1} = 0. \quad (15)$$

Выполняя аналогичные преобразования для всех 5 зон, получим:

$$R \cdot tg_{i+1} - tl_{i+1} - (R - 1)tl_i = 0, i = 1, \dots, 5. \quad (16)$$

Вводя обозначения для коэффициентов в (13) и (16):

$$a = CP_l \cdot R - CP_g, \quad (17)$$

$$b = CP_g, \quad (18)$$

$$c = CP_l \cdot R, \quad (19)$$

$$d = R - 1, \quad (20)$$

и записывая уравнения (13) и (16) для всех 5 зон, получим систему 10 уравнений для 10 неизвестных величин tl_{i+1}, tg_i, $i = 1 \dots 5$.

$$a \cdot tg_{i+1} + b \cdot tg_i - c \cdot tl_i = 0, i = 1 \dots 5, \quad (21)$$

$$R \cdot tg_{i+1} - tl_{i+1} - d \cdot tl_i = 0, i = 1 \dots 5. \quad (22)$$

Значения температур tl_1 и tg_6 заданы, поскольку это температуры воды и газа на входе в аппарат.

Решая систему линейных уравнений (21), (22) относительно 10 неизвестных величин, получим значения для распределения температур газа и жидкости в 5 зонах аппарата:

$$tl_i = A_{2(i-1)} tl_1 - B_{2(i-1)} tg_1, i = 2 \dots 5, \quad (23)$$

$$tg_i = A_{2i-3} tl_1 - B_{2i-3} tg_1, i = 2 \dots 5, \quad (24)$$

$$tg_1 = \frac{bA_7 - cA_8}{bB_7 - cB_8} t_{l1} + \frac{a}{bB_7 - cB_8} t_{g9}, \quad (25)$$

$$tl_6 = Rtg_6 - d(A_8 tl_1 - B_8 tg_1), \quad (26)$$

где $A_1 = \frac{c}{a}$, $B_1 = \frac{b}{a}$, $A_2 = RA_1 - d$, $B_2 = RB_1$,

$$A_{2i+1} = \frac{cA_{2i} - bA_{2i-1}}{a}, i = 1 \dots 3, \quad 27)$$

$$A_{2(i+1)} = RA_{2i+1} - dA_{2i}, i = 1 \dots 3, \quad (28)$$

$$B_{2i+1} = \frac{cB_{2i} - bB_{2i-1}}{a}, i = 1 \dots 3, \quad (29)$$

$$B_{2(i+1)} = RB_{2i+1} - dB_{2i}, i = 1 \dots 3, \quad (30)$$

Выражения (23) – (30) представляют собой алгоритм нахождения температур теплоносителей в рассматриваемом аппарате с регулярной насадкой, и он легко программируется.

Расчет распределения температур в зонах аппарата для начальных температур газа $tg_6 = 5°C$ и $t_{l1} = 95°C$ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Распределение температур теплоносителей по зонам

$tl_i =$	$tg_i =$
95	17.522
93.811	15.096
92.604	12.632
91.377	10.128
90.13	7.584
88.864	5

Примечание – составлено автором на основе результатов собственных исследований

Заметим, что подстановка полученных температур в уравнения (21) и (22) зануляют их. Также выполняются тепловые балансы, как для аппарата в целом:

$$CPw\left(tl_1 - tl_6\right) = 8.061 \times 10^3$$

$$CPa\left(tg_1 - tg_6\right) = 8.061 \times 10^3$$

$$CPw\left(tl_5 - tl_6\right) = 1.664 \times 10^3$$

$$CPw\left(tl_1 - tl_2\right) = 1.562 \times 10^3$$

$$CPw\left(tl_2 - tl_3\right) = 1.586 \times 10^3$$

$$CPa\left(tg_1 - tg_2\right) = 1.562\times 10^3$$

$$CPa\left(tg_2 - tg_3\right) = 1.586\times 10^3$$

$$CPa\left(tg_5 - tg_6\right) = 1.664\times 10^3$$

Температурные профили теплоносителей по высоте аппарата для выбранных начальных температур приведены на рисунке 4. В этом случае поток воды охлаждается встречным потоком воздуха, но в пределах всего аппарата разность температур между теплоносителями остается достаточно большой.

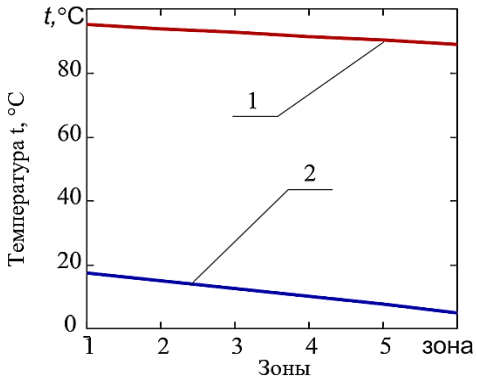


Рисунок 4. Распределение температур теплоносителей по высоте (зонам) аппарата: 1 – изменение температуры потока жидкости; 2 – изменение температуры потока газа
Примечание – составлено автором на основе результатов собственных исследований

Изменение температур теплоносителей вдоль длины трубы показано на рисунке 5.

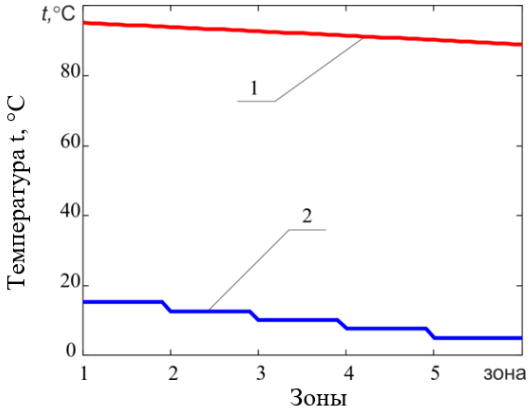


Рисунок 5. Распределение температур теплоносителей по длине трубы: 1 – изменение температуры потока жидкости; 2 – изменение температуры потока газа
Примечание – составлено автором на основе результатов собственных исследований

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения экспериментальных исследований и численных экспериментов процесса теплопередачи, исходя из анализа конструкции аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры с внешним и внутренним расположением коллекторов, создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата.

Предложена простая зонная схема, которая позволяет получить систему линейных уравнений для температур теплоносителей в выбранных зонах аппарата. Решение полученной системы уравнений удовлетворяет тепловым балансам в аппарате.

Распределение температур теплоносителей вдоль аппарата показывает, что лимитирующей стадией процесса теплообмена является теплообмен со стороны газа к поверхности теплообмена. Для исключения этой лимитирующей стадии необходимо, чтобы площадь поверхности теплообмена со стороны газового теплоносителя была больше площади теплообмена со стороны жидкости во столько раз, во сколько раз коэффициент теплопередачи со стороны газового теплоносителя h_gменьше коэффициента теплопередачи жидкого теплоносителя h_l к внутренней поверхности трубы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP26199841 «Разработка цифрового двойника массопереноса в пленочных течениях и создание массообменного оборудования с учетом влияния конструктивных особенностей».

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ОДОБРЕНИИ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫМ ЭТИЧЕСКИМ КОМИТЕТОМ (IRB): Данное исследование носит теоретический и расчетный характер, не включает участие людей или животных, в связи с чем одобрение Институционального этического комитета не требовалось («Не применимо»).

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ИНФОРМИРОВАННОМ СОГЛАСИИ: Исследование не включало участие людей, поэтому получение информированного согласия не требовалось («Не применимо»).

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ: Данные, подтверждающие результаты данного исследования, представлены в статье. Дополнительные расчетные данные и результаты моделирования могут быть предоставлены соответствующим автором по обоснованному запросу. Новые экспериментальные данные в рамках данной работы не создавались.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы научной статьи заявляют, что не использовали технологии искусственного интеллекта при написании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Couper, J.R., Penney, W.R., Fair, J.R., & Walas, S.M. (2010). Chemical process equipment: Selection and design (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2011-0-08248-0

Hall, S.M. (2018). Rules of thumb for chemical engineers (6th ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2016-0-00182-1

Towler, G., & Sinnott, R. (2021). Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2019-0-02025-0

Айнштейн, В.Г., Захаров, М.К., Носов, Г.А., и др. (2003). Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн. Кн. 2. Логос; Высшая школа // Aynshteyn, V.G., Zakharov, M.K., Nosov, G.A., et al. (2003). Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: Uchebnik: V 2 kn. Kn. 2 [General course of processes and apparatuses of chemical technology: Textbook: In 2 books. Book 2]. Logos; Vysshaya shkola. (In Russ.)

Балабеков, О. С. (1984). Расчет и конструирование аппаратов с подвижной насадкой. Алма-Ата. // Balabekov, O. S. (1984). Raschet i konstruirovanie apparatov s podvizhnoy nasadkoy [Calculation and design of apparatuses with moving packing]. Alma-Ata. (In Russ.)

Балабеков, О. С., & Волненко, А. А. (2015). Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой. Шымкент. // Balabekov, O. S., & Volnenko, A. A. (2015). Raschet i konstruirovanie teplomassoobmennykh i pyleulavlivayushchikh apparatov s podvizhnoy i regulyarnoy nasadkoy [Calculation and design of heat and mass transfer and dust-collecting apparatuses with moving and regular packing]. Shymkent. (In Russ.)

Бишимбаев, В.К., Волненко, А.А., Ескендиров, М.З., Протопопов, А.В., Жантасов, К.Т., & Анарбаев, А. А. (2017). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Патент Республики Казахстан на полезную модель № 2092) // Bishimbayev, V.K., Volnenko, A.A., Eskendirov, M.Z., Protopopov, A.V., Zhantasov, K.T., & Anarbayev, A.A. (2017). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Utility Model Patent No. 2092). (In Russ.)

Волненко, А.А., Абжапбаров, А.А., Камалбек, Д.К., Корганбаев, Б.Н., Жумадуллаев, Д.К., & Бажибаев, Т.Р. (2023). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Патент Республики Казахстан на изобретение № 36157) // Volnenko, A.A., Abzhapbarov, A.A., Kamalbek, D.K., Korganbayev, B.N., Zhumadullayev, D.K., & Bazhibayev, T.R. (2023). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Invention Patent No. 36157). (In Russ.)

Волненко, А.А., Абжапбаров, А.А., Корганбаев, Б.Н., Хусанов, Ж.Е., Жумадуллаев, Д.К., Камалбек, Д.К., & Бажибаев, Т.Р. (2022). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Патент Республики Казахстан на изобретение № 35809) // Volnenko, A.A., Abzhapbarov, A.A., Korganbayev, B.N., Khusanov, Zh.E., Zhumadullayev, D.K., Kamalbek, D.K., & Bazhibayev, T.R. (2022). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Invention Patent No. 35809). (In Russ.)

Волненко, А.А., Балабеков, О.С., Корганбаев, Б.Н., Ескендиров, М.З., Жумадуллаев, Д.К., Ешжанов, А.А., Байгутов, Н.Т., & Абжапбаров, А.А. (2020). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Патент Республики Казахстан на изобретение № 34418) // Volnenko, A.A., Balabekov, O. S., Korganbayev, B.N., Eskendirov, M.Z., Zhumadullayev, D.K., Yeshzhanov, A.A., Baygutov, N.T., & Abzhapbarov, A.A. (2020). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Invention Patent No. 34418). (In Russ.)

Волненко, А.А., Балабеков, О.С., Корганбаев, Б.Н., Хусанов, Ж.Е., & Бекибаев, Н.С. (2013). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Инновационный патент Республики Казахстан № 27719). // Volnenko, A.A., Balabekov, O.S., Korganbayev, B.N., Khusanov, Zh.E., & Bekibayev, N.S. (2013). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Innovative Patent No. 27719). (In Russ.)

Волненко, А.А., Балабеков, О.С., Сарсенбекулы, Д., Жумадуллаев, Д.К., & Корганбаев, Б.Н. (2015). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Инновационный патент Республики Казахстан № 30217) // Volnenko, A.A., Balabekov, O.S., Sarsenbekuly, D., Zhumadullayev, D.K., & Korganbayev, B.N. (2015). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Innovative Patent No. 30217). (In Russ.)

Волненко, А.А., Голубев, В.Г., Балабеков, О.С., Бажиров, Т.С., Хусанов, Ж.Е., & Жумадуллаев, Д.К. (2014). Теплообменная труба (Инновационный патент Республики Казахстан № 28151) // Volnenko, A.A., Golubev, V.G., Balabekov, O.S., Bazhirov, T.S., Khusanov, Zh.E., & Zhumadullayev, D.K. (2014). Teploobmennaya truba [Heat exchange tube] (Republic of Kazakhstan Innovative Patent No. 28151). (In Russ.)

Волненко, А.А., Ешжанов, А.А., Абжапбаров, А.А., Ескендиров, М.З., & Жумадуллаев, Д.К. (2019). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Патент Республики Казахстан на полезную модель № 3656). // Volnenko, A.A., Yeshzhanov, A.A., Abzhapbarov, A.A., Eskendirov, M.Z., & Zhumadullayev, D.K. (2019). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Utility Model Patent No. 3656). (In Russ.)

Волненко, А.А., Жумадуллаев, Д.К., Корганбаев, Б.Н., Сарсенбекулы, Д., Ешжанов, А.А., & Абжапбаров, А.А. (2023). Тепломассообменные и пылеулавливающие аппараты с регулярной структурой трубчатой насадки. Южно-Казахстанский университет им. М.О. Ауэзова // Volnenko, A.A., Zhumadullayev, D.K., Korganbayev, B.N., Sarsenbekuly, D., Yeshzhanov, A.A., & Abzhapbarov, A.A. (2023). Teplomassoobmennye i pyleulavlivayushchie apparaty s regulyarnoy strukturoy trubchatoy nasadki [Heat and mass transfer and dust-collecting apparatuses with a regular structure of tubular packing]. South Kazakhstan University named after M. O. Auezov. (In Russ.)

Волненко, А.А., Корганбаев, Б.Н., Исаева, А.Н., Джакипбекова, Н.О., Жумадуллаев, Д.К., Абжапбаров, А.А., & Камалбек, Д.К. (2021). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Патент Республики Казахстан на полезную модель № 5919). // Volnenko, A.A., Korganbayev, B.N., Isayeva, A.N., Dzhakipbekova, N.O., Zhumadullayev, D.K., Abzhapbarov, A.A., & Kamalbek, D.K. (2021). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Utility Model Patent No. 5919). (In Russ.)

Волненко, А.А., Шамбилова, А.С., Исмаилов, Б.Р., Абжапбаров, А.А., Корганбаев, Б.Н., & Нурымбетов, Р.А. (2024). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания (Патент Республики Казахстан на изобретение № 36995). // Volnenko, A.A., Shambilova, A.S., Ismailov, B.R., Abzhapbarov, A.A., Korganbayev, B.N., & Nurymbetov, R.A. (2024). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Packed apparatus for heat and mass transfer and dust collection] (Republic of Kazakhstan Invention Patent No. 36995). (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Камалбек Дінмұхаммед Куанышбекұлы – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан
Камалбек Динмухаммед Куанышбекулы – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан
Kamalbek Dinmuhammed Kuanyshbekuly – Doctoral student, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: kamalbekovd@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7925-9102,

Ульев Леонид Михайлович – техникалық ғылымдар докторы, профессор, Томск политехникалық университеті, Томск қ., Ресей
Ульев Леонид Михайлович – доктор технических наук, профессор, Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
Ulyev Leonid Mihajlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia,
e-mail: nii_mm@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2732-6444,

Волненко Александр Анатольевич – техникалық ғылымдар докторы, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан
Волненко Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан
Volnenko Alexandr Anatolevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: nii_mm@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6800-9675,

Жумадуллаев Даулет Кошкарович – PhD, доцент, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан
Жумадуллаев Даулет Кошкарович – PhD, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан
Zhumadullayev Daulet Koshkarovich – PhD, Associate Professor, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: daulet_ospl@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6552-2817,

Абжапбаров Абай Акилбекович – PhD, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан
Абжапбаров Абай Акилбекович – PhD, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан
Abzhapbarov Abay Akilbekovich – PhD, Associate Professor, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: abaimilan@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5972-1644,

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_7
ХҒТАР 44.31.29

ПЛАЗМАЛЫҚ ОТЫНДЫ АКТИВТЕНДІРУ ЖАҒДАЙЫНДА ҚАРАЖЫРА КЕН ОРЫН КӨМІРІНІҢ ТҰТАНУЫ МЕН КЕЙІНГІ ЖАНУЫНЫҢ ТЕРМОХИМИЯЛЫҚ ҮДЕРІСІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ УГЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРАЖЫРА В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННОЙ АКТИВАЦИИ ТОПЛИВА

EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMOCHEMICAL PROCESS OF IGNITION AND SUBSEQUENT COMBUSTION OF COAL FROM THE KARAZHYRA DEPOSIT UNDER CONDITIONS OF PLASMA FUEL ACTIVATION

М.С. Канапинов [1]*, Е.Б. Бутаков [2], Г.С. Дуйсембаева [1], Л.Н. Измайлов [1], А.С. Қизатов [1], Е.Д. Даулетханов [1]
[1]КЕАҚ «Дәулет Серікбаев атындағы ШҚТУ», Өскемен қ., Қазақстан
[2]РҒА СБ В.Е. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, Новосібір қ., Ресей
*Жауапты автор: Канапинов Медет Серикович, e-mail: mega_bum_90@mail.ru

Түйінді сөздер:
Плазмалық тұтандыру жүйесі, жағу, жану, плазматрон, тұтандыру, зерттеу, тас көмір.

ТҮЙІНДЕМЕ
Ғылыми-зерттеу мақаласында бу қазандықтарында тұтатудың дәстүрлі мазуттық әдісін көмір тозаңынан плазмалық активтеу арқылы тұтандырумен алмастыруға негізделген баламалы технологияның болашағы зор нұсқасын эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Эксперименттер В.Е. Кутателадзе атындағы СО РҒА Жылуфизика институтында «Қаражыра» кен орнынан алынған тас көмірді жағуға арналған зертханалық қондырғыда іске асырылады. Қондырғыны суық күйден тұтандыру бойынша жүргізілген тәжірибелер сериясы көрсеткендей, плазмалық тұтандыру жүйесін (ПСВ) R-90 мкм дисперстілік сипаттамасына ие көмір шаңын ауа ағысымен бірге 6-18 м/с жылдамдықта беру арқылы қолдану шамамен 1000 °С температурасы бар факелдің өзекті қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бұл кезде ауаның артықтық коэффициенті 0,7 – 0,5 аралығында болып, ал тұтандыру уақыты шамамен 200 с құрайды. Сонымен бірге, көмір тозаңының шығынын арттыру тұтандыру камерасындағы температураның жоғарылауына алып келетіндігі, соның нәтижесінде жану процессін қарқындатуға және оттық кеңістігінің жедел қызуына ықпал етеді.

© 2026 **М.С. Канапинов, Е.Б. Бутаков, Г.С. Дуйсембаева, Л.Н. Измайлов, А.С. Қизатов, Е.Д. Даулетханов**
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы (CC BY 4.0) бойынша таратылады.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Ключевые слова:
Плазменная система воспламенения, сжигание, горение, плазматрон, розжиг, исследование, каменный уголь

АННОТАЦИЯ
В научной исследовательской статье представлены результаты экспериментального исследования одного из перспективных вариантов альтернативной технологии розжига паровых котлов, основанной на замене традиционного мазутного рожига плазменой активацией воспламенения угольной пыли. Эксперименты выполнены в Институте теплофизики им. В.Е. Кутателадзе СО РАН на лабороторной установки при сжигании каменного угла месторождения «Каражыра». Серия опытов по розжигу из холодного состояния показала, что применение плазменной системы воспламенения (ПСВ) при подаче угольной пыли с размером R-90 мкм совместно с воздухом со скоростями 6 –18 м/с обеспечивает формирование факельного ядра с температурой порядка 1000 °С при коэффиценте избытка воздуха 0,7 – 0,5 и времени розжига около 200 с. Дополнительно установлено, что увеличение расхода угольной пыли приводит к росту температуры в камере дожигания, способствуя интенсификации процесса горения и ускоренному прогреву топочного объема.

keywords:
Plasma ignition system, combustion, burning, palsmatron, ignition, research, coal.

ABSTRACT
The results of an experimental study of one of the promising options for alternative steam boiler ignition technology, based on replacing traditional fuel oil ignition with plasma activation of coal dust ignition, are presented. The experiments were carried out at the V.E. Kuateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, on a laboratory setup using coal from the Karazhyra deposit. A series of experiments on cold ignition showed that the use of a plasma ignition system (PSI) when supplying coal dust with R-90 mkm characteristics together with air at speeds of 6-18 m/s ensures the formation of a torch core use a temperature of about 1000°C at on air excess coefficient of 0.7 – 0.5 and an ignition time of about 200 s. In addition, it has been established that an increase in coal dust consumption leads to an increase in temperature in the afterburner chamber, contributing to the intensification of the combustion process and accelerated heating of the furnace volume.

КІРІСПЕ

Әлем бойынша электр энергиясын өндіру балансында баламалы энергетика үлесінің артуына қарамастан, жылу электр станциялары (ЖЭС) әлі де өндірістің негізгі бөлігін қамтамасыз етеді (P. Fragkos, et al, 2023). Бұл, ең алдымен, қатты отынның,негізінен көмірдің, сондай-ақ оның басқа энергетикалық ресурстарға қатысты салыстырмалы түрде төмен құнының айтарлықтай барланған қорларымен түсіндіріледі (T. Nakamura et al, 2024).

Алайда көмірді негізгі энергетикалық ресурс ретінде пайдалану бірқатар жағымсыз факторларға әкеледі (B.Gajdzil et al, 2024). Экологиялық тұрғыдан алғанда көмірді өндіру ластаушы заттар мен парниктік газдардың айтарлықтай шығарындыларына әкеледі (Coal Standards and Gas Standards, 2024). Технологиялық тұрғыдан қарастыратын болсақ көмір қазандықтарын пайдалану олардың суық күйден іске қосылуы кезінде алаудың тұрақты тұтануын бастау және қазандық агрегатының элементтерін біркелкі жылытуды қамтамасыз ету үшін мазутты қолдану талап етілетіндігімен сипатталады (IEA. Available, 2022).

Тұтынылатын мазут мөлшері қазандықтың құрылымдық ерекшеліктерімен, оның бу өнімділігімен және іске қосу кезеңінің ұзақтығымен анықталады (L.Sladewski et al, 2017).

Айта кету керек мазут мұнай өңдеудің жанама өнімі болғанына қарамастан, оның құны жыл сайын артып келеді. Осыған байланысты көптеген елдерде қазандықтарды іске қосу кезінде сұйық отынның үлесін төмендетуге және нәтижесінде жылу энергиясының өзіндік құнын төмендетуге бағытталған зерттеулер жүргізілуде, бұл жылу генерациясының жалпы рентабельділігін арттырады (M.Pawlak, 2016).

Қазіргі ғылыми-технологиялық әдебиеттерді талдау қорытындылары көрсеткендей, қатты отынды жағу кезінде қазандық агрегаттарының тиімділігін арттыру мақсатында пайдалы әсер коэффициентін ұлғайту әдістері қарқынды зерттелуде (Enerdata 2023). Яғни, соның ішінде қосымша жылу көздерін қолдану және тұтыну жануды қарқынды жүргізу технологиялары қарастырылуда (B.Loewen, 2022).

Келешегі зор бағыттардың бірі қосымша сұйық отынға қажеттілікті азайтуға іске қосу шығындарын азайтуға және қазандық агрегаттарының экологиялық және энергетикалық көрсеткіштерін арттыруға мүмкіндік беретін отынның плазмалық активациясын қолдану болып табылады.

Қазіргі уақытта көптеген қазандық қондырғыларында қазандықты тұтату және тұрақты жұмыс режиміне жеткізу үшін сұйық отын-мазутты қолдануда. Бұл мазуттың жоғары калориялы сипаттамаларына және тұтану сенімділігіне байланысты. Алайда, мазутты қолдану бірқатар маңызды шектеулермен бірге жүреді. Оның тиімді жануын қамтамасыз ету үшін алдын ала кем дегенде 80-100 °C қыздыру қажет, бұл отынның тұтқырлығын төмендетеді және оны оттегімен жақсы араласуына ықпал етеді (V.Messerle et al, 2022). Қыздыру температурасын жоғарылату жанудың тұрақтылығын арттырады, жылу шығынын азайтады, жанбаған бөлшектер мөлшері төмендейді және қазандық агрегатының пайдалы әсер коэффициентінің өсуіне ықпал етеді (P.Kanilo et al, 2003). Алайда, бұл технологияның құны қымбат болып қала береді, өйткені мазуттың бағасы жыл сайын артып келеді, ал отын дайындаудың өзі көп уақытты қажет ететін процесс. Қосымша туындайтын мәселе-мазуттағы күкірттің едәуір мөлшері (M Gorokhovski et al, 2005). Оны жағу кезінде күкірт оксидтері түзіледі, олар жоғары температураны коррозияны күшейтеді, металл конструкцияларының ресурсын азайтады және жабдықты жөндеу және техникалық қызмет көрсету шығындарын арттырады. Қазіргі заманғы ғылыми-зерттеу орталықтары, инженерлік ұжымдар мен энергетикалық компаниялар мазутты тұтатуға арналған ескірген жүйелерден бас тартуға мүмкіндік беретін технологияларды әзірлеумен белсенді айналысады (IEA. Available, 2023). Бұл тек экологиялық талаптарға ғана емес, сонымен қатар тапшы және қымбат сұйық отынды пайдалануды азайтудың жаһандық тенденциясына байланысты. Сонымен қатар, мұнай өндірудің тұрақты төмендеуі байқалады, бұл мазут өндірісін экономикалық жағынан тиімді етпейді (D.Glushkov et al, 2018).

Осылайша, қазандық қондырғыларын іске қосудың заманауи, үнемді және ұзақ мерзімді технологиялары қажет. Тозаңкөмірлі қазандықтарды тұтатудың келешегі бар технологияларының бірі плазмалық отын жүйелерін (ПОЖ) қолдану болып табылады (D.Glushkov et al, 2021). Жұмыс принципі тұрақты токты плазматрон арқылы генерацияланатын жоғары температуралы плазмалық доғамен тозаң-көмір отынын қыздыруға негізделген. (F.Zhao et al, 2016.). Технологияның өзі АҚШ, Канада, Германия және Қытайдың тозаңкөмір электр станцияларында кеңінен қолданылуда. (S.Bolegenova et al, 2023). Алайда, тұрақты ток плазматрондарын пайдаланудың бірқатар кемшіліктері бар: электродтардың салыстырмалы түрде аз ресурсы (шамамен 500 сағат), күрделі салқындату жүйелерінің қажеттілігі, плазма түзетін газды беру қажеттілігі, тұрақты ток көздерінің жоғары құны мен өлшемдері.

Мұның баламалы шешімі – айнымалы ток плазматронын қолдануға негізделген плазмалық аса тұтандыру жүйесі (ПАТ) болып табылады. (T.Maczka et al, 2020). Бұл

жүйеде көмірдің тозаң – ауа қоспасы электрод блогы арқылы өтеді бұл отынның жоғары температуралы плазмалық доғамен өзара әрекеттесу уақытын арттырады (R.Youssefi et al, 2021). Айналмалы ток плазмотроны қарапайым дизайнымен, сұйықтықты салқындату қажеттілігінің жоқтығымен, электр қуатын аз тұтынумен (2-10 кВт) және бірнеше жылға жететін айтарлықтай үлкен үздіксіз жұмыс ресурсымен ерекшеленеді. Плазмалық тұтандыру жүйесін қолдану мазутты мазутты пайдалану мөлшерін едәуір азайтуға немесе толығымен жоюға, пайдалану шығындарын азайтуға және қазандық жабдықтарының экологиялық көрсеткіштерін арттыруға мүмкіндік береді.

Жұмыстың мақсаты – отынды тұтандырудың келешегі бар технологиясын іске асыру үшін айнымалы токтағы жоғары вольтті плазматронды қолдану мүмкіндіктері мен оның параметрін зерттеу болып табылады.

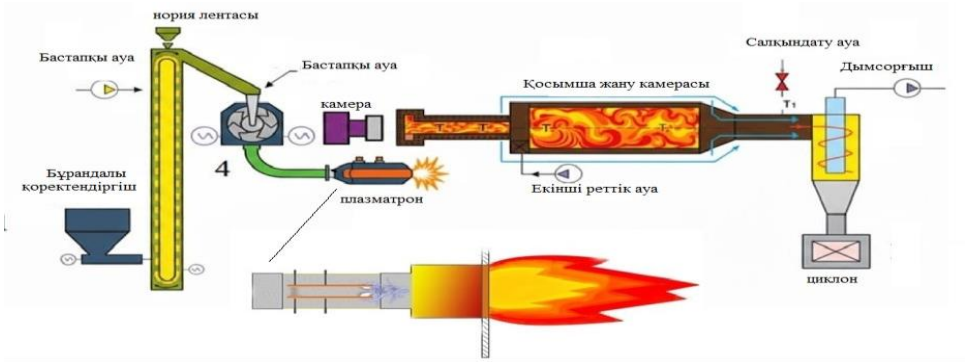
ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Көмір шаңының тұтану процестеріне эксперименттік зерттеулер С.С. Кутателадзе мамандарының тікелей қатысуымен жүргізілді. 1-суретте қондырғының технологиялық жолының схемалық диаграммасы көрсетілген. Шикі көмір бункерінен шнекті қоректендіргіш арқылы үздіксіз әрекет ететін нория типті көтергіш-тасымалдау құрылғысына беріледі. Отын қоспасын ұсақ ұнтақтау үшін, қыздырғыш калориферде алдын ала қыздырылған бастапқы ауамен бірге балғалы диірменге жіберіледі (ұнтақталған отын бөлшегінің орташа мөлшері R-90 мкм). Алынған шаң-көмір қоспасы плазматронға беріледі, онда оның тұтануы жүреді. Тұтануды бастау ауаны тотықтырғышты және плазмалық разрядты құрайтын электр тұрақты тогын беру арқылы қамтамасыз етіледі.

Оттық құйынды тангенциалды отын беру режимінде де, тікелей ағын режимінде де жұмыс істей алады. Пештің негізгі элементтері (1-сурет) мыналар: отын беру жүйесі; от жағу өсінде орналасқан ПАТ үшін тікелей ағымды оттық; өлшеу датчиктері мен бақылау терезелері бар жану камерасы; қайталама ауаны тангенциалды жеткізетін жану камерасы болып табылады. Шаң-көмір қоспасының толық жанып кетуін қамтамасыз ету үшін жану камерасына тотығудың химиялық реакцияларының барысын күшейтетін қосымша істық ауа беріледі. Шаң-көмір қоспасы электр доғасының түйініне түседі, онда оның тұтануы плазмалық доғалардың өтуімен басталады. Одан әрі жанғыш қоспаның ағыны тік ағын режимінде жану камерасына түседі және тангенциалды айналдыру аппаратынан берілетін екінші реттік ауа (Рв2) арқылы араласады. Белсенді жану аймағынан өткеннен кейін жанбаған отын қалдықтары қайта жану камерасына түседі, онда олар тангенциалды түрде берілетін үшінші реттік ауамен әрекеттеседі. Барлық тәжірибелерде берілген ауа температурасы 22 °С болды. Аталған жұмыстың аясында тәжірибелік отындық камерасында көмір шаңының тік ағынды жану жағдайында ПАТ-ны тәжірибелік-өндірістік сынақтардан өткізілді. Жану процесі аяқталғаннан кейін, қондырғыны салқындату үшін ауа беріледі. Әрі қарай, шығатын газдар Вентури скруберіне жіберіледі, онда орталықтан тепкіш күштердің әсерінен күлдің ірі бөлшектері қабырғаларға түсіп, циклонға жіберіледі. Тазартылған газдар түтін сорғыш арқылы атмосфераға шығарылады.

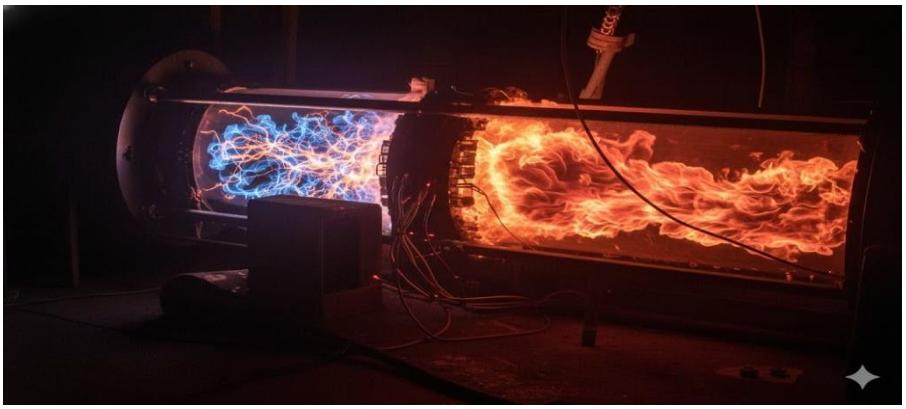
Көмір шаңын тұтандырудың плазмалық технологиясының схемалық көрінісі 1-суретте келтірілген. Плазмалық аса тұтану (ПАТ) технологиясы дәстүрлі резервтік сұйық отындарды, атап айтқанда мазутты қолдануға негізделген қазандық агрегаттарын жағудың және алауды тұрақтандырудың әдістерін ауыстыруды қамтамасыз етеді. Бастапқы ауамен алдын ала араластырылған көмір шаңы жоғары температуралы плазмалық доғалар түзілетін плазмотронның электр доғалық модуліне беріледі. Бұл доғалар шаң-көмір отыны бөлшектерінің тұтану процестерінің жылдам іске қосылуын қамтамасыз ететін жылу энергиясының шоғырланған көзі ретінде қызмет етеді. Алынған

жоғары реактивті шаң-көмір қоспасы жану камерасына түседі, онда ол екінші реттік ауа ағынымен қарқынды әрекеттерседі. Нәтижесінде алаудың тұрақты түрде лаулауына және қазандықта көмір отынын одан әрі тиімді жану процесі жүреді.



1-сурет. Эксперименттік стенд плазмалық аса тұтану (ПАТ) технологиясы
Ескерту - авторлармен WinCC бағдарламасының көмегімен құрастырылған

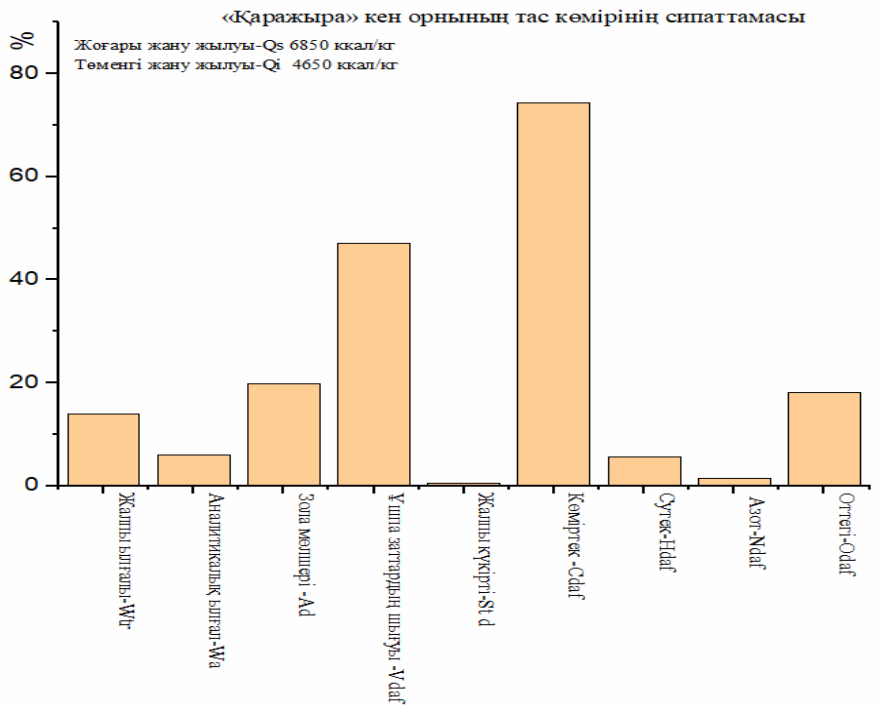
ПАТ жүйесінің негізгі функционалды элементі плазмалық разрядтардың қалыптасуы мен сақталуын қамтамасыз ететін электр доғалық блок болып табылады. Құрылымдық жағынан, электр доғалық қондырғыға сегіз өткізгіш изоляторға мықтап бекітілген екі жұп цилиндірлік мыс электродтары кіреді (2-суретті қараңыз). Электродтарды қоректендіру арнайы жиілік түрлендіргіштері арқылы жүзеге асырылады. Олар берілген пішіндегі шығыс кернеуін қамтамасыз ететін жоғары жиілікті транзисторлық инвесторды, сондай-ақ бірегей конструкциядағы жоғары жиілікті жоғары вольтты трансформаторды қамтиды. Мұндай қуат көзі архитектурасы жоғары жылулық және электрлік жүктемелер жағдайында электродтық жүйелердің тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді. Жұмыс істеу процесінде электрод аралық кеңістіктерде екі тәуелсіз электр доғалары пайда болады (2-сурет), олар плазмалық ағынды генерациялау үшін жоғары концентрацияланған энергия көзі ретінде қызмет етеді. Доға аймағындағы плазманың температурасы бірнеше мың градусқа жетуі мүмкін, бұл жылу ыдырауының лезде басталуына және көмір шаңының тұтануына жағдай жасайды.



2-сурет. Электр доғалық бөлігіндегі көмір шаңының тұтануы
Ескерту - авторлармен эксперимент кезінде жасалған

Эксперимент барысында көмір шаңының жану процесіне визуалды мониторинг жүргізіліп, сондай-ақ тәжірибелік стендтің ұзындығы бойындағы температуралық өріс

мөлшері орындалды. Отын ретінде Қаражыра кен орнының Д маркалы тас көмірі пайдаланылды, оның негізгі физикалық-химиялық сипаттамалары төменде келтірілген. Көмір R90=40% електен қалған балғалы диірменнен кейін алынды.



3-сурет. Қаражыра көмірдің құрамы

Ескерту - авторлармен Origin бағдарламада құрастырылған

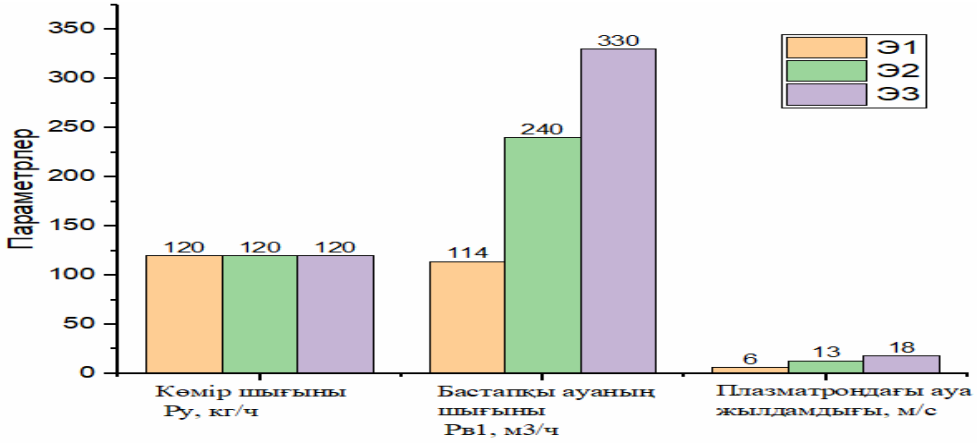
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Бастапқыда ПАТ жүйесін қосу және бастапқы ауаны беру жүзеге асырылды, ал плазмотронның жұмысына жұмсалатын қуат 5кВт тең. ПАТ іске қосылуы жану камерасына түсетін ауа температурасының орташа мөлшерде көтерілуіне әкеледі, бұл шаң-көмір қоспасын алдын ала қыздыруды қамтамасыз етті және оның тұтануын жеңілдетті. ПАТ технологиясының сипаттамалық жұмыс режимдерін анықтау үшін эксперименттер екі кезең бойынша жүргізілді.

Эксперименттердің бірінші сериясының мақсаты (Э1, Э2, Э3) (4-сурет) Көмір шаңының тұтану параметірлері бастапқы ауа шығынына және қоспаны электродоғалық блокқа беру жылдамдығына байланысты анықталды. Бастапқы ауа шығыны көмір шаңын плазматронға жеткізуге жеткілікті ең төменгі мәннен бастап, камерадағы факелдің үзілуі мен жану процесінің тұрақсыздану байқалатын ең жоғары мәнге дейін өзгертіліп отырды.

Бірінші экспериментте электр доғасының төменгі аймағында көмір шаңының ішінара бөлінуі байқалды. Осыған қарамастан, көмір шаңының тұтануы тұтану тұрақты болып, жалынның салыстырмалы түрде төмен жарықтығымен сипатталады. Жану камерасының қабырғаларын 900 °C температураға дейін қыздыру үшін 500 секунд қажет болды. Жану камерасының бақылау терезесі арқылы жанбай қалған көмір бөлшектері тіркелді, бұл бастапқы ауа ағыны төмен болған кездегі отынның толық жанбауын көрсетеді.

Екінші экспериментте ауа ағыны 240 м^3/сағ дейін ұлғайтылды. Осы жағдайларда көмір бүкіл эксперимент бойы электрдоғалық блокта тұрақта түрде тұтанып, жану камерасында орнықты алау түзілді. Камераның 900 °C температураға шығу уақыты 200 секундты құрады, бұл жылу режимінің қарқындылығының жоғарылауын көрсетеді.

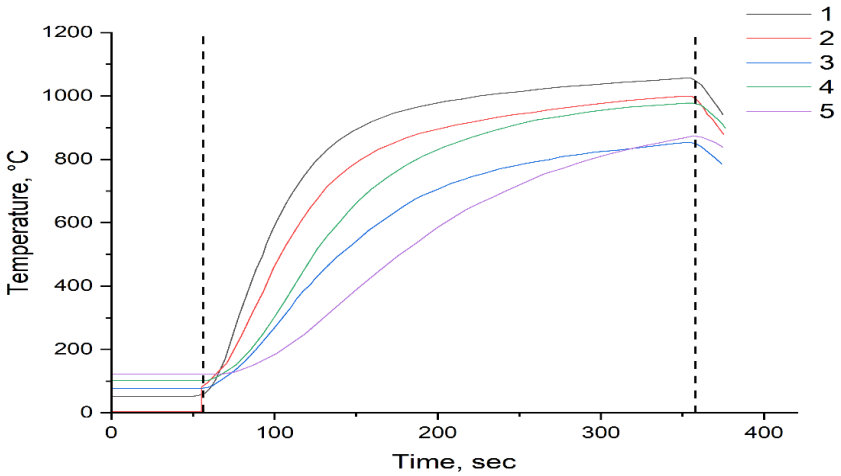


4-сурет. Эксперименттің бірінші кезеңінен алынған мәліметтер
Ескерту - авторлармен Origin бағдарламада құрастырылған

Үшінші экспериментте, көмір шаңын электродоғалық блокқа жеткізу жылдамдығы 18 м/с болғанда, тұтану тек жартылай ғана жүзеге асады. Ал көмір шаңының негізгі массасы жану камерасына толық жанбай камераға түсіп, жоғары жылдамдықта отын жеткізілген кезде плазмалық разрядтың жануды толық бастауға жеткілікті энергиясы жоқ екенін көрсетеді.

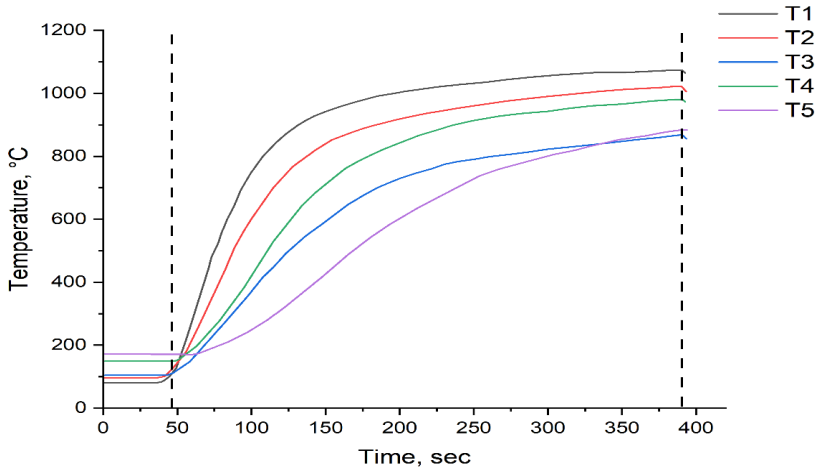
Эксперименттердің екінші сериясында отын беру режимдерін өзгерту кезінде ауа ағыны тұрақты болып, көмір шаңының массасы өзгеріп отырады (5-сурет). Бұл жағдайда α жану камерасындағы артық ауа коэффициенті 0,7-ден 0,5-ке дейін төмендеді, бұл отын жүктемесінің алаудың тұрақтылығына және жанудың толықтығына әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

5-7-суреттерінде 1-3 режимдердегі жартылай өнеркәсіптік эксперименттік стендтегі температураның уақытша тәуелділігі көрсетілген (5-сурет). Плазмотрон арқылы генерацияланған жоғары температуралы плазмалық доғалар арқылы тас көмір ұнтақ қоспасының өтуі отынды тұтатуды және жану камерасында тұрақты жануды қамтамасыз етті.



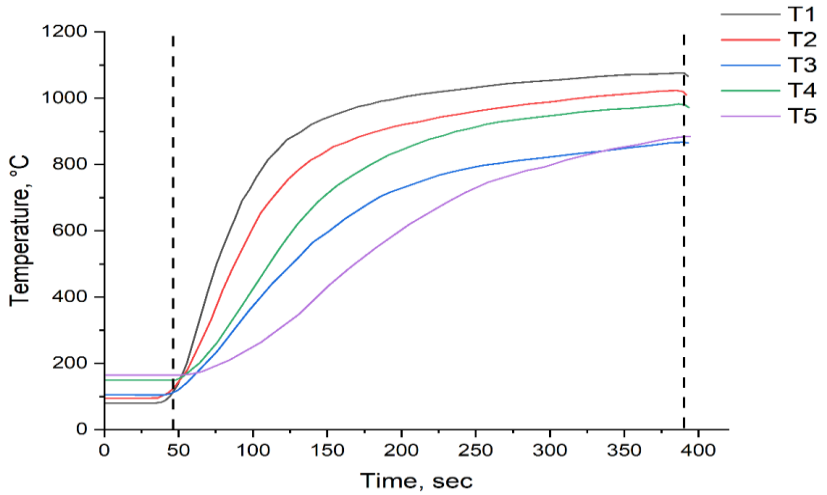
5-сурет. ПАТ қолданғандағы салқын күйден жағу режимінде жану камерасы бойымен температураның таралуы, мұндағы көмір шығыны 103 кг/сағ.
Ескерту - эксперименттік деректерді өңдеу SigmaFlame бағдарламасының көмегімен және авторлармен құрастырылған

Әр эксперименттің ұзақтығы шамамен 5 минутты құрады, бұл от жағу кеңістігін 1000 °C температураға дейін қыздыру үшін жеткілікті болады, сонымен қатар ауа ағынының жоғарылауы және шаң-көмір қоспасының берілу жылдамдығын оңтайландыру плазмалық алаудың тұрақтылығын едәуір арттырады және жану камерасында жұмыс температурасына жетуін тездетеді, сонымен бірге жанбаған көмір бөлшектерінің санын азайтады.



6-сурет. ПАТ 122 кг/сағ режимін қолдана отырып, салқын күйден жану режимінде эксперименттік стендтің ұзындығы бойынша температураның таралуы

Ескерту - эксперименттік деректерді өңдеу SigmaFlame бағдарламасының көмегімен және авторлармен құрастырылған



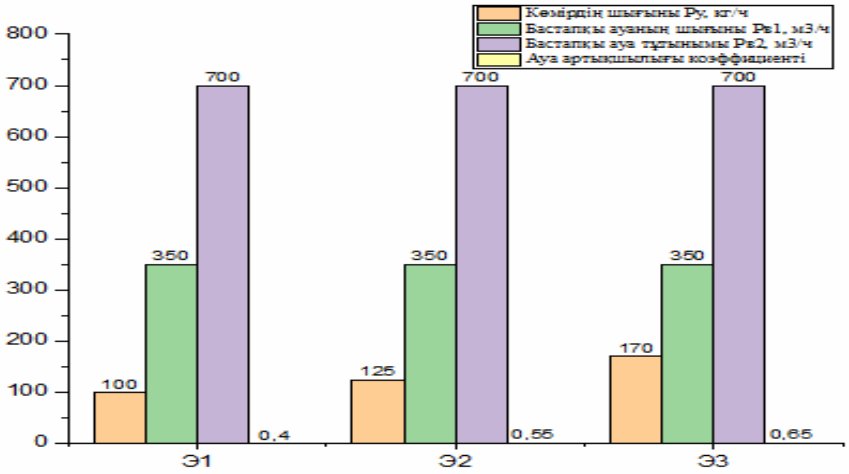
7-сурет. ПАТ қолдана отырып, салқын күйден жағу режимінде жану камерасы бойымен температураның таралуы, көмір шығыны 168 кг/сағ

Ескерту - эксперименттік деректерді өңдеу SigmaFlame бағдарламасының көмегімен және авторлармен құрастырылған

Негізгі жану аймағы жану камерасының бастапқы бөлігінде шоғырланған және мұнда 1 термопара орнатылған (5-7 суреттер). Көмір шаңын ұнтағы беріле басталғаннан кейін температураның тез өсуі байқалады, бұл плазмалық разряд аймағында тұтанудың жоғары тиімді басталуын көрсетеді.

Барлық зерттеулер режимдерінде көмір шаңының тұрақты жануы және кейіннен жануы тіркелген. 1-режиімінде жану камерасындағы температураның жоғарылау жылдамдығы 2 және 3 режимдерімен салыстырғанда төмен, бұл отын жүктемесі мен бастапқы ауа ағынының төмендеуіне байланысты. 2 және 3 режимдері ұқсас сипаттамаларды көрсетеді: жану камерасының қыздыру жылдамдығы және эксперименттік стендтің ұзындығы бойынша температура профилі бірдей.

Көмір ұнтағының шығынын арттыру жану камерасындағы температураның көтерілуіне әкеледі, бұл жанудың қарқындырақ болуын және отын камерасының тезірек қызуын қамтамасыз етеді. Сондай-ақ, жоғары жүктемелер кезінде жану камерасының ұзындығы бойынша температура өрісін теңестіру үрдісі байқалады, бұл жылу алмасудың жақсарғанын және отынның біркелкі жануын көрсетеді.



8-сурет. Эксперименттердің екінші сериясынан алынған мәліметтер
Ескерту - авторлармен Origin бағдарламада құрастырылған

Жүргізілген тәжірибелердің нәтижесі бойынша плазмалық қарқынды жану ПАТ технологиясының 5 кВт плазмотрон қуатында көмір ұнтағын тұтату және тұрақты жануды қамтамасыз ету үшін тиімді екенін растайды. Алынған деректер ПАТ пайдалану мыналарды қамтамасыз ететінін көрсетеді.

-Отын мен ауаның әртүрлі режимінде көмірдің тұрақты тұтануы;

-Қысқа уақыт ішінде жану камерасын жұмыс температурасына дейін (1000 °C дейін) жедел қыздыру;

-Біркелкі алаудың пайда болуы және жанудың жоғары толықтығын қамтамасыз ете отырып, толық жанбаған бөлшектердің санын азайтады;

-Реттеу мүмкіндігі жану қарқындылығы мен температуралық профиль ұзындығы бойынша от жағу кеңістігін өзгерту есебінен көмірдің және бастапқы ауа.

Осылайша, 5 кВт қуаты ПАТ технологиясы дәстүрлі қазан тұтатудың әдістеріне және көмір ұнтағын жануды тұрақтандыруға тиімді балама ретінде қолданылуы мүмкін, қосалқы отынға кететін энергияны азайтып, отын камерасының жабдықтарының сенімділігін арттырады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Көмір отынын плазмалық аса тұтандырудың (ПАТ) жаңа технологиясы әзірленіп, жобаланды, ол қуат диапазоны 2-ден 10 кВт-қа дейінгі айнымалы ток плазматорын қолдануға негізделген.

Пилоттық қондырғыдағы эксперименттік зерттеулер электр доғалық блоктағы шаң-ауа қоспасының жылдамдығы жану мен жану тұрақтылығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Көмір отынының тұрақты тұтануы 6-13 м/с диапазонында электр доғалық блокқа қоспаны беру жылдамдығы кезінде қамтамасыз етілетіні анықталды. Артық ауа коэффициенттері 0,7-ден 0,5-ке дейін болған кезде эксперименттік стендтің 1000 °C жұмыс температурасына шығу уақыты 200 секундтан аспады. Электр доғалы қондырғыға көмір отынының берілуінің артуымен тұтану процесінің қарқындылығы байқалады: Жану камерасындағы жалын бірден пайда болады, бұл ПАТ-нің жоғары энергетикалық тиімділігін көрсетеді. Алынған нәтижелер бұл технологияны жылу электр станцияларында және қазандық қондырғыларында көмір ұнтаған тұтатуға және жануды жеделдетуге қолдану мүмкіндігін растайды. Эксперименттік деректер сонымен қатар ПАТ-технологиясы құрамында ұшпа заттар көп маркаларды қоса алғанда, суық күйден тас көмірді жағуға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Бұл технологияны өнеркәсіптік пайдалануға енгізу мақсатында оны өнеркәсіптік сынақтан өткізу перспективасын ашады. ПАТ технологиясы көмір электр станциялары мен қазандық қондырғыларында отынды тұтатуда және жануды ұстап тұруда мазут отынына балама ретінде ұсынылуы мүмкін,қамтамасыз ете отырып:

- жұмыс температурасына жедел қол жеткізу;
- көмір ұнтағының тұрақты тұтануы мен жануы;
- қосалқы сұйық отын шығынын азайту;
- пеш жабдығы жұмысының сенімділігі мен экологиялылығын арттыру.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалану арқылы жүргізілді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Fragkos, P., Dalla Longa, F., Zisarou, E., van der Zwaan, B., Giannousakis, A., & Fattahi, A. (2023). Exploring model-based decarbonization and energy efficiency scenarios with PROMETHEUS and TIAM-ECN. *Energies, 16*(18), 6421. https://doi.org/10.3390/en16186421

Nakamura, T., Maruyama, A., Masuda, S., & Lloyd, S. (2024). The impact of Russia's invasion of Ukraine on Germany's energy choice attitudes among residents in German states with nuclear power plants in commission or decommissioned. *Sustainability, 16*(5), 1999. https://doi.org/10.3390/su16051999

Gajdzik, B., Wolniak, R., Nagaj, R., Żuromskaitė-Nagaj, B., & Grebski, W. W. (2024). The influence of the global energy crisis on energy efficiency: A comprehensive analysis. *Energies, 17*(4), 947. https://doi.org/10.3390/en17040947

ASTM International. (2024). *Coal standards and gas standards*. Retrieved December 5, 2024, from https://store.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/coal-standards-and-gas-standards.html

International Energy Agency. (2023). *World Energy Investment 2023*. IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023

Śladewski, Ł., Wojdan, K., & Świrski, K. (2017). New approach to optimizing combustion in power boilers using software inspired by the immune system integrated with an in-furnace temperature monitoring system. *Journal of Power Technologies, 97*(4), 308–313.

Pawlak, M. (2016). Performance analysis of power boiler drum water level control systems. *Acta Energetica, 4*, 81–96. https://doi.org/10.52710/ae.410

Enerdata. (2023). *Share of wind and solar in electricity production*. Retrieved July 6, 2023, from https://yearbook.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html

Loewen, B. (2022). Coal, green growth and crises: Exploring three European Union policy responses to regional energy transitions. *Energy Research & Social Science, 93*, 102849. https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102849

Messerle, V. E., Ustimenko, A. B., & Tastanbekov, A. K. (2022). Plasma ignition of solid fuels at thermal power plants. Part 1. Mathematical modeling of plasma-fuel system. *Thermophysics and Aeromechanics, 29*(2), 295–310. https://doi.org/10.1134/S0869864322020135

Kanilo, P. M., Kazantsev, V. I., Rasyuk, N. I., Schünemann, K., & Vavriv, D. M. (2003). Microwave plasma combustion of coal. *Fuel, 82*(2), 187–193. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00201-6

Gorokhovski, M., Karpenko, E. I., Lockwood, F. C., Messerle, V. E., Trusov, B. G., & Ustimenko, A. B. (2005). Plasma technologies for solid fuels: Experiment and theory. *Journal of the Energy Institute, 78*(4), 157–171. https://doi.org/10.1179/174602205X68261

International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook 2022*. IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022

Glushkov, D. O., Kuznetsov, G. V., Chebochakova, D. A., Lyakhovskaya, O. E., Shlegel, N. E., Anufriev, I. S., & Shadrin, E. Y. (2018). Experimental study of coal dust ignition characteristics at oil-free start-up of coal-fired boilers. *Applied Thermal Engineering, 142*, 371–379. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.010

Glushkov, D., Matiushenko, A., Nurpeiis, A., & Zhuikov, A. (2021). An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Processing Technology, 223*, 106986. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986

Zhao, F., Li, S., Ren, Y., Yao, Q., & Yuan, Y. (2016). Investigation of mechanisms in plasma-assisted ignition of dispersed coal particle streams. *Fuel, 186*, 518–524. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.078

Bolegenova, S., Askarova, A., Georgiev, A., Nugymanova, A., Maximov, V., Bolegenova, S., & Mamedov, B. (2023). The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances. *Energy, 277*, 127635. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635

Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd. (2023). *Plasma ignition and combustion stabilization (PICS) technology for pulverized coal-fired boilers*. Retrieved December 29, 2023, from https://en.lypower.com/plasma-ignition-and-combustion-stabilization-picstechnology-for-pulverized-coal-fired-boilers-product/

Mączka, T., Pawlak-Kruczek, H., Niedźwiecki, Ł., Ziaja, E., & Chorążyczewski, A. (2020). Plasma assisted combustion as a cost-effective way for balancing of intermittent sources: Techno-economic assessment for 200 MWel power unit. *Energies, 13*(19), 5056. https://doi.org/10.3390/en13195056

Youssefi, R., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2021). Pilot-scale experiences on a plasma ignition system for pulverized fuels. *Energies, 14*(16), 4726. https://doi.org/10.3390/en14164726

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Канапинов Медет Серикович – PhD докторы, Сәулет құрылыс және энергетика мектебінің аға оқытушысы, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан
Канапинов Медет Серикович – доктор PhD, старший преподаватель школы архитектуры строительства и энергетики, Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Kanapinov Medet Serikovich – Doctor PhD, Senior Lecturer at the School of Architecture, Construction and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: mega_bum_90@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6249-2373,

Бутаков Евгений Борисович – техника ғылымдарының кандидаты, РҒА СБ В.Е. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, Новосібір, Ресей.
Бутаков Евгений Борисович – кандидат технических наук, Института теплофизики им. В.Е. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Butakov Evgenii Borisovich – Candidate of Technical Sciences, V.E. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
e-mail:, e_butakov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9504-9629

Дуйсембаева Гульнур Сеитхановна – 8D07103 «Жылуэнергетика» мамандығының докторанты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
Дуйсембаева Гульнур Сеитхановна – докторант по специальности 8Д07103 – «Теплоэнергетика», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Duysembaeva Gulnur Seitkhanovna – Doctoral student specialty 8D07103 - "Heat power", East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: gdyusembaeva80@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5059-8223

Измайлов Леонид Николаевич – 7М05301 – «Техникалық физика» мамандығы бойынша магистрант, Шығыс Қазақстан техникалық университеті. Д. Серікбаева, Өскемен қ., Қазақстан
Измайлов Леонид Николаевич – магистрант по специальности 7М05301 – «Техническая физика», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Izmailov Leonid Nikolaevich – master's student in the field of 7M05301 – Technical Physics at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: leonplay200415@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2058-0046

Қизатов Айбар Советбекұлы – металлургиялық инженерия» мамандығы бойынша докторант, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
Қизатов Айбар Советбекұлы – докторант по специальности «Металлургическая инженерия», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Kizatov Aibar Sovetbekuly – doctoral candidate in the specialty «Metallurgical engineering», East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: kizatov.aibar.sovetbekuly@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

Даулетханов Ерхат Даулетханулы – техника ғылымдарының магистры, Люблин технологиялық университеті, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
Даулетханов Ерхат Даулетханулы – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Dauletkhanov Yerkhat Dauletkhanuly – master of technical sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: edauletkhanov@edu.ektu.kz
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5632-0391

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_8
SRSTI 528.4:550.34

SURFACE DEFORMATION MONITORING IN EPICENTRAL ZONES OF UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS USING GEODETIC METHODS

ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРЫНЫҢ ЭПИЦЕНТРЛІК АЙМАҚТАРЫНДА ЖЕР БЕТІ ДЕФОРМАЦИЯСЫН ГЕОДЕЗИЯЛЫҚ ӘДІСТЕР АРҚЫЛЫ МОНИТОРИНГТЕУ

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗОНАХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

A.T. Koishygarin [1], **Zh.K. Mukaliyev** [1*]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
*Corresponding author: Mukaliyev Zhandos Kairatovich, e-mail: zh.mukaliyev@kaznu.kz

Keywords:
Geodetic monitoring, surface deformation, underground nuclear explosions, epicentral zones, Semipalatinsk Test Site, ground subsidence, geodetic measurements.

ABSTRACT

This study examines geodetic monitoring of ground surface deformation in epicentral zones of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk Test Site. Underground nuclear explosions significantly alter geological structures and can lead to long-term deformation processes affecting the Earth's surface. The research focuses on the Balapan testing area, where underground nuclear tests were conducted in deep boreholes.

A geodetic observation network consisting of several benchmarks was established to monitor vertical displacements of the ground surface. High-precision leveling observations were performed using digital geodetic instruments to detect small elevation changes.

The analysis of monitoring data revealed measurable and persistent deformation processes occurring in the epicentral zone decades after the explosions. In particular, gradual subsidence of the ground surface was identified in the crater area, while other monitoring points exhibited stable uplift and fluctuating behavior. The magnitude of vertical displacements reached several millimeters per year, confirming the long-term geomechanical activity of the rock mass.

The results demonstrate the spatial heterogeneity of deformation processes and confirm the effectiveness of high-precision geodetic leveling for detecting millimeter-scale vertical displacements.

The scientific contribution of this study lies in the analysis of long-term observational data from the Balapan testing area and in the identification of deformation patterns specific to post-nuclear-test environments, which can support the development of monitoring systems and environmental safety assessments.

© 2026 **A.T. Koishygarin, Zh.K. Mukaliyev**
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Түйінді сөздер:
Геодезиялық мониторинг, жер бетінің деформациясы, жер асты ядролық жарылыстары, эпицентрлік аймақтар, Семей Полигоны, жердің шөгуі, геодезиялық өлшеулер.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеу Бұрынғы Семей Полигонындағы жерасты ядролық жарылыстарының эпицентрлік аймақтарындағы жер бетінің деформациясының геодезиялық мониторингін зерттейді. Жер асты ядролық жарылыстары геологиялық құрылымдарды айтарлықтай өзгертеді және Жер бетіне әсер ететін ұзақ мерзімді деформация процестеріне әкелуі мүмкін. Зерттеу жұмыстары терең ұңғымаларда жерасты ядролық сынақтары жүргізілген Балапан полигонына бағытталған.

Жер бетінің тік жылжуын бақылау үшін бірнеше эталондардан тұратын геодезиялық бақылау желісі құрылды. Биіктіктің кішігірім өзгерістерін анықтау үшін сандық геодезиялық құралдардың көмегімен жоғары дәлдіктегі нивелирлеу бақылаулары жүргізілді.

Мониторинг деректерін талдау жарылыстардан кейін ондаған жылдар өткен соң эпицентрлік аймақта болып жатқан өлшенетін және тұрақты деформация процестерін анықтады. Атап айтқанда, кратер аймағында жер бетінің біртіндеп шөгуі анықталды, ал басқа бақылау нүктелері тұрақты көтерілу мен құбылмалы мінез-құлықты көрсетті. Тік жылжулардың шамасы жылына бірнеше миллиметрге жетті, бұл тау жыныстарының массасының ұзақ мерзімді геомеханикалық белсенділігін растайды.

Нәтижелер деформация процестерінің кеңістіктік гетерогенділігін көрсетеді және миллиметрлік масштабтағы тік ығысуларды анықтау үшін жоғары дәлдіктегі геодезиялық нивелирлеудің тиімділігін растайды.

Бұл зерттеудің ғылыми үлесі Балапан сынақ аймағындағы ұзақ мерзімді бақылау деректерін талдауда және мониторинг жүйелері мен экологиялық қауіпсіздікті бағалауды дамытуға қолдау көрсете алатын ядролық сынақтардан кейінгі ортаға тән деформация заңдылықтарын анықтауда жатыр.

Ключевые слова:
Геодезический мониторинг, деформация поверхности, подземные ядерные взрывы, эпицентральные зоны, Семипалатинский испытательный полигон, просадка грунта, геодезические измерения.

АННОТАЦИЯ

В данном исследовании рассматривается геодезический мониторинг деформации земной поверхности в эпицентральных зонах подземных ядерных взрывов на бывшем Семипалатинском испытательном полигоне. Подземные ядерные взрывы существенно изменяют геологические структуры и могут привести к долгосрочным деформационным процессам, влияющим на земную поверхность. Исследование сосредоточено на испытательном полигоне Балапан, где проводились подземные ядерные испытания в глубоких скважинах.

Для мониторинга вертикальных смещений земной поверхности была создана геодезическая наблюдательная сеть, состоящая из нескольких контрольных точек. Высокоточные наблюдения за нивелированием проводились с использованием цифровых геодезических инструментов для обнаружения небольших перепадов высот.

Анализ данных мониторинга выявил поддающиеся измерению и устойчивые деформационные процессы, происходящие в эпицентральной зоне спустя десятилетия после взрывов. В частности, в районе кратера было обнаружено постепенное оседание поверхности земли, в то время как в других точках мониторинга наблюдались стабильные подъемы и колебания. Величина вертикальных смещений достигала нескольких миллиметров в год, что подтверждает долгосрочную геомеханическую активность горного массива.

Полученные результаты демонстрируют пространственную неоднородность деформационных процессов и подтверждают эффективность высокоточного геодезического нивелирования для определения вертикальных смещений миллиметрового масштаба.
Научный вклад этого исследования заключается в анализе данных долгосрочных наблюдений на испытательном полигоне Балапан и в выявлении закономерностей деформаций, характерных для условий после ядерных испытаний, которые могут помочь в разработке систем мониторинга и оценки экологической безопасности.

INTRODUCTION

Underground nuclear explosions are among the most intensive forms of anthropogenic disturbance affecting geological environments. They generate short-term shock effects and long-term geomechanical transformations, including the formation of underground cavities, fracturing of the surrounding rock mass, redistribution of stresses, and changes in the morphology of the ground surface (Glasstone & Dolan, 1977; Howard et al., 2004; Turchenko et al., 2023). These processes may continue for decades after detonation and can result in measurable vertical and horizontal displacements in epicentral zones.

The former Semipalatinsk Test Site in eastern Kazakhstan is one of the most important territories for studying the long-term consequences of nuclear testing. From 1949 to 1989, numerous nuclear tests were conducted at this site, including atmospheric, surface, and underground explosions (National Research Council, 2007; Panitskiy et al., 2023). Underground detonations were carried out in horizontal tunnels and deep vertical boreholes within several testing areas, including Degelen, Balapan, Sary-Uzen, and Telkem. These explosions caused significant disturbances in geological structures, affected rock mass stability, and altered the surface morphology of epicentral areas.

Post-explosion deformation may be expressed through subsidence, uplift, surface cracking, and crater formation. In some areas, large depressions developed above underground explosion cavities, indicating continuing geomechanical adjustment of the rock mass. For example, in the Balapan testing area, a crater more than 100 m in diameter and over 17 m deep formed several years after an underground detonation (Howard et al., 2004). Such cases demonstrate that deformation processes in post-nuclear-test areas are not limited to the immediate effects of explosions, but may also reflect delayed and long-term ground response.

Monitoring these processes is important for understanding post-explosion geodynamics and for assessing geological and environmental safety in former nuclear test territories. Geodetic methods provide a reliable basis for detecting small surface displacements with high accuracy. In particular, high-precision leveling makes it possible to determine vertical movements of the ground surface at the millimeter scale (Ghilani & Wolf, 2012). At the same time, modern geodetic and remote sensing techniques, such as GNSS observations and satellite radar interferometry, are increasingly used worldwide to complement traditional leveling and improve the spatial coverage of deformation monitoring (Massonnet & Feigl, 1998; Mukaliyev et al., 2024).

Despite previous studies on the geological and environmental consequences of nuclear testing, the long-term vertical deformation behavior of individual epicentral zones at the Semipalatinsk Test Site remains insufficiently interpreted from the perspective of repeated geodetic observations. In particular, the relationship between the organization of monitoring networks, the sign and magnitude of measured vertical displacements, and the temporal evolution of deformation trends requires further clarification.

The aim of this study is to evaluate the applicability of geodetic monitoring methods for detecting long-term surface deformation in epicentral zones of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk Test Site. The research is based on the analysis of vertical

displacement measurements obtained in the Balapan testing area. The scientific novelty of the study lies in the interpretation of repeated high-precision leveling data for identifying temporal deformation patterns in a post-nuclear-test environment. Unlike previous works that mainly describe the general consequences of underground explosions, this study focuses on the geodetic assessment of vertical displacement dynamics and the practical organization of monitoring networks in epicentral zones. The results contribute to a better understanding of long-term geodynamic processes and support the development of continuous geodetic monitoring systems for geological and environmental safety assessment.

MATERIALS AND METHODS

The research was conducted within the territory of the former Semipalatinsk Test Site, located in eastern Kazakhstan. Particular attention was given to the Balapan testing area, where underground nuclear explosions were carried out in deep boreholes during the period of nuclear testing. The study focuses on the epicentral zone of borehole 1414, where long-term deformation of the Earth's surface has been observed.

Underground nuclear explosions generate complex geomechanical processes within the rock mass, including the formation of underground cavities, zones of fractured rocks, and redistribution of stresses in the surrounding geological structures. Over time, these processes may lead to subsidence, uplift, or irregular deformation of the ground surface above the explosion cavity. Therefore, monitoring such deformation processes requires a stable geodetic observation network capable of detecting small vertical displacements.

Study area and observation object

The object of monitoring is the epicentral zone of borehole 1414, located within the Balapan testing area. The underground nuclear test in this borehole was conducted on May 26, 1984, at a depth of approximately 489 m. Long-term geological processes after the explosion resulted in noticeable deformation of the ground surface around the epicentral zone (Yakovenko, 2013).

A crater formed above the underground explosion cavity as a result of collapse and compaction processes in the rock mass. The diameter of the crater currently exceeds 100 m, and its depth is more than 17 m. These morphological changes indicate the continuing influence of post-explosion geomechanical processes on the surface relief (Yakovenko, 2013).

Geodetic observation network

To monitor surface deformation, a geodetic observation network consisting of several benchmarks was established in the epicentral zone. The network includes observation points located both inside the deformation zone and outside it on relatively stable terrain.

The configuration of the monitoring network includes:

– one benchmark located near the center of the deformation zone (crater bottom);

– several benchmarks placed along the slopes of the crater;

– one reference benchmark located outside the deformation zone on stable terrain.

This configuration makes it possible to compare elevation changes between deforming parts of the crater and the stable reference area. Figure 1 shows the scheme of the geodetic observation network in the epicentral zone, including the spatial distribution of monitoring benchmarks and the reference point.

Geodetic monitoring was performed using high-precision leveling. Measurements were carried out with a SOKKIA SDL30 digital level and fiberglass leveling rods with RAB-coded scales. This equipment allows elevation differences to be measured with millimeter-level accuracy. The standard accuracy of the SOKKIA SDL30 digital level is approximately ±1.0 mm per 1 km of double-run leveling under normal field conditions.

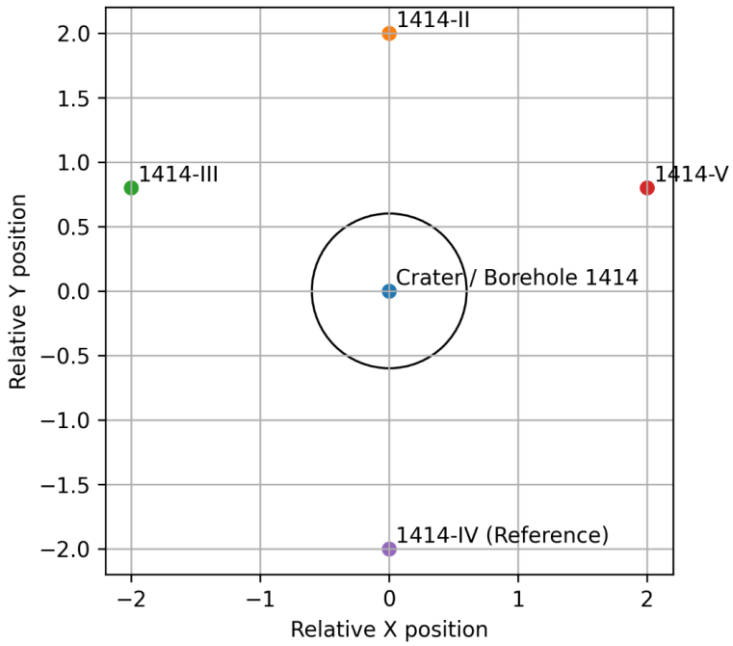


Figure 1. Scheme of geodetic observation network in the epicentral zone
Note – compiled by the authors

To reduce measurement errors, observations were conducted under stable weather conditions, using calibrated leveling rods and repeated measurement cycles. The estimated total error of elevation differences for individual benchmarks did not exceed ±2–3 mm. This level of accuracy is sufficient for detecting small vertical displacements in the epicentral zone. Therefore, the applied geodetic method provides reliable data for analyzing deformation processes.

The monitoring program included repeated measurement cycles performed periodically. The first observation cycle was conducted in 2009, when the initial elevations of all benchmarks were determined. Subsequent measurements were carried out in order to detect vertical displacements of the ground surface and to identify temporal deformation trends.

Figure 2 presents the integrated 3D monitoring scheme of borehole 1414. The figure illustrates the spatial arrangement of monitoring benchmarks, the crater geometry, and the reference point located on stable ground. This visualization helps to demonstrate the relationship between the observation points and the deformation zone.

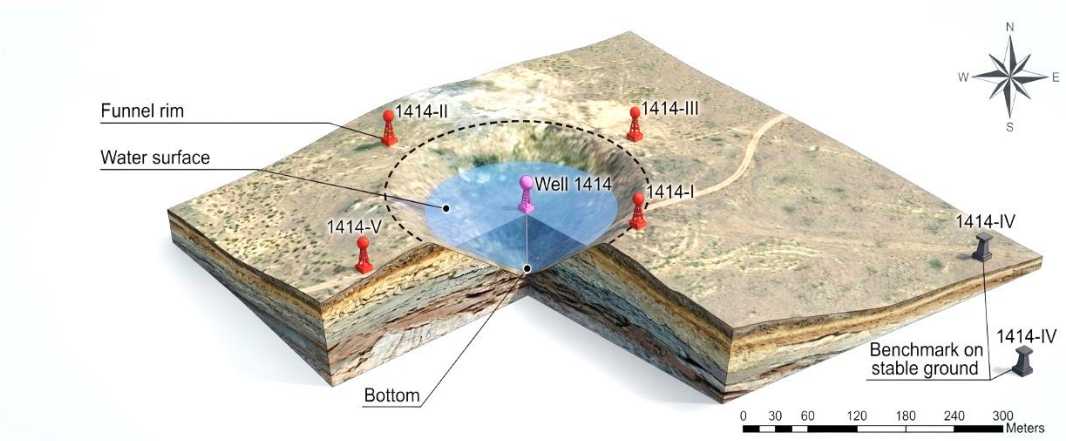


Figure 2. Integrated 3D monitoring scheme of funnel 1414.
Note – compiled by the authors

Data processing and deformation analysis

The monitoring data were processed in a conditional height system, where the benchmark located outside the deformation zone was used as the reference point. Elevation differences obtained from repeated measurements were analyzed to determine vertical displacements of monitoring benchmarks.

The data processing procedure included:

– calculation of elevation changes between observation periods;

– determination of vertical displacement values;

– identification of zones with maximum deformation;

– graphical analysis of deformation dynamics.

Positive displacement values were interpreted as relative uplift, whereas negative values were interpreted as subsidence. This approach made it possible to analyze not only the magnitude of deformation, but also the direction of vertical movement over time.

The results of repeated geodetic measurements are summarized in Table 1. The table presents elevation values and annual vertical displacement changes for monitoring benchmarks located within the epicentral zone.

Table 1. Elevation changes of monitoring benchmarks in the epicentral zone

Benchmark	Elev. 2020 (m)	ΔH 21–20 (mm)	Elev. 2021 (m)	ΔH 21–20 (mm)	ΔH 22–21 (mm)	Elev. 2022 (m)	ΔH 22–21 (mm)	Elev. 2023 (m)	ΔH 23–22 (mm)	Elev. 2023 (m)*	ΔH 24–23 (mm)	Trend
1414-II	305.62	–4	305.58	–4	–3	305.55	–3	305.49	–6	305.44	–5	Subsiding
1414-III	312.88	–3	312.85	–3	–6	312.79	–6	312.74	–5	312.74	–4	Declining
1414-IV	298.47	+4	298.51	+4	+4	298.55	+4	298.60	+5	298.60	+3	Rising
1414-V	289.24	+3	289.27	+3	–5	289.22	–5	289.18	–4	289.18	–2	Fluctuating
Note – compiled by the authors												

The data presented in Table 1 indicate different deformation trends within the epicentral zone. Benchmarks 1414-II and 1414-III show a consistent decrease in elevation, indicating subsidence. Benchmark 1414-IV demonstrates positive vertical displacement values, which may indicate local uplift or relative stabilization of the slope area. Benchmark 1414-V shows alternating positive and negative values, suggesting unstable or fluctuating deformation behavior.

In addition to classical geodetic leveling, modern deformation monitoring techniques such as Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) are widely used for detecting surface displacements. GNSS provides continuous three-dimensional positioning with high temporal resolution, while InSAR enables spatial analysis of ground deformation over large areas using satellite radar data. However, high-precision leveling remains one of the most accurate methods for detecting small vertical displacements at the local scale. For this reason, it was selected as the main method for the present study.

The obtained measurements allow the identification of deformation trends in the epicentral zone and the assessment of ground surface stability in areas affected by underground nuclear explosions. The combination of benchmark-based elevation measurements, error assessment, and temporal comparison provides a reliable basis for interpreting long-term deformation processes in the Balapan testing area.

RESULTS AND DISCUSSION

Geodetic monitoring data confirm ongoing deformation processes in the epicentral zones of underground nuclear explosions, even decades after detonation (Dickey et al., 1972). Analysis of repeated leveling measurements shows noticeable changes in the elevation of observation benchmarks located around the crater of borehole 1414.

The first observation cycle was conducted in 2009 and served as the initial reference for subsequent measurements (Nurpeisova et al., 2021). Comparison of elevation data obtained during the monitoring period revealed both uplift and subsidence processes in different parts of the observation network. During the first observation interval (2009–2010), slight uplift of the ground surface was recorded at several monitoring points located in the northwestern and eastern parts of the epicentral area (Kocharyan & Spivak, 2001). In particular, benchmark 1414-II showed an increase in elevation of approximately +3.4 mm, while benchmark 1414-III showed a slightly larger uplift of +5.9 mm.

However, subsequent observations revealed a different deformation trend (Ustavich et al., 2013). During the periods 2010–2011 and 2011–2012, a gradual decrease in elevation was observed at most monitoring points (Yakovenko & Ustavich, 2015). This indicates a general subsidence of the ground surface in the epicentral zone. The largest deformation was recorded at benchmark 1414-III, where the cumulative decrease in elevation reached approximately 8.8 mm during the monitoring period. Such deformation values confirm that the geological environment above the underground explosion cavity remains dynamically active.

Spatial analysis of the monitoring network shows that deformation intensity varies depending on the location of the benchmark relative to the crater center. Monitoring points located along the slopes of the crater demonstrate larger displacement values compared to the reference benchmark located outside the deformation zone (Nurpeisova et al., 2014). This pattern indicates that the main deformation processes are concentrated within the epicentral area where the underground cavity and fractured rock zone are located.

Table 2. Temporal dynamics of vertical displacement (ΔH, mm) of monitoring benchmarks in groups II, III, V and IV in the epicentral zone of borehole 1414 during the monitoring period 2020–2024

Group	2020	2021	2022	2023	2024
Group II	7.0	7.6	8.8	6.4	5.2
Group III	10.0	8.3	6.9	4.7	-3.0
Group V	8.0	6.1	4.2	3.3	-4.5
Group IV	6.8	5.5	4.6	3.5	-2.6
Note – compiled by the authors					

Table 2 illustrates the temporal dynamics of vertical displacement (ΔH) for different benchmark groups during the monitoring period 2020–2024, clearly demonstrating the transition from initial uplift to subsequent subsidence.

The data reveal a clear change in deformation behavior over time. In the earlier years (2020–2021), most monitoring groups are characterized by positive displacement values, indicating localized uplift of the ground surface.

However, in the later period (2022–2024), the displacement pattern shifts toward predominantly negative values, reflecting consistent subsidence across the epicentral zone. The largest negative values are observed in groups III and V, indicating more intensive deformation

processes in these areas. The predominance of negative displacement values in recent years indicates that subsidence has become the dominant deformation process in the epicentral zone.

This transition from uplift to subsidence suggests a change in the dominant geomechanical processes. Initial uplift may be associated with residual stress redistribution and partial elastic recovery of the rock mass after the explosion, whereas subsequent subsidence reflects long-term compaction of fractured rock and gradual collapse of underground cavities.

The observed subsidence is controlled by several geomechanical processes occurring in the rock mass after the explosion. One of the most important mechanisms is the gradual collapse or compaction of underground cavities formed during the nuclear detonation. Over time, the surrounding rock mass undergoes stress redistribution, which leads to progressive deformation of the ground surface.

Another possible factor influencing surface deformation is the presence of fractured rock zones created by the explosion (Massé, 1981). These zones may experience gradual compaction and displacement under the influence of gravitational forces and long-term geodynamic processes. In addition, infiltration of groundwater into fractured zones may contribute to further weakening of the rock mass and acceleration of subsidence processes (Saharan, Mitri & Jethwa, 2006).

The results obtained from the geodetic monitoring network confirm that long-term deformation processes continue to develop in epicentral zones of underground nuclear explosions (Vincent, Foxall & Romano, 1997). Although the recorded displacement values are relatively small, their systematic character indicates the ongoing adjustment of the geological environment to the structural changes caused by the explosion.

Therefore, continuous geodetic monitoring remains an essential tool for assessing the stability of the ground surface in former nuclear test areas (Yadernye ispytaniya SSSR, 2000). The establishment of observation networks and periodic measurement of benchmark elevations provide valuable data for understanding long-term geodynamic processes and evaluating potential geological hazards in such territories (Busygina & Rykova, 2018).

The observed deformation patterns are consistent with results reported in international studies of underground nuclear test sites, where initial uplift is followed by long-term subsidence due to cavity collapse and rock mass compaction (Wang et al., 2018; Adushkin & Spivak, 2004).

CONCLUSION

The results of the conducted research demonstrate the significance of geodetic monitoring for the investigation of long-term deformation processes in the epicentral zones of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk Test Site. The establishment of a geodetic observation network made it possible to detect minor vertical displacements of the Earth's surface and to assess deformation trends over time.

The analysis of repeated leveling observations carried out during the monitoring period showed that deformation processes continue to occur in the epicentral zone even decades after the underground nuclear explosion. During the initial observation period, slight uplift of the ground surface was recorded at several monitoring benchmarks. However, subsequent measurements revealed a gradual tendency toward subsidence in most of the benchmarks located around the crater.

The maximum recorded vertical displacement reached approximately 8.8 mm at one of the monitoring points located on the crater slope. These results indicate that the geological environment above the underground explosion cavity remains dynamically active. The observed surface subsidence may be associated with long-term geomechanical processes within the rock mass, including gradual compaction of fractured rocks and redistribution of stresses in the surrounding geological structures.

The conducted study confirms that high-precision geodetic monitoring is an effective method for detecting small-scale surface deformations and assessing ground surface stability in areas affected by underground nuclear explosions. Continuous monitoring of epicentral zones is essential for a better understanding of long-term geodynamic processes and for ensuring environmental safety in former nuclear testing areas.

Future research should focus on expanding the geodetic observation network and integrating geodetic monitoring data with remote sensing technologies and geomechanical modeling methods. Such an integrated approach will provide more comprehensive information on deformation processes and improve the reliability of geological hazard assessment in territories affected by underground nuclear explosions.

Overall, the obtained results highlight the importance of long-term monitoring for detecting delayed geomechanical effects in post-nuclear-test environments and for supporting scientifically grounded decisions related to environmental and geological safety.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This research received no external funding.

INSTITUTIONAL REVIEW BOARD STATEMENT: Not applicable.

INFORMED CONSENT STATEMENT: This study did not involve human participants; therefore, informed consent was not required.

DATA AVAILABILITY STATEMENT: The datasets generated and analyzed during the current study are not publicly available but are available from the corresponding author upon reasonable request.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to colleagues and specialists who provided assistance during the geodetic observations and data processing. The authors also thank reviewers and experts for their valuable comments and suggestions that helped improve the quality of the manuscript.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: No artificial intelligence (AI) technologies or generative AI tools were used in the preparation of this manuscript.

REFERENCES

Adushkin, V. V., & Spivak, A. A. (2004). Changes in properties of rock massifs due to underground nuclear explosions. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 40, 624–634. https://doi.org/10.1023/B:CESW.0000048263.34894.58.

Adushkin, V. V., Kocharyan, G. G., & Novikov, V. A. (2016). Study of fault slip modes. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 52(5), 637–647.

Busygina, T. V., & Rykova, V. V. (2018). Analysis of publications on the Semipalatinsk Test Site using the Web of Science database and the CiteSpace program. Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan, (4), 83–88. [in Russian]

Dickey, D. D., McKeown, F. A., & Bucknam, R. C. (1972). Preliminary results of ground deformation measurements near the CANNIKIN explosion. Bulletin of the Seismological Society of America, 62(6), 1505–1518.

Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2012). Elementary surveying: An introduction to geomatics (13th ed.). Pearson.

Glasstone, S., & Dolan, P. J. (1977). The effects of nuclear weapons (3rd ed.). U.S. Department of Defense and U.S. Department of Energy.

Howard, B. J., Semioshkina, N., Voigt, G., Mukusheva, M., & Clifford, J. (2004). Radiostrontium contamination of soil and vegetation within the Semipalatinsk Test Site. Radiation and Environmental Biophysics, 43, 285–292. https://doi.org/10.1007/s00411-004-0261-8

Kocharyan, G. G., & Spivak, A. A. (2001). Movement of rock blocks during large-scale underground explosions. Part I: Experimental data. Journal of Mining Science, 37(1), 12–22.

Lukoshenko, S. N. (Ed.). (2010). Sbornik trudov Instituta radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii za 2007–2009 gg. [Proceedings of the Institute of Radiation Safety and Ecology for 2007–2009]. Dom Pechati. [in Russian]

Massé, R. P. (1981). Review of seismic source models for underground nuclear explosions. Bulletin of the Seismological Society of America, 71(4), 1249–1265.

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4), 441–500. https://doi.org/10.1029/97RG03139

Mikhailov, V. N. (Ed.). (1997). Yadernye ispytaniya SSSR [Nuclear tests of the USSR]. Izdat. [in Russian]

Mukaliyev, Zh. K., Zhumatayeva, Zh. M., Assylbekova, A. A., Bekkuliev, A. A., Onalbayeva, D. S., & Rafikov, T. K. (2025). Remote sensing-based evaluation of land degradation and moisture variability in post-nuclear landscapes of Kazakhstan. Journal of Geography and Environmental Management. https://doi.org/10.26577/JGEM20257943

Mukaliyev, Zh., Assylbekova, A., Zhumatayeva, Zh., Azizov, E., & Rafikov, T. (2024). Creation of a database for the analysis of the lands of the Semipalatinsk Test Site. Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, (2), 75–82. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2024_2_75

National Research Council. (2007). The containment of underground nuclear explosions. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/1065

Nurpeisova, M. B., Kirgizbaeva, G. G., & Bekbassarov, Sh. Sh. (2014). Geodynamic monitoring of the Semipalatinsk Test Site territory. In 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014 (Vol. 2, pp. 267–274). STEF92 Technology Ltd.

Nurpeisova, M. B., Umirbaeva, A. B., Donenbaeva, N. S., et al. (2020). Ground benchmark for geodetic measurements. Patent RK No. 4700.

Nurpeisova, M. B., Umirbaeva, A. B., Fedorov, E. V., & Miletenko, N. A. (2021). Assessment of deformed and radiological state territory based on integrated monitoring. Eurasian Mining, (1), 80–84. https://doi.org/10.17580/em.2021.01.17

Panitskiy, A., Syssoeva, Y., Baigazy, S., Kunduzbayeva, A., Kenzhina, L., Polivkina, Y., Larionova, N., Krivitskiy, P., & Aidarkhanova, A. (2023). Vertical distribution of radionuclides in soil at the Semipalatinsk Test Site beyond its test locations. PLoS ONE, 18(1), Article e0278581. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278581

Saharan, M., Mitri, H., & Jethwa, J. (2006). Rock fracturing by explosive energy: Review of state-of-the-art. Fragblast, 10(1), 61–81.

Turchenko, D. V., Aidarkhanov, A. O., Aidarkhanova, A. K., Aktayev, M. R., Dashuk, A. L., & Kruglykhin, A. A. (2023). Research into the current radiological state of air and monitoring observations on STS and the adjacent territory. Journal of Environmental Radioactivity, 264, Article 107199. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107199

Ustavich, G. A., Yakovenko, Yu. Yu., Yakovenko, A. M., & Poshivaylo, Ya. G. (2013). The composition of geodetic and cartographic works in studying nuclear explosion sites at the Semipalatinsk Test Site. Geodeziya i Kartografiya, (4), 2–6.

Vincent, P., Foxall, B., & Romano, J. (1997). Analysis, comparison, and modeling of radar interferometry data of surface deformation signals associated with underground explosions, mine collapses and earthquakes. Phase I: Underground explosions, Nevada Test Site (UCRL-ID-128403). Lawrence Livermore National Laboratory.

Wang, T., Shi, Q., Nikkhoo, M., Wei, S., Barbot, S., Dreger, D., Bürgmann, R., Motagh, M., & Chen, Q. (2018). The rise, collapse, and compaction of Mt. Mantap from the 3 September 2017 North Korean nuclear test. Science, 361(6398), 166–170. https://doi.org/10.1126/science.aar7230

Yakovenko, A. M. (2013). K provedeniyu geodezicheskogo monitoringa v epitsentral'nykh zonakh raneye provedennykh podzemnykh yadernykh vzryvov na byvshem Semipalatinskom ispytatel'nom poligone [On conducting geodetic monitoring in epicentral zones of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk Test Site]. Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Tsentra Respubliki Kazakhstan, (3), 23–26. [In Russian]

Yakovenko, A. M., & Ustavich, G. A. (2015). Deformation monitoring of ground surface at test wells at Semipalatinsk Nuclear Test Site. Izvestiya Vuzov. Geodeziya i Kartografiya, (S5), 146–151.

Yadernye ispytaniya SSSR. (2000). Yadernye vzryvy v interesakh narodnogo khozyaystva i nauchnykh issledovaniy [Nuclear explosions for national economy and scientific research] (Vol. 4). RFNC-VNIIEF. [In Russian]

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Қойшығарин Айбек – PhD докторант, оқытушы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан.
Койшыгарин Айбек – PhD докторант, оқытушы; Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
Koishygarin Aibek – PhD doctoral student, lecturer; Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.
e-mail: aibek-1-89@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3437-8865

Мукалиев Жандос Кайратович – техника ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан,
Мукалиев Жандос Кайратович – магистр технических наук, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан,
Mukaliyev Zhandos – Master of Technical Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: Zh.mukaliyev@kaznu.kz
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9292-7468

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_9
ХҒТАР 73.31.81

ҚАЛАЛЫҚ КӨЛІК ЖҮЙЕСІН ТАЛДАУДА ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЖӘНЕ ЕСЕПТІК ӘДІСТЕРДІҢ ИНТЕГРАЦИЯСЫ

ИНТЕГРАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

INTEGRATION OF EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL APPROACHES IN URBAN TRANSPORT SYSTEM ANALYSIS

М.С. Муздыбаев [1], А.С. Абеджанова [1]*, П. Бухнер [2], А.С. Муздыбаева [1], Д. М. Мырзабекова [1]
[1]Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
[2]Прагадағы Чехия техникалық университеті, Прага қаласы, Чехия
*Жауапты автор: Абеджанова Арай Сайлаубеккызы, e-mail: Aabedzhanova@ektu.kz

Түйінді сөздер:
смарт-технологиялар, ГАЖ, «ақылды» көлік жүйелері, эксперименттік зерттеулер, машиналық оқыту.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада қалалық көлік жүйесін талдаудың кешенді тәсілі қарастырылған, оның негізінде смарт-технологияларды қолдана отырып, эксперименттік және есептік әдістердің интеграциясы жатыр.

Зерттеу жүргізу үшін көлік құралдарының қозғалысының әртүрлі сценарийлерін модельдейтін үлгілер пайдаланылды. Бұл көлік ағындары туралы ақпаратты беру және өңдеу арқылы олардың параметрлерін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Көлік саласында геоақпараттық жүйенің (ГАЖ) даму болашағы қарастырылып, автопилоттық навигациялық борттық ақпараттық жүйелермен жабдықталған «ақылды» көлік құралдарын біріктіру арқылы «ақылды» көлік жүйелерін құру мәселесі талданады. «Ақылды» көлік жүйелері заманауи жол қозғалысын ұйымдастырудың техникалық құралдарын қамтитын дамыған жол инфрақұрылымына ие болуы тиіс.

«Ақылды» көлік жүйелерінде кептелістерді болжау және көлік құралдарының бағыттарын оңтайландыру үшін машиналық оқыту әдістері мен алгоритмдері, квантильдік регрессия және нейрондық желілер қолданылады.

Жолдардың бақылау учаскелерінде жол инфрақұрылымымен өзара іс-қимыл бағытын оңтайландыру негізінде көлік жүйелерінің тиімділігін арттыру жөніндегі ұсыныстарды тәжірибелік сынақтан өткізу үшін эксперименттік зерттеулер жүргізу қажет.

Зерттеу нәтижелері қалалық мобильділікті оңтайландыру мен көлік жүйелерінің тиімділігін арттыруда практикалық маңызға ие болады.

© 2026 **М.С. Муздыбаев, А.С. Абеджанова, П. Бухнер, А.С. Муздыбаева, Д. М. Мырзабекова**
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Ключевые слова:
смарт-технологии, ГИС, «умные» транспортные системы, экспериментальные исследования, машинное обучение.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается комплексный подход анализа городской транспортной системы, основанный на интеграции экспериментальных и вычислительных методов с применением смарт-технологий.

Для проведения исследований использованы модели, которые симулируют различные сценарии движения транспортных средств. Это позволит оптимизировать параметры транспортных потоков путем передачи и обработки информации о них для управления движением. Рассмотрены перспективы развития геоинформационной системы (ГИС) в транспортной сфере, включая интеграцию «умных» транспортных средств, оснащенных бортовыми информационными системами навигации автопилотирования для создания «умных» транспортных систем. «Умные» транспортные системы должны иметь развитую инфраструктуру дорожной сети, включая современные технические средства организации дорожного движения.

Для прогнозирования заторов и оптимизации маршрутов транспортных средств в «умных» транспортных системах применены методы и алгоритмы машинного обучения, квантильная регрессия, нейронные сети. Проведение экспериментальных исследований необходимо для практической апробации предложений по повышению эффективности транспортных систем на основе оптимизации маршрута транспорта взаимодействия с дорожной инфраструктурой на контрольных участках дорог.

Результаты исследования будут иметь практическое значение для оптимизации городской мобильности и повышения эффективности транспортных систем.

keywords:
smart technologies, GIS, smart transport systems, experimental research, machine learning.

ABSTRACT

The article examines a comprehensive approach to analyzing the urban transport system, based on the integration of experimental and computational methods with the use of smart technologies.

To conduct the research, models simulating various vehicle movement scenarios were employed. This makes it possible to optimize traffic flow parameters through the transmission and processing of relevant information for traffic management.

The prospects for the development of Geographic Information Systems (GIS) in the transport sector are discussed, including the integration of “smart” vehicles equipped with onboard navigation and autopilot information systems to create “smart” transport systems. “Smart” transport systems should possess a well-developed road infrastructure, including modern technical means for traffic organization.

In “smart” transport systems, methods and algorithms of machine learning, such as quantile regression and neural networks, are applied to predict traffic congestion and optimize vehicle routes.

Experimental studies are necessary for the practical testing of proposals to improve the efficiency of transport systems based on optimizing the route of transport and interaction with the road infrastructure on control sections of roads.

The research results will have practical significance for optimizing urban mobility and enhancing the efficiency of transport systems.

КІРІСПЕ

Қалалық көлік инфрақұрылымын дамытудың өзектілігі оның мобильділігін арттыру, жолда жүру уақытын қысқарту және көлік шығындарын азайту қажеттілігімен негізделеді. Қазіргі мегаполистерде көлік басқарудың дәстүрлі әдістері деректердің толық болмауы мен көлік ағындарын болжаудың күрделілігіне байланысты елеулі шектеулерге тап болады. Қаланың сандық дамуы жағдайында урбанистік кеңістіктің трансформациясы «ақылды қала» тұжырымдамасына сәйкес жүзеге асуда, онда көлік инфрақұрылымы көлік техникасымен және смарт-технологиялармен интеграцияланады. Осындай жағдайда геоақпараттық жүйелердің (ГАЖ) маңызы арта түседі, өйткені олар көлік құралдарын басқару үшін кеңістіктік деректерді жинауға, өңдеуге және талдауға мүмкіндік береді.

Әлемдік тәжірибе көрсеткендей, көлік жүйесінің тиімділігін арттыру үшін смарт-технологияларды ГАЖ-пен, аналитикалық модельдермен және машиналық оқыту алгоритмдерімен біріктіріп қолдану – басқару жүйесінің негізгі құралдарының біріне айналуда (1-кесте).

1-кесте. Ірі қалалардың көлік жүйесін басқаруда ГАЖ қолданудың салыстырмалы талдауы

Қала/ Ел	ГАЖ енгізудің негізгі мақсаттары	Интеграция-ланған технологиялар	Қолдану және ерекшеліктері	Алынған нәтижелер
Мәскеу (Ресей)	Жол қозғалысын оңтайландыру, қоғамдық көлікті басқару, аудандардарға келетін көліктің қажеттілін талдау	IoT, бейнедетек-торлар, Big Data, AI/ML, сандық егіздер	Қозғалыстың динамикалық модельдерін құру, «Яндекс. Пробки» және МосТранс жүйелерімен интеграция, магистральдар мен бағыттардың жүктелуін болжау	Кептелісті 18 %-ға төмендету, ағындарды болжау дәлдігін арттыру, қоғамдық көлік бағыттарының кестелерін оңтайландыру
Бейжің (Қытай)	«Ақылды» көлік дәліздерін қалыптастыру, терминалдар мен инфрақұрылымды бақылау, қауіпсіздікті арттыру	ГАЖ + машиналық оқыту, сенсорлық желілер, бұлтты есептеулер	Терминалдық кешендерді модельдеу, қорғаныс аймақтарын бақылау, трафик пен айналма жолдарды болжау, экологиялық көрсеткіштермен интеграция	Кідірістерді 23 %-ға төмендету; магистральдардың өткізу қабілетін арттыру, инфрақұрылым мониторингі
Токио (Жапония)	«Ақылды қаланы дамыту, деректер мен сандық технологияларды пайдалану арқылы қалалық функцияларды оңтайландыру, автономды қозғалысты дамыту	ГАЖ, сенсорлық желілер, AI, толықтырылған шындық (AR), болжамды аналитика	ГАЖ-ды мобильді қосымшалармен және ақпараттық тақталармен біріктіру, бағыттардың жүктелуін болжау, кептелістер мен тұрақтарды көрсету	Жол жүру уақытын 18 %-ға қысқарту, көше кептелісін болжау дәлдігін арттыру, жолаушылардың қанағаттануы
Ескерту – автор (Абеджанова, 2025) негізінде құрастырған				

Кеңістіктік, уақыттық және статистикалық деректердің интеграциясы көлік желісін бейнелеуге ғана емес, сонымен қатар көлік қозғалысын нақты уақытта болжауға, модельдеуге және оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Дүниежүзінің ірі қалалары – Мәскеу (Ресей) (Radovic Markovic, Vukovic & Mityagin, 2021), Бейжің (Қытай) (Tarissa, 2023) және Токио (Жапония) (Yamamura et al., 2017) мысалында ГАЖ-технологияларының көлік ағындарын болжау дәлдігін арттырып, кідірістерді 18–23 % төмендетуге мүмкіндік беретіні көрсетілген.

Зерттеулерде ГАЖ жүйелерін машиналық оқыту әдістерімен біріктірудің маңыздылығына ерекше назар аударылған. Бұл қоғамдық көліктің карталардағы бейнеленуін жақсартып, бағыттарды оңтайландыруға мүмкіндік береді (Abedzhanova et al., 2023). Мысалы, Қытайда ГАЖ терминалдық кешендерді модельдеу және жол бойындағы бөлінген жолақтарды мониторингтеу үшін қолданылады, бұл өз кезегінде инфрақұрылымды басқарудың қауіпсіздігі мен тиімділігін арттырады.

Ресейде (Sukhoruchkina & Sukhoruchkina, 2023) ГАЖ аудандардарға келетін көліктің қажеттілін талдау және логистиканы оңтайландыру мақсатында пайдаланылады. Осылайша, әлемдік тәжірибеде ГАЖ тек картографиялық құрал болудан қалды — ол қалалық мобильділікті кешенді басқаруға арналған аналитикалық платформаға айналып, көптеген дереккөздерді біріктіріп, интеллектуалды көлік басқару сценарийлерін қалыптастыра алатын жүйеге айналды (Pali et al., 2023).

ГАЖ-ды машиналық оқыту, жасанды интеллект (AI), үлкен деректер (Big Data) және Заттар интернеті (IoT) сияқты басқа технологиялармен интеграциялау нақты уақыт режимінде өзгермелі жағдайларға бейімделе алатын “ақылды» көлік жүйелерін құрудың жаңа мүмкіндіктерін ашады (Karunakaran et al., 2025). Бұл әсіресе ірі қалалар үшін өзекті, себебі көлік ағындарын оңтайландыру халықтың өмір сүру сапасына, экологиялық қауіпсіздікке және қалалық инфрақұрылымның экономикалық тиімділігіне айтарлықтай әсер ете алады (Mirovic et al., 2024). Мұндай шешімдер Сингапур, Сеул және Лондон сияқты «ақылды қалаларда» кеңінен қолданылады, мұнда интеллектуалды көлік платформалары бейнекамералардан, Bei Dou ғаламдық (жерсеріктік) навигация жүйесінен және түрлі сенсорлардан алынған деректерді талдап, бағдаршамдардың жұмысын реттейді және көлік ағындарын қайта бөледі.

Зерттеудің өзектілігі ГАЖ, көліктер интернеті (Internet of Vehicles, IoV), көлік құралдарын автоматты басқару жүйелері (автопилот) және жасанды интеллект элементтерін (Wolniak & Stecuła, 2024) біріктіретін қалалық көлік жүйесін талдау мен басқарудың кешенді алгоритмін әзірлеу қажеттілігімен анықталады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Цифрландыру жағдайында қалалық көлік жүйесі жол инфрақұрылымы мен көлік құралдары есептеу және ақпараттық компоненттермен тығыз өзара байланысқан бірыңғай жүйе ретінде қарастыруға болады. Бұл жүйеде физикалық нысандар (жолдар, көліктер, инфрақұрылым) цифрлық элементтермен (датчиктер, басқару алгоритмдері, талдау платформалары) интеграцияланады. Мұндай өзара байланыс дәстүрлі қозғалысты басқарудан смарт-технологиялар негізіндегі интеллектуалды көлік басқаруына көшуге мүмкіндік береді (Куценко & Устюжанинова, 2024).

(Qin, 2023) авторы көлік техникасын басқару жүйесінде AI, IoV және ГАЖ технологияларын біріктірудің маңыздылығын атап өтеді. Бұл технологиялар көлік құралдарының қозғалысы, жол желісінің жай-күйі және сыртқы факторлар туралы деректерді жинауға, талдауға және түсіндіруге мүмкіндік береді, осылайша интеллектуалды көлік басқару ортасын қалыптастырады.

Зерттеудің әдіснамалық негізі көлік жүйесін өзара байланысқан ақпараттық және деректер ағындары арқылы біріктірілген біртұтас құрылым ретінде қарастыруға мүмкіндік беретін жүйелік тәсілге негізделген. Әдіснаманың негізгі элементтері мыналарды қамтиды:

- көлік трафигі туралы кеңістіктік-уақыттық деректерді талдау, ол үшін Яндекс.Пробки онлайн-сервисі пайдаланылады. Бұл қызмет қозғалыс тығыздығы, көлік ағындарының жылдамдығы және жолдағы оқиғалар туралы деректерді нақты уақытта жинап, бейнелеуге мүмкіндік береді;
- көлік жүйесін деңгейлер бойынша құрылымдау: бағыттарды модельдеу үшін 2GIS қосымшасы, көлік құралдары мен инфрақұрылым арасындағы өзара әрекетті қамтамасыз ететін IoV желісі, навигация, AI және басқару механизмдері;
- адаптивті бағдарлау алгоритмі, ол сыртқы және ішкі ГАЖ деректерін пайдалана отырып, қалалық ортадағы нақты жағдайларды, жол жүктемесін және шектеулерді ескере отырып қозғалысты модельдеуге мүмкіндік береді;
- координаттарды тексеру және бағдарды модельдеу үшін 2GIS қосымшасын қолданып тәжірибе жүргізіледі.

Сонымен қатар, ГАЖ сыртқы және ішкі болып бөлінеді.

Сыртқы ГАЖ қалалық жол желісінің сандық картографиясын, көлік ағындарының тығыздығы мен бағыттары туралы деректерді, жолдағы жағдайлар, жөндеу жұмыстары және ауа райы туралы ақпаратты қамтиды. Мұндай деректер сыртқы платформалар мен онлайн-сервистер (мысалы, Яндекс.Пробки) арқылы нақты уақытта жиналып, жаңартылып отырады. (Li & Kunyou, 2024) еңбегінде көрсетілгендей, сыртқы ГАЖ пайдалану жолдардағы нақты жағдайды бейнелеуге ғана емес, сонымен қатар трафикті талдау және оның алдын ала болжамы негізінде кептеліс ықтималдығын азайтуға мүмкіндік береді.

Қалалық ортаның инженерлік-геологиялық жағдайларын талдау да сыртқы ГАЖ құрамындағы маңызды аспектілердің бірі болып табылады. Өйткені ол бағыттарды жоспарлау және көлік жүктемесін бағалау кезінде экологиялық факторларды ескеруге мүмкіндік береді. (Apshikur et al., 2024) зерттеуінде ауаның ластану деңгейі мен зиянды заттардың таралу картограммасына негізделген аумақтарды аймақтарға бөлу әдістемесі ұсынылады. Бұл тәсіл әсіресе Өскемен сияқты өнеркәсіптік қалаларда көлік ағындарын оңтайландыру кезінде экологиялық тәуекелдерді ескеруге мүмкіндік береді. Қалалық ортаның экологиялық жағдайы туралы деректерді интеграциялау тек кептелістердің алдын алуға ғана емес, сонымен қатар көліктің қоршаған ортаға тигізетін теріс әсерін азайтуға мүмкіндік береді.

Ішкі ГАЖ көлік құралының навигациялық жүйесінің бағдарламалық және аппараттық бөлігі болып табылады. Ол сандық карталарды, навигациялық деректер базасын, GPS-модульдерді, камераларды, лидарларды, өлшеу құралдарын, сондай-ақ бұлтты сервистермен байланыс интерфейстерін қамтиды. (Liu, Zhang & Yang, 2022) зерттеуіне сәйкес, ішкі ГАЖ деректерін сыртқы дереккөздермен біріктіру көлік құралының орналасуын анықтау дәлдігін арттырып, тығыз қалалық жағдайларда навигациялық шешімдердің сапасын жақсартады.

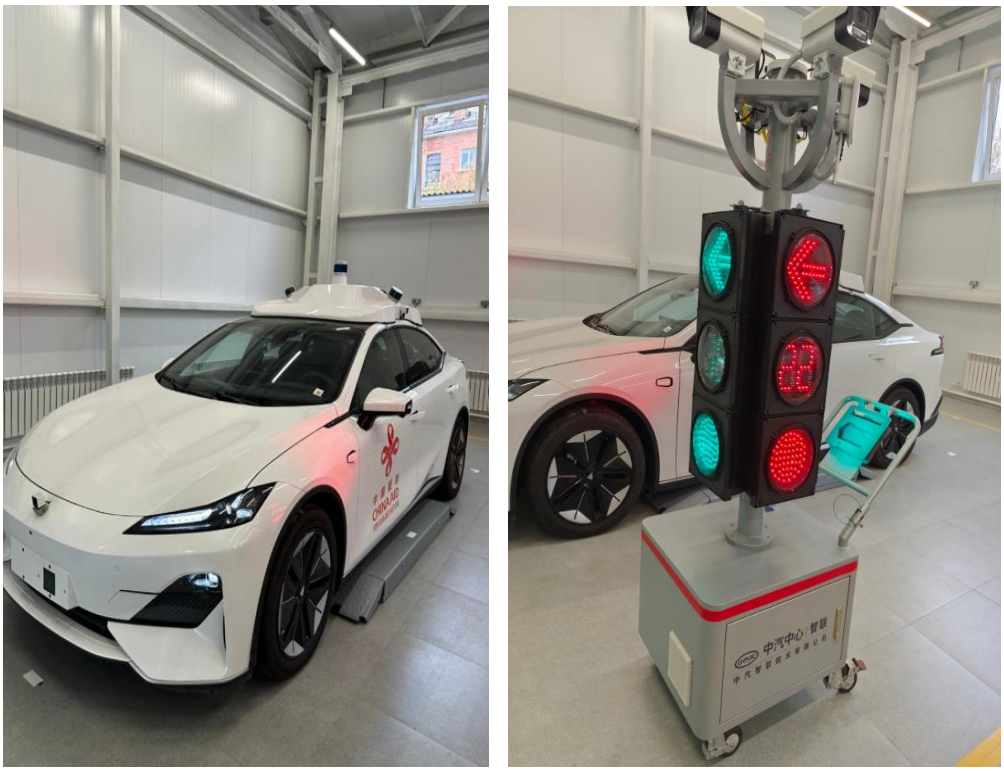
Сондай-ақ, IoV (Internet of Vehicles) технологиясы «ақылды қала» (жол желісі) мен интеллектуалды көлік құралы арасындағы байланыстырушы буын болып табылады. IoV көмегімен көліктер мен сандық инфрақұрылым өзара әрекеттесетін таратылған желі қалыптасады.

V2V (vehicle-to-vehicle), V2I (vehicle-to-infrastructure) және V2X (vehicle-to-everything) технологиялары ақпарат алмасуды қамтамасыз етеді, атап айтқанда: апаттық сигналдар, жол жағдайының өзгеруі, жаяу жүргіншілер мен велосипедшілер туралы мәліметтер.

Негізгі өзара әрекеттесу технологиялары мыналарды қамтиды:

- V2V (vehicle-to-vehicle) – көлік құралдары арасында жылдамдық, қозғалыс бағыты және кедергілер туралы деректермен алмасу;
- V2I (vehicle-to-infrastructure) – жол инфрақұрылымының элементтерімен (бағдаршамдар, камералар, датчиктер) байланыс;
- V2X (vehicle-to-everything) – қозғалысқа қатысушылардың барлығын кешенді түрде біріктіру;
- IoV технологиясы «ақылды трафик» жүйесін қалыптастыруға және жол-көлік оқиғаларының ықтималдығын азайтуға ықпал етеді.

Интеллектуалды автокөліктердің өзара әрекеттесу сипатын зерттеу үшін «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ базасында Лу Бань шеберханасы ашылған (https://ektu.kz/departments/sc_mecheng/about_dep/lubanworkshop.aspx?lang=kz/дата обращения: 02.10.2025). Мұнда интернетке қосылған басқару желілері бар және 3-деңгейлі автопилоттау жүйесінің тәжірибелік жабдығымен жабдықталған CHANGAN DEEPAL SL03 маркалы автокөліктер (1-сурет) орналасқан.



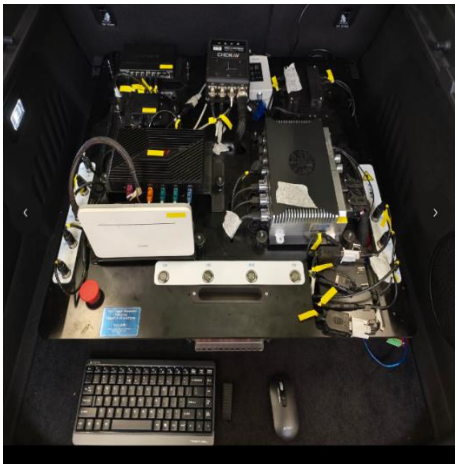
1-сурет. Интеллектуалды көлік құралдары мен жол қозғалысын реттеу жабдығы
Ескерту – автор (Муздыбаев, 2025) негізінде құрастырған

Бұл үлгіде жасанды интеллект (AI) элементтері бар автопилот нейрондық желілер мен машиналық оқыту алгоритмдері негізінде жүзеге асырылатын автоматтандырылған жүргізудің өзегі болып табылады.

Автопилот модульдері сыртқы және ішкі ГАЖ-дан, сенсорлардан, бейнекамералардан, лидардан, радардан және борттық жүйелерден алынған үлкен деректер жиынтығын талдайды (2-сурет).

Талдау нәтижелері негізінде қозғалыс траекториясын таңдау, жылдамдықты реттеу және жол қиылыстарында немесе басқа да учаскелерде қозғалыс сипатын түзету жүзеге асырылады (Li & Kunyou, 2024).

а



б

2-сурет. CHANGAN DEEPAL SL03 көлігінің борттық есептеу блогы және сенсорлық жүйелерін қосу: а – интеллектуалды көлік құралындағы автопилоттау жүйесінің сыртқы көрінісі; б – автопилоттау жүйесіндегі техникалық құрылғылар кешені
Ескерту – автор (Муздыбаев, 2025) негізінде құрастырған

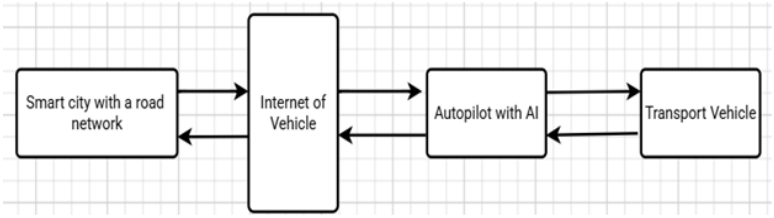
Сандық инфрақұрылымды және аппараттық қамтуды дамытуға қоса, көлік құралдарын басқару жүйесіне интеллектуалды жүйелерді енгізу қажет. Атап айтқанда, автопилот жүйесіне көліктің тежеу жүйесін, рульдік басқару механизмдерін және басқа да техникалық жүйелерін басқаруға рұқсат беру керек. Бұған рульдік басқару жүйесі (электр күшейткіштер, бұрылу бұрышының сенсорлары), тежеу жүйесі (электронды тежеу басқаруы), сондай-ақ қозғалтқышты автоматтандырылған басқару жүйелері (электронды басқару блоктары, ECU) жатады. Бұл компоненттер автомобильдің аппараттық бөлігі мен жасанды интеллект алгоритмдері арасындағы өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді. Нәтижесінде басқарудың жабық контуры қалыптасады, мұнда шешімдер жүргізушінің қатысуынсыз қабылданып, іске асырылады.

Осылайша, аталған компоненттердің барлығын бірыңғай интеллектуалды платформаға біріктіру тұрақты, бейімделгіш және қауіпсіз көлік жүйесінің негізін қалайды. Мұндай жүйе қалалық тығыз құрылыс жағдайында, көлік жүктемесінің өзгеруі мен қозғалыс режимдерінің динамикалық ауысуына бейімделе отырып жұмыс істей алады.

Сондықтан интеллектуалды көлік құралдары, бағдарламалық қамтамасыз ету және «ақылды қала» элементтерін қамтитын көлік жүйесі компоненттерінің өзара әрекеттесу моделін іске асыру үшін көлік жүйесін талдау және басқару алгоритмі ұсынылады (3-сурет).

Ұсынылған қалалық қозғалысты талдау және басқару алгоритмінен көрініп тұрғандай, қалалық жол инфрақұрылымы мен трафиктің ағымдағы жағдайы туралы деректерді нақты уақыт режимінде жинау және талдау сыртқы ГАЖ және ақпараттық платформалар (мысалы, Яндекс.Пробки) негізінде жүзеге асырылады. Бұл платформалар қозғалыс тығыздығы, жолдағы оқиғалар, ауа райы жағдайы, тәулік уақыты, көлік ағындарының ағымдағы жылдамдығы және кептеліс деңгейі туралы өзекті ақпарат алуға мүмкіндік береді.

Аталған деректер ақпараттық-талдау платформасына түседі, мұнда кеңістіктік-уақыттық талдау жүргізіліп, жол жағдайының дамуын болжау жүзеге асырылады. Көлік жүйесіне кіріктірілген интеллектуалды алгоритмдер тек ағымдағы жағдайды тіркеп қана қоймай, сонымен қатар трафик параметрлерінің қысқа және орта мерзімді өзгерістерін болжауға мүмкіндік береді.



3-сурет. Интеллектуалдық қалалық көлік жүйесі компоненттерінің өзара әрекеттесуінің блок-схемасы
Ескерту – автор (Абеджанова, 2025) негізінде құрастырған

Көлік құралының ағымдағы координаттарын анықтау Bei Dou ғаламдық (спутниктік) позициялау технологиялары (4-сурет), сондай-ақ көлік құралындағы камералар мен лидарлар сияқты борттық сенсорлар арқылы жүзеге асырылуы мүмкін.

4-сурет. CHANGAN DEEPAL SL03 көлігінде сенсорлық жабдықтар мен спутниктік байланыс құрылғыларының орналасуы
Ескерту – автор (Муздыбаев, 2025) негізінде құрастырған

Координаттардың дәлдігін арттыру бейнекамералар мен сандық карталардан алынған деректер негізінде танылатын қосымша визуалды бағдарлар — жол белгілері, маңдайшалар, ғимарат атаулары мен қиылыстарды пайдалану арқылы жүзеге асырылады. Мұндай тәсіл спутниктік сигнал әлсірейтін немесе шағылатын тығыз құрылысты аймақтар мен тоннельдер жағдайында навигация жүйесінің тұрақтылығын арттырады.

Баламалы бағыттарды құру бірнеше нұсқаны қарастыратын алгоритм арқылы орындалады. Мұнда негізгі критерийлер ретінде жол жүру уақытының аздығы, ең қысқа қашықтық, бағыттың жүктелу деңгейі, бағдаршамдар мен қиылыстар саны, жөндеу учаскелерінің және жол-көлік оқиғаларының болуы, сондай-ақ экологиялық көрсеткіштер (мысалы, ауаның ластануы жоғары аймақтар арқылы қозғалыс) ескеріледі. Көпфакторлы талдау барысында әр критерийге салмақтық коэффициент берілетін салмақталған оңтайландыру моделі қолданылады. Мысалы, қызметтік көлік (жедел жәрдем, қоқыс тасушы, қоғамдық көлік) үшін басты критерий – жеткізу уақыты, ал коммуналдық қызметтер үшін – шығарындылар мен жүріс қашықтығын азайту.

AI бар автопилот жүйесі берілген параметрлерге (жылдамдық, кептелістер, бағдаршамдар) сәйкес бағыттарды бағалап, ең тиімді бағытты таңдайды. AI-модуль трафик, ауа райы және жол жағдайлары туралы деректер негізінде оқытылған нейрондық

желілер мен машиналық оқыту әдістерін қолданады. Кіріс деректерді талдау негізінде бағыт нақты уақытта бейімделеді – мысалы, жол-көлік оқиғасы орын алған жағдайда немесе бағдаршам режимі өзгерген кезде.

Бағыт таңдалғаннан кейін жүйе көлік құралының атқарушы механизмдеріне берілетін командаларды қалыптастырады:

– рульдік басқару (электр күшейткіштер, сервожетектер);

– тежеу жүйесі (EBS, ABS, ESP);

– қозғалтқыштың электронды басқару жүйесі (ECU).

Осылайша, алгоритм көлік құралының барлық әрекеті деректерді талдау негізінде жүзеге асырылатын және сыртқы жағдайларға бейімделетін жабық басқару контурын қамтамасыз етеді.

Эксперименттік зерттеулер және нәтижелерді талдау.

Осы зерттеуде эксперимент жүргізу үшін 2GIS бағдарламалық өнімі қолданылды.

Негізгі артықшылықтары:

- қала (аймақ немесе аудан) бойынша егжей-тегжейлі сандық картаның болуы — мысалы, Шығыс Қазақстан облысы, Өскемен қаласы;

- жол шектеулері, біржақты қозғалыс және бағдаршам нысандарын ескере отырып, қадамдық навигация мен бағыт құру тетігінің болуы;

- нақты уақыт режимінде координаттық деректерді алу және желі тораптары арасындағы қашықтықтарды талдау мүмкіндігі;

- Яндекс.Пробки қосымшасы арқылы сыртқы дереккөздермен интеграция (ішінара кептеліс және қоғамдық көлік аялдамалары туралы мәліметтер).

Эксперименттік модельдеу үшін Өскемен қаласындағы нақты бағыт таңдалды. Эксперименттің мақсаты — навигация дәлдігін, координаттарды анықтау дұрыстығын және қалалық ортада көлік ағыны өзгерген жағдайда бағытттың тұрақтылығын бағалау.

Бастапқы нүкте – Амбулаториялық орталық (Абай даңғылы, 18), соңғы нүкте – Шығыс Қазақстан облыстық ауруханасы, Стационар (Протозанов көшесі, 7).

Бұл бағыт әлеуметтік маңызға ие, себебі ол Жедел медициналық жәрдем станциясы мен Облыстық аурухана арасындағы көлік байланысын қамтамасыз етеді. Бағыт шұғыл медициналық көліктер үшін тән және мұнда ең аз қозғалыс уақыты, бағыт сенімділігі мен кептеліс аймақтарын айналып өту мүмкіндігі маңызды.

2GIS бағдарламасы маршруттарды құру және бақылау нүктелерінде координат-тарды тіркеу үшін пайдаланылды. Бағыт қаланың негізгі көлік бағыттарын қамтиды және навигация жүйесінің орта және жоғары жүктеме жағдайларындағы жұмысын бағалауға мүмкіндік береді. Талдау үшін ұзындығы, бағыты және жүктелу деңгейі бойынша ерекшеленетін төрт бағыт құрылды. 5-суретте 2GIS жүйесінде салынған зерттелген бағыттардың сұлбалары көрсетілген.

Бірнеше маршруттарды таңдау салыстырмалы талдау жүргізуге, қозғалыстың оңтайлы бағыттарын анықтауға және қалалық ортаның әртүрлі жағдайларында навигациялық жүйенің жұмысын бағалауға мүмкіндік берді. Бағыттар Өскемен қаласының негізгі көлік артериялары-Абай, Шәкәрім даңғылдары, Қазақстан, Протозанов, Нұрмағамбетов көшелері және Үлбі өзені арқылы өтетін көпір арқылы өтті. Эксперимент жан-жақты нәтижелерге қол жеткізу үшін әртүрлі трафиктері бар учаскелерді қамтыды.

Модельдеу нәтижелері бойынша ең қысқа және тікелей болып Шәкәрім даңғылы арқылы өтетін №1 бағыт анықталды, алайда оның өткізу қабілеті таңғы және кешкі қар-балас уақытта шектеледі, себебі қала орталығында көлік тығыздығының артуы байқалады.

№ 2 бағыт, Ульба көпірі арқылы өтетін бағыт, ұзындығы жағынан үлкен болғанымен, қаланың орталық бөлігіндегі уақытша жабылулар кезінде неғұрлым тұрақты бола алады. Дегенмен, көпір бөлігі қозғалыс қарқыны жоғары кезеңдерде жиі кептелістерге ұшырайды.

1-бағыт

2 -бағыт

3-бағыт

4 -бағыт

5-сурет. Бағыттарды 2GIS көмегімен құру

Ескерту – автор (Абеджанова, 2025) негізінде құрастырған

№ 3 бағыт теңгерімді сипатқа ие: орташа жүктеме кезінде орталық бөліктерді айналып өтуге мүмкіндік береді және жол уақытының қолайлы ұзақтығын сақтайды.

№ 4 бағыт жол жөндеу немесе төтенше жағдайлар кезінде балама айналма жол ретінде қолданылады, бірақ қозғалыс уақыты ұзарады (2-кесте).

2-кесте. Бағыттар туралы мәлеметтер

Бағыттың №	Бағыт	Арақашықтық	Уақыт	Ескертпе
1	Абай д., 18 → Шакарим д. → Протозанов к., 7	~2 км	5 мин	Қала орталығы арқылы тікелей бағыт. Қарбалас уақытта кідірістер болуы мүмкін.
2	Абай д., 18 → Үлбі өзені арқылы өтетін көпір → Протозанов к., 7	~3 км	9 мин	Таңертеңгі және кешкі уақытта көпір арқылы жүру кезінде жүктемелі болуы мүмкін.
3	Абай д., 18 → Шакарим д.→ Казахстан к. → ул. Протозанов к., 7	~2,5 км	7 мин	Бағыт Қазақстан көшесі арқылы өтеді. Ірі даңғылдармен қиылысатын жерлерде кептелістер болуы мүмкін.
4	Абай д., 18 → Үлбі өзені арқылы өтетін көпір → Нурмагамбетов к. → Казахстан к. → Протозанов к., 7	~4,0 км	12 мин	Бірнеше көше арқылы өтетін ұзағырақ бағыт. Ол қаланың ортасын айналып өту кезінде пайдалы болуы мүмкін.
Ескерту – автор (Абеджанова, 2025) негізінде құрастырған				

Осылайша, «уақыт–қашықтық–жүктелу» критерийлері бойынша бағыттарды салыстыру AI жүйесіне және навигациялық алгоритмдерге жол жағдайларына байланысты траекторияны динамикалық түрде бейімдеуге мүмкіндік береді.

Координаттар деректері GPS жүйесі мен 2GIS интерфейсіне біріктірілген визуалды бағдарлар арқылы тіркелді. Қозғалыс уақыты шамамен көрсетілген және ағымдағы жол жағдайына байланысты өзгеруі мүмкін.

2GIS бағдарламасы қазіргі нұсқасында бағыттарды модельдеуге және координаттарды жазуға ыңғайлы, алайда оны көлікті интеллектуалды басқару жүйесіне толық енгізу үшін келесі жетілдірулер қажет:

- көлік құралымен IoV және автопилот жүйелері арқылы біріктіру;
- жол қозғалысы туралы нақты уақыттағы деректерді көрсету;
- бағыттарды талдау және қозғалыс уақытын AI негізінде болжау;
- кеңейтілген шындық (AR) элементтері бар жол оқиғаларын визуализациялау;
- API мүмкіндіктерін кеңейту (бағыт нүктелері, уақытша кідірістер, бағдаршамдар және жол қозғалысының ерекшеліктері туралы деректерге терең қолжетімділік), бұл көлікті басқару командаларын беру үшін нейрожелілік алгоритмдер мен қаланың сандық егіздерімен интеграциялауға жағдай жасайды.

Алынған координаттар қаланың көлік желісінің сандық егізін құру кезінде нейрондық желілерді оқытуға және күрделі қалалық жоспарлау жағдайларында навигациялық жүйелердің тұрақтылығын бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін. Осылайша, эксперимент 2GIS бағдарламасының модельдеу және навигация құралы ретінде қолдануға жарамдылығын дәлелдеді және оны интеллектуалды көлік басқару міндеттеріне бейімдеу бағыттарын анықтады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Өскемен қаласының қалалық көлік жүйесі бағыттарында жүргізілген модельдеу мен эксперименттік сынақ нәтижесінде сыртқы және ішкі геоақпараттық жүйелердің (ГАЖ) интеграциясы көлік құралдарының орналасуын анықтаудың дәлдігін айтарлықтай арттыратыны анықталды. Алынған деректерге сәйкес, тек GPS жүйесін қолдану кезінде координаталарды анықтау қателігінің орташа мәні 12,4 метрді құрады, ал 2GIS платформасын пайдалану кезінде бұл көрсеткіш 10,1 метрге дейін төмендеді. Бұл кеңістіктік ақпаратты өңдеудің кешенді тәсілінің артықшылығын дәлелдейді. 3-кестеде позициялау қателігінің орташа мәндері келтірілген.

3-кесте. Деректер көзіне байланысты позициялау қателіктері

Деректер көзі	Орташа қате (м)
GPS	12.4
2GIS	10.1
Ескерту – автор (Абеджанова, 2025) негізінде құрастырған	

Бұл талдау 2GIS жүйесінің болжам дәлдігі критерийі бойынша артықшылығын көрсетеді. Бағыттар бойынша салыстырмалы талдау жүргізілді – қашықтық пен қозғалыс уақыты көрсеткіштері, сондай-ақ жолдағы кептелістер ескерілді.

6-суреттегі графикті талдау көрсеткендей, ең тиімді бағыт әрдайым ең қысқа бағытқа, әсіресе жол қозғалысы жағдайы үнемі өзгеріп отыратын кезде сәйкес келмейді. Машиналық оқыту алгоритмдерін енгізу және жолдағы ағымдағы жағдайлар (мысалы, кептелістер, жол жөндеу жұмыстары) туралы деректерді пайдалану жүйеге бағыттарды бейімдеп түзетуге, яғни қозғалыс уақытының азаюына мүмкіндік береді.

6-сурет. Бағыттардың уақытын әртүрлі критерийлер бойынша салыстыру
Ескерту – автор (Абеджанова, 2025) негізінде құрастырған

Эксперименттік нәтижелер көрсеткендей, интеллектуалды жүйе арқылы құрылған балама бағыттарды қолдану 18-23 %-ға дейінгі кешігулерді азайтады. Бұл дамыған көлік инфрақұрылымы бар мегаполистерде жүргізілген ұқсас зерттеу нәтижелерімен сәйкес келеді. Internet of Vehicles (IoV) технологиялары мен интеллектуалды басқару алгоритмдерін біріктіру көлік құралдары мен қалалық инфрақұрылым арасындағы тұрақты өзара әрекеттесуді қамтамасыз етіп, бейімделгіш көлік желісін қалыптастырады. Зерттеу барысында сыртқы сервистерден (мысалы, Yandex.Пробки) және көліктің ішкі сенсорларынан алынған деректерді біріктіру жолдағы жағдайдың өзгеруіне жедел әрекет етуге, көлік жүйесінің қауіпсіздігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні анықталды.

Жүргізілген салыстырмалы талдау 2GIS жүйесінің сыртқы деректер көздерімен біріктірілген нұсқасы тек Bei Dou навигациясын қолдануға қарағанда бағыттарды есептеу дәлдігі мен жылдамдығы бойынша артық екенін көрсетті. Алайда интеллектуалды көлік жүйелеріне толық интеграциялау үшін бағдарламалық интерфейстерді жетілдіру және автопилоттық пен IoV-технологияларымен өзара әрекеттесу мүмкіндіктерін кеңейту қажет.

ҚОРЫТЫНДЫ

Смарт-технологиялар мен ГАЖ әдістерін біріктіру Өскемен қаласының көлік желісінің жүктелу деңгейін шынайы бағалауға және көлік жүйесінің құрамдас бөліктерінің өзара әрекеттесу моделін әзірлеуге мүмкіндік берді.

Құрылған модель желінің әлсіз тұстарын анықтауға, трафиктің дамуын болжауға және әртүрлі жол-көлік жағдайларында қозғалысты жоспарлау кезінде негізделген шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді. Әзірленген көлік жүйесінің құрамдас бөліктерінің өзара әрекеттесу моделі басқа қалаларға да бейімделіп, масштабталуы мүмкін, бұл ұсынылған тәсілдің әмбебаптылығы мен қайта қолдануға жарамдылығын дәлелдейді. Интеллектуалды көлік жүйелерін одан әрі дамыту үшін навигациялық платформаларды IoV және автопилоттық жүйелермен біріктіру, API мүмкіндіктерін кеңейту, сондай-ақ көлік ағындарын болжау мен басқаруға арналған машиналық оқыту алгоритмдерін енгізу қажет.

Зерттеу нәтижелері қалалық мобильділікті оңтайландыру, көлік инфрақұрылымының қауіпсіздігі мен тұрақтылығын арттыру және көлік ағындарының қоршаған ортаға тигізетін теріс әсерін азайту тұрғысынан практикалық маңызға ие.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Ғылыми мақалалардың авторлары өз еңбектерін дайындау барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын қолданбады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Abedzhanova, A.S., Dzhaxylykov, A.F., Rasskazov, P.A., Apshikur, B. & Islyam, G. (2023). Automated system for optimizing the movement of urban passenger transport using GIS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. 2023, 48(5/W2-2023). P. 1–8. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-1-2023.

Apshikur, B., Maksimov, V.A., Toleubekyzy, I.T. & Alimkulov, M.M. (2024). Current assessment of atmospheric pollution by industrial enterprises in Ust-Kamenogorsk based on GIS technologies. InterCarto. InterGIS. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2024. V. 30. Part 2. P. 469–481. https://doi.org/10.35595/2414-9179-2024-2-30-469-481.

Karunakaran, L., Rathnayaka, R., Seneviratna, D. & Kithulwatta, W.M.C.J.T. (2025). Artificial Intelligence in Smart Cities and Urban Mobility: A Systematic Literature Review. 4. 10. URL: https://ir.kdu.ac.lk/handle/345/8912.

Li, W. & Kunyou, P. (2024). Quantitative analysis and model prediction of urban traffic flow optimization by geographic information technology. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. 2024. V. 9. https://doi.org/10.2478/amns-2024-3265.

Liu, J., Zhang, T. & Yang, X. (2022). High-precision vehicle positioning by fusion of GPS and IMU in complex urban environments. Sensors, 2022, 22(1), 55. https://doi.org/10.3390/s22010055

Mirovic, V., Mitrović Simić, J., Milicic, M. & Ruskic, N. (2024). Smart Mobility in Smart Cities. Jtttp - journal of traffic and transport theory and practice. https://doi.org/10.7251/JTTTP2402083M.

Pali, P.,Verma, S., Patel, A., Pathak, V. & Soni, V. (2023). Intelligent Urban Transportation Systems (Iuts): A Survey of AI-Driven Innovations and Future Directions. International Journal of Innovative Research in Science,Engineering and Technology. 12. 8068-8073. https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2023.1205498.

Qin, X. (2023). Research on Big Data-Driven Urban Traffic Flow Prediction Based on Deep Learning. IJITSA. 2023. V.16. P. 1–20. https://doi.org/ 10.4018/IJITSA.323455.

Radovic Markovic, M., Vukovic, N. & Mityagin, S. (2021). ICT and Smart Cities: Case Studies of Moscow and Saint-Petersburg. IPSI BgD Transactions on Internet Research. 2021.V. 17. P. 10-14. URL: https://ipsitransactions.org/journals/papers/tir/2021jan/p3.pdf.

Sukhoruchkina, I.N. & Sukhoruchkina, A.A. (2023). Artificial intelligence and information technology support for smart city projects in Russia. Scientific and technical information. Series 1: Organization and methodology of information work. 2023, P. 21-27. https://doi.org/10.36535/0548-0019-2023-10-4.

Tarissa, D. (2023). Comparison of Smart City Program in Indonesia and China Study Case: Jakarta and Beijing. Journal of Infrastructure Policy and Management. 2023, 6. 77-88. https://doi.org/10.35166/jipm.6.2.77-88.

Wolniak, R. & Stecuła, K. (2024). Artificial Intelligence in Smart Cities—Applications, Barriers, and Future Directions: A Review. Smart Cities 2024, 7(3), 1346-1389; https://doi.org/10.3390/smartcities7030057.

Yamamura, S., Fan, L. & Suzuki Y. (2017). Assessment of Urban Energy Performance through Integration of BIM and GIS for Smart City Planning. Procedia Engineering. 2017, 180, P.1462-1472. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.309.

«Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ. Лу Бань шеберханасы. URL: https://ektu.kz/departments/sc_mecheng/about_dep/lubanworkshop.aspx?lang=kz/ (дата обращения: 02.10.2025). // «D. Serıkbaev atyndağy Şyğys Qazaqstan tehnikalyq universitetı» KEAQ. Lu Bän şeberhanasy [D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University NJSC. Lu Ban Workshop]. URL: https://ektu.kz/departments/sc_mecheng/about_dep/lubanworkshop.aspx?lang=kz/ (data obrashcheniya: 02.10.2025). (In Kaz.)

Куценко С.М., Устюжанинова Д.С. Использование искусственного интеллекта и машинного обучения в транспортных системах // Экономика и предпринимательство. 2024. С. 1360–1362. URL: https://doi.org/10.34925/EIP.2024.164.3.265/ (дата обращения: 04.09.2025). // Kutsenko S.M., Ustyuzhaninova D.S. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta i mashinnogo obucheniya v transportnykh sistemakh [The use of artificial intelligence and machine learning in transport systems] // Ekonomika i predprinimatel'stvo [Economics and Entrepreneurship]. 2024. P. 1360–1362. URL: https://doi.org/10.34925/EIP.2024.164.3.265/ (data obrashcheniya: 04.09.2025). (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Муздыбаев Мурат Сеитович – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Муздыбаев Мурат Сеитович – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Muzdybayev Murat Seitovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: MMuzdybaev@ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1787-0921

Абеджанова Арай Сайлаубеккызы – докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Абеджанова Арай Сайлаубеккызы – докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Abejanova Aray Saylaubekkyzy – Phd student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: Aabedzhanova@ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9435-7217

Petr Bouchner – Ph.D., Прагадағы Чехия техникалық университеті, Прага қаласы, Чехия
Petr Bouchner – Ph.D., Чешский технический университет в Праге, г.Прага, Чешская Республика
Petr Bouchner – Ph.D., Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic,
e-mail: petr.bouchner@cvut.cz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8308-1656

Муздыбаева Альфия Сеиткызы – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Муздыбаева Альфия Сеиткызы – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Muzdybaeva Alfia Seytkyzy – Candidate of Technical Sciences, Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: AMuzdybaeva@ektu.kz ,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6949-9108

Мырзабекова Динара Мырзабекқызы – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Мырзабекова Динара Мырзабекқызы – доктор PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Myrzabekova Dinara Myrzabekkyzy – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: DMyrzabekova@ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4493-6102

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_10
ХҒТАР 55.21.99

ХИРУРГИЯЛЫҚ АСПАПТАРҒА АРНАЛҒАН 10Х17Н13М2 (AISI 316L АНАЛОГЫ) ТОТ БАСПАЙТЫН БОЛАТТЫҢ БЕТКІ ҚАБАТЫНЫҢ САПАСЫНА СЫМДЫ ЭЛЕКТРЭРРОЗИЯЛЫҚ ӨҢДЕУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 10Х17Н13М2 (АНАЛОГ AISI 316L) ДЛЯ ХИРУРГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА

INFLUENCE OF WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PARAMETERS ON THE SURFACE LAYER QUALITY OF 10KH17N13M2 (AISI 316L ANALOG) STAINLESS STEEL FOR SURGICAL INSTRUMENTS

Ж.М. Мұхаметбек [1], Б.Н. Азаматов [1], Д.И. Қалиев [1], К.К. Комбаев [1*], К.Е. Апбазов [1]
[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
*Жауапты автор: Комбаев Куат Курганович, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:
сымды электрэррозиялық өңдеу, 10Х17Н13М2 болаты, сүйек ұстағыш, микроқұрылым, микроқаттылық, беттің кедір-бұдырлығы, ақ қабат, энергия-дисперсиялық талдау.

ТҮЙІНДЕМЕ

Зерттеудің өзектілігі сүйек тіндерімен жанасатын хирургиялық аспаптардың пайдалану сенімділігі мен биологиялық қауіпсіздігін арттыру қажеттілігімен негізделген. Коррозияға төзімді болаттарды өңдеудің дәстүрлі әдістері көбінесе беткі қабаттың сапасын төмендетеді, бұл электрофизикалық әдістерді қолдануды өзекті етеді. Жұмыстың мақсаты — сымды электрэррозиялық өңдеудің энергетикалық параметрлері мен 10Х17Н13М2 (AISI 316L аналогы) аустенитті болатының беткі қабатының сапасы арасындағы өзара байланысты орнату.

Зерттеу барысында растрлық электрондық микроскопия, энергия-дисперсиялық микроталдау, Виккерс бойынша микроқаттылықты өлшеу және беттің кедір-бұдырлығын бағалау әдістері қолданылды. Жұмыс нәтижелері импульстік режимдердің өзгеруі беттің құрылымдық тұтастығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Төмен қарқынды режимдерде микрожарықшақтары бар және микроқаттылығы төмен (180–191 HV) ақаулы қабат қалыптасатыны анықталды. Оңтайландырылған режимді (ток 8 А) қолдану қабаттану белгілері жоқ біртекті модификацияланған қабат алуға, 198–204 HV деңгейіндегі тұрақты микроқаттылыққа және кедір-бұдырлықты (Ra 1,2–1,5 мкм дейін) төмендетуге мүмкіндік берді.

Ғылыми жаңалық «ақ қабаттың» термиялық фрагментациясын болдырмайтын қалыптасу жағдайларын анықтауда жатыр.

© 2026 **Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, К.К. Комбаев, К.Е. Апбазов**
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы (CC BY 4.0) бойынша таратылады.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Практикалық маңыздылығы сүйек ұстағыштарды дайындаудың аспаптардың жоғары коррозиялық төзімділігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ететін технологиялық регламенттерін негіздеуден тұрады. Болашақ зерттеулердің жолдары циклдік жүктеме кезінде аспаптардың шаршау беріктігіне электрэррозиялық өңдеудің әсерін зерттеумен байланысты.

Ключевые слова:
проволочная электроэрозионная обработка, сталь 10Х17Н13М2, костедержатель, микроструктура, микротвердость, шероховатость поверхности, белый слой, энергодисперсионный анализ

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эксплуатационной надежности и биологической безопасности хирургического инструментария, контактирующего с костными тканями. Традиционные методы механической обработки коррозионностойких сталей часто приводят к наклепу и снижению качества поверхности, что делает перспективным применение электрофизических методов. Целью работы является установление взаимосвязи между энергетическими параметрами проволочной электроэрозионной обработки и качеством поверхностного слоя аустенитной стали 10Х17Н13М2 (аналог AISI 316L).

В ходе исследования использованы методы растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного микроанализа, измерения микротвердости по Виккерсу и профилометрии для оценки параметров шероховатости. Результаты работы показали, что варьирование импульсных режимов критически влияет на структурную целостность поверхности. Установлено, что при низкоинтенсивных режимах формируется дефектный слой с микротрещинами и сниженной микротвердостью (180–191 HV). Применение оптимизированного режима (ток 8 А) позволило получить однородный модифицированный слой без признаков расслоения, со стабильной микротвердостью 198–204 HV и снижением шероховатости (Ra до 1,2–1,5 мкм). Научная новизна заключается в определении условий формирования «белого слоя», исключающих его термическую фрагментацию. Практическая значимость работы состоит в обосновании технологических регламентов изготовления сүйек ұстағыш (костедержателей), обеспечивающих высокую коррозионную стойкость и долговечность инструментов. Пути будущих исследований связаны с изучением влияния электроэрозионной обработки на усталостную прочность инструментов при циклическом нагружении.

keywords:
wire electrical discharge machining, 10Kh17N13M2 steel, bone holder, microstructure, microhardness, surface roughness, white layer, energy-dispersive X-ray spectroscopy.

ABSTRACT

The relevance of this study is driven by the necessity to enhance the operational reliability and biological safety of surgical instruments that come into contact with bone tissues. Traditional machining methods for corrosion-resistant steels often lead to work hardening and degraded surface quality, making the application of electrophysical processing methods highly promising. The objective of the work is to establish the correlation between the energy parameters of wire electrical discharge machining and the surface layer quality of 10Kh17N13M2 (AISI 316L analog) austenitic steel.

The research methods included scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, Vickers microhardness testing, and profilometry for surface roughness evaluation. The results indicated that varying the pulse regimes critically affects the structural integrity of the surface. It was established that low-intensity regimes form a defective layer characterized by microcracks and reduced microhardness (180–191 HV). The application of an optimized regime (8 A current) enabled the

formation of a homogeneous modified layer without signs of delamination, featuring a stable microhardness of 198–204 HV and a reduction in roughness (Ra to 1.2–1.5 μm). The scientific novelty lies indetermining the specific conditions for "white layer" formation that prevent its thermal fragmentation. The practical significance of the work consists in the justification of technological regulations for manufacturing bone holders, ensuring high corrosion resistance and durability of the instruments. Future research directions are associated with studying the impact of electrical discharge machining on the fatigue strength of instruments under cyclic loading conditions.

КІРІСПЕ

Жоғары технологиялық медицинаның қазіргі дамуы хирургиялық аспаптардың, әсіресе травматология мен ортопедия саласындағы бұйымдардың сапасы мен төзімділігіне қатаң талаптар қояды (Bruns et al., 2007). Остеосинтез — сынықтардан кейін сүйек фрагменттерінің тұтастығын хирургиялық жолмен қалпына келтіру операцияларының сәтті өтуін қамтамасыз ететін негізгі құралдардың бірі сүйек ұстағыш болып табылады (1-сурет). Оның функционалдық мақсатының ерекшелігі биологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін механикалық беріктіктің, коррозияға төзімділіктің және беткі қабаттың мінсіз сапасының ерекше үйлесімін талап етеді (Niinomi, 2008).

Бұл зерттеудің нысаны — 3D-моделі 1-суретте көрсетілген сүйек ұстағыш қысқышы. Мұндай бұйымдарды дайындау үшін материал ретінде 10Х17Н13М2 (AISI 316L аналогы) маркалы аустенитті коррозияға төзімді болатты қолдану стратегиялық тұрғыдан негізделген. Молибденмен легирленуінің арқасында бұл қорытпа хлоридті орталар мен биологиялық сұйықтықтарда питтингтік коррозияға жоғары төзімділік көрсетеді, бұл бірнеше мәрте стерилизациялау және тірі тіндермен ұзақ жанасу кезіндегі шешуші фактор болып табылады (Zhang et al., 2025). Дегенмен, аустенитті болаттарға тән жоғары пластикалық пен қатаюға (наклеп) бейімділік дәстүрлі жүзді өңдеу әдістерінің тиімділігін айтарлықтай шектейді, бұл өнімділіктің төмендеуіне және өндіріс құнының жоғарылауына әкеледі.

1-сурет. Электрэррозиялық кесу процесін дайындауға арналған 10Х17Н13М2 болатынан жасалған сүйек ұстағыштың геометриялық моделі

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Осыған байланысты, күрделі профильді аспаптарды өндіруде сымды электрэррозиялық кесу (Wire Electrical Discharge Machining – WEDM) технологиясын қолдану басымдыққа ие болуда. Бұл әдіс тікелей механикалық жанасусыз бөлшектерді жоғары дәлдікпен алуға мүмкіндік береді, бұл дайындаманың деформациялануын болдырмайды. Соған қарамастан, WEDM процесі күрделі жылу-физикалық құбылыстармен қатар

жүреді: разрядтардың жоғары температуралық әсері термиялық өзгерген «ақ қабаттың» қалыптасуына, сондай-ақ микрократерлер мен термиялық микрожарықшақтардың пайда болуына әкеледі. Аталған ақаулардың болуы аспаптың пайдалану қасиеттерін сақтау үшін өңдеу режимдерін мұқият негіздеуді талап етеді (Anil et al., 2023).

Wu et al. (2018) зерттеулері тот баспайтын болат бетінің морфологиясы мен нано-кедір-бұдырлығы бактериялардың алғашқы адгезиясына және микроколониялардың түзілуіне айтарлықтай әсер ететінін растайды. Кедір-бұдырлық параметрлерінің (Ra,Rz) артуы жанасудың нақты ауданының ұлғаюы және адгезия орталықтары рөлін атқаратын микро-кедір-бұдырлардың болуы есебінен микроорганизмдердің неғұрлым қарқынды бекуіне ықпал ететіні көрсетілген. Осыған байланысты аспаптың функционалдық сенімділігі беткі қабаттың күйімен тікелей анықталады. Кедір-бұдырлық параметрлері бұйымның пайдалану сипаттамаларын ғана емес, сонымен қатар микробтық контаминация қаупін және кейінгі дезинфекцияның тиімділігін де айқындайды. Өз кезегінде, Wegener et al. (2017) жұмыстары механикалық өңдеу кезінде беткі қабат сапасының қалыптасуы технологиялық әсер ету режимдерімен және өңдеу процесінің сипаттамаларымен, соның ішінде материалды алу параметрлерімен және микрорельефтің қалыптасу жағдайларымен анықталатынын көрсетеді. Микро-кедір-бұдырлар мен беткі ақаулардың бақылаусыз дамуы беттің тұтастығының нашарлауына және кедір-бұдырлықтың өсуіне әкеледі, бұл 10Х17Н13М2 болаты бетінің берілген параметрлерін қамтамасыз ету үшін технологиялық режимдерді дәл оңтайландыруды талап етеді. Қазіргі зерттеулердің нәтижелері электрэррозиялық өңдеу кезінде процесс өнімділігі мен қалыптасатын беттің сапасы арасындағы оңтайлы арақатынасты қамтамасыз ету көпфакторлы және сызықтық емес міндет екенін айғақтайды.

Но мен Newman (2003) және Chu et al. (2005) жұмыстарында айтарлықтай қалың-дықтағы (10 мм және одан жоғары) дайындамаларды өңдеу кезінде негізгі технологиялық параметрлер — ток күші (I), импульс ұзақтығы (Ton) және үзіліс ұзақтығы (Toff) – термиялық әсер ету аймағының қалыптасуына күрделі сызықтық емес әсер ететіні көрсетілген.

Бұл ретте разрядтың энергетикалық сипаттамаларының өзгеруі термиялық өзгерген қабат тереңдігінің айтарлықтай өзгеруіне әкеледі, бұл жылулық әсердің қарқындылығымен және материалдың жергілікті балқу және кристалдану жағдайларымен тікелей байланысты. Электрэррозиялық өңдеу кезінде процесс өнімділігі мен қалыптасатын беттің сапасы арасындағы оңтайлы арақатынасты қамтамасыз ету көпфакторлы және сызықтық емес міндет екені анықталды. Świercz бен Holubek (2020) және Huang et al. (2015) жұмыстарында бірлі-жарым электр разряды энергиясының артуы жергілікті балқу және материалдың кейінгі жылдам кристалдану процестерінің күшеюіне әкелетіні, бұл «ақ қабаттың» (*recast layer*) қалыптасуымен және оның қалыңдығының өсуімен қатар жүретіні көрсетілген. Энергетикалық әсердің артуы термиялық өзгерген беткі қабат қалыңдығының өсуін тудырады, бұл микроақаулардың дамуына және қалдық кернеулердің пайда болуына, сондай-ақ материалдың беткі құрылымының тұтастығының нашарлауына әкеледі.

Зерттеушілер кіші диаметрлі (0,18 мм) латуньді электр-сыммен үйлесімде су негізіндегі диэлектрлік орталарды қолдануға ерекше назар аударады. Мұндай жағдайлар эрозия өнімдерін тиімді шығаруды қамтамасыз етеді, алайда Raghunath (2018) атап өткендей, сымды бірнеше рет қайта орайтын станоктардағы (DK77 типіндегі) режимдердің өзгермелілігі әрбір нақты болат маркасы үшін қосымша верификацияны талап етеді. Mao et al. (2025) жақында жүргізген зерттеулерінде іске асырылған статистикалық талдау және көпкритерийлі оңтайландыру әдістерін қолдануға қарамастан, күрделі пішінді аспаптарды дайындау кезінде 10Х17Н13М2 болаты бетінің микрогеометриясының қалыптасу мәселесі жеткіліксіз зерттелген күйінде қалып отыр.

Бұл жұмыстың мақсаты — WEDM режимдері мен беткі қабат сапасының параметрлері арасындағы ғылыми негізделген тәуелділіктерді орнату, бұл хирургиялық сүйек ұстағыштардың халықаралық биологиялық қауіпсіздік стандарттарына және пайдалану сенімділігіне сәйкестігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Жұмыстың эксперименттік бөлімі Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының базасында іске асырылды. Сүйек ұстағышты (костедержатель) дайындау үшін конструкциялық материал ретінде (ГОСТ 5632–2014, 2014) стандарты бойынша регламенттелген 10Х17Н13М2 маркалы аустенитті коррозияға төзімді болат пайдаланылды. Бұл қорытпа AISI 316L (ASTM A240) болатының ең жақын техникалық аналогы болып табылады және өзінің электрохимиялық коррозияға жоғары төзімділігі мен биоүйлесімділігі арқасында биомедициналық өнеркәсіпте кеңінен қолданылады.

Бұл болат маркасын таңдау құралдың циклдік стерилизациялау және агрессивті орталармен жанасу жағдайларында ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету қажеттілігіне негізделген. Оптикалық-эмиссиялық спектрлік талдау әдісімен расталған зерттелетін материалдың химиялық құрамы 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте. 10Х17Н13М2 болатының және AISI 316L аналогының номиналды химиялық құрамы

Стандарт (Марка)	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Fe
ГОСТ 5632-2014 (10Х17Н13М2)	≤0,10	16,0–18,0	12,0–14,0	2,0–3,0	≤2,0	≤0,8	≤0,035	≤0,02	Негізі
ASTM A240 (AISI 316L)	≤0,03	16,0–18,0	10,0–14,0	2,0–3,0	≤2,0	≤0,75	≤0,045	≤0,03	Негізі
Ескерту – авторлармен құрастырылды									

Ескерту – Элементтердің мөлшері массалық пайызбен (wt. %) берілген.

Сүйек ұстағышты өндіру процесі кері инжиниринг әдістерін қолданудан басталған дәлдігі жоғары (прецизионды) операциялар циклін қамтыды. Физикалық прототипті цифрландыру ZG RigelScan Plus портативті лазерлік 3D-сканерінің көмегімен жүзеге асырылды (метрологиялық дәлдігі 0,02 мм-ге дейін). Алынған нүктелер жиынтығы («облако точек») жоғары дәлдіктегі CAD/CAM модельдерін жасауға негіз болды.

10Х17Н13М2 болатынан дайындалған дайындамаларды алдын ала механикалық өңдеу DMU50 (DMG MORI) бес осьті өңдеу орталығында жүргізілді, бұл электр эрозиялық кезең алдында базалаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етті (Doudkin және т.б., 2020). Құралдың функционалдық элементтерін прецизионды кесудің негізгі кезеңі су негізіндегі диэлектрлік ортада латунь сымын (Ø 0,18 мм) көп мәрте қайта орау жүйесі бар DK7745 станогінде орындалды.

Сүйек ұстағыштың ең жауапты бөліктеріне — остеосинтез процесінде сүйек тінімен тікелей жанасатын тісті еріншелерді (губки) өңдеуге ерекше көңіл бөлінді. Технологияны пысықтау үшін сынақ кесінділері жасалды (2-сурет), бұл СББ (ЧПУ) басқару бағдарламасын верификациялауға және дайындама қалыңдығы 12 мм болған кездегі процестің тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік берді.

Энергетикалық режимдердің 10Х17Н13М2 болаты бетінің сапасына әсер ету заңдылықтарын анықтау үшін Тагучи ортогоналды матрицасы негізінде толық факторлы

эксперимент іске асырылды. Құрал-саймандық электрод ретінде диаметрі 0,18 мм, созылу кезіндегі беріктік шегі 2511 Н/мм² молибден сымы қолданылды, бұл қалыңдығы Н=12 мм дайындамаларды өңдеу кезінде кесу траекториясының жоғары тұрақтылығын қамтамасыз етті.

2-сурет. Сымды электр эрозиялық кесуден кейінгі сүйек ұстағыштың жауапты элементтерінің эксперименттік үлгілері

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Диэлектрлік орта ретінде дистилденген сумен 1:45 пропорциясында сұйылтылған, жоғары технологиялық EDM-JR-3A-GEL концентраты негізіндегі эмульсия пайдаланылды. Антикоррозиялық және тозуға қарсы қоспалары бар қатты сабын негізіндегі бұл құрам эрозия өнімдерін (шламды) тиімді шығаруға және токтың орташа мәндерінде тұрақты ұшқын аралығын сақтауға кепілдік береді.

Эксперименттердің жалпы жиынтығынан процестің маңызды нүктелерін сипаттайтын екі негізгі режим бөліп көрсетілді (2-кесте): фиништік өңдеу (ақауларды азайту) және өнімді кесу. Беткі қабат морфологиясын және термиялық әсер ету аймағындағы құрылымдық өзгерістерді кешенді зерттеу «VERITAS» басымдық орталығының Аналитикалық зерттеулер зертханасы базасында жүргізілді (Kombayev және т.б., 2025a).

2-кесте. Сүйек ұстағыш элементтерін сымды электр эрозиялық кесудің технологиялық режимдері

Өңдеу параметрі	Өлшем бірлігі	№ 1 режим (Фиништік)	№ 2 режим (Өнімді)
Дайындама қалыңдығы (H)	мм	12	12
Импульс ұзақтығы (Ton)	мкс	32	40
Үзіліс ұзақтығы (Toff)	мкс	12	7
Жұмыс кернеуі (U)	В	65	65
Орташа ток (I)	А	5	8
Сым түрі	—	Mo (Ø 0,18 мм)	Mo (Ø 0,18 мм)
Жұмыс ортасы (С салқындатқыш сұйықтық)	—	EDM-JR-3A-GEL	EDM-JR-3A-GEL
Ескерту – авторлармен құрастырылды			

Өзгерген қабаттың тереңдігін бағалау және көлденең шлифтердің микроқұрылымын талдау үшін LaboForce-3 құрылғысы бар LaboPol-5 (Struers, Дания) автоматтандырылған жүйесін пайдалана отырып, жоғары дәлдікті проба дайындау жұмыстары орындалды. Фиништік жылтырату механикалық әсер ету артефактілерінің болмауын қамтамасыз етті. 10Х17Н13М2 болатының микроқұрылымын анықтау үшін азот қышқылының 5 %-дық

ерітіндісімен химиялық өңдеу (травление) қолданылды. Кесу аймағын визуализациялау BX-51 (Olympus, Жапония) зерттеу микроскобында 1000 есеге дейінгі үлкейтумен жүзеге асырылды. Бақылаулар ашық және қараңғы өріс режимдерінде, сондай-ақ поляризацияланған жарықта жүргізілді, бұл термиялық әсер ету аймағындағы түйіршіктер шекарасын және фазалық құрамды егжей-тегжейлі сәйкестендіруге мүмкіндік берді (Kombayev және т.б., 2025b).

Беткі қабат топографиясын, микрократерлер параметрлерін және элементтердің таралуын прецизионды зерттеу JSM-6390LV (JEOL Ltd., Жапония) микроскобында растрлық электрондық микроскопия (РЭМ) әдісімен орындалды. Зерттеулер 30 кВ-қа дейінгі үдеткіш кернеуде және 3 нм-ге дейінгі ажырату қабілеттілігімен жүргізілді, бұл 300 000 есеге дейінгі үлкейтуде кескіндердің жоғары айқындылығын қамтамасыз етті.

Нүктелік аймақтардағы элементтік құрамды сандық бағалау және кесу сызығының бойымен легирлеуші компоненттердің таралу профильдерін құру үшін INCA Energy Penta FET X3 (Oxford Instruments, Ұлыбритания) энергия-дисперсиялық микроталдау жүйесі пайдаланылды. Детектордың жоғары энергетикалық ажырату қабілеті (137 эВ) бордан (B) уранға (U) дейінгі диапазондағы элементтерге сапалық және сандық талдау жүргізуге мүмкіндік берді. Диэлектрлік қоспалар мен эрозия өнімдерін зерттеу кезінде артефактілерді болдырмау үшін түсірілім төмен вакуум режимінде жүргізілді. Таңдалған учаскелерде элементтердің таралу карталарын құру (mapping) химиялық құрамның біртектілігін тексеруге және электрод материалының (латунь/молибден) құралдың беткі қабатына диффузиялану дәрежесін бағалауға мүмкіндік берді.

Үлгілердің микроқаттылығы DuraScan-20 (EMCO TEST, Австрия) микроқаттылық өлшегішінің көмегімен Виккерс әдісімен анықталды. Сынақтар 1 кг (HV1) жүктемемен, максималды жүктемеде 10 секунд ұстаумен жүргізілді, бұл тұрақты таңбаның қалыптасуын және материалдың серпімді қалпына келуінің әсерін азайтуды қамтамасыз етті. Өлшеулер пластикалық деформация аймақтарының өзара әсерін болдырмау үшін көршілес таңбалар арасында 1,0 мм қадаммен орындалды. Нәтижелердің сенімділігін арттыру үшін әр серияда бірнеше өлшеу жүргізіліп, алынған мәндердің орташа көрсеткіші есептелді.

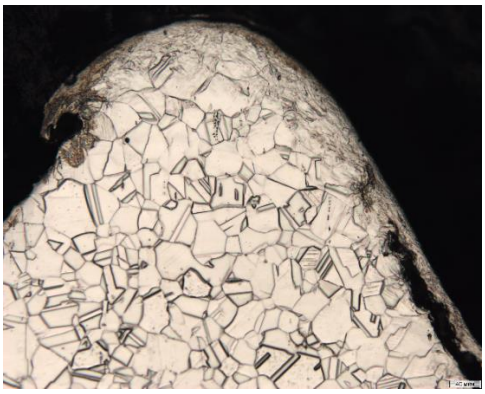
Бетінің кедір-бұдырлық параметрлерін (Ra және Rz) өлшеу PHT 350Lt зонды (ұзындығы 4,8 мм) бар MarSurf PS 10 портативті профилометрінің көмегімен жүргізілді. Өлшеулер контактілі профильдеу әдісімен, 2,5 мкм базалық кесу ұзындығында, ±200 мкм биіктік диапазонында және зондтың 1,0 мм/с қозғалыс жылдамдығында орындалды. Әрбір профиль үшін 9600-ге дейін нүкте тіркелді. Алынған Ra және Rz мәндері бірнеше өлшеулер бойынша орташаланды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

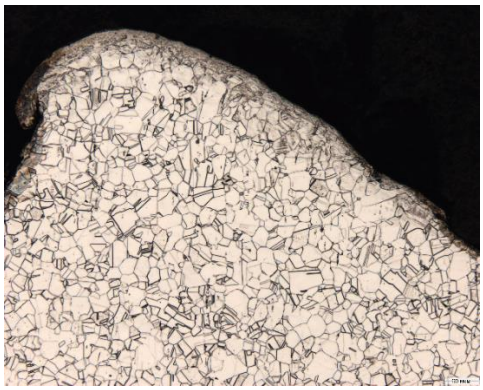
Екі түрлі режимде сымды электр эрозиялық кесуден (WEDM) кейінгі сүйек ұстағыш жұмыс элементтерінің көлденең қималарын металлографиялық зерттеу нәтижелері 3-суретте көрсетілген.

3, а-суретте (№ 1 режим: Ton=32 мкс, Toff=12 мкс) 10Х17Н13М2 болатының бастапқы күйіне тән орташа түйіршікті өлшемі бар бастапқы аустенитті матрица (γ-Fe) визуализацияланады. Полиэдральды түйіршіктердің ішінде айқын күйдіру қосарлануларының (двойники отжига) болуы құрылымдық біртектіліктің жоғары деңгейін және бастапқы кернеулердің төмендігін көрсетеді. Дегенмен, кесу аймағында микроқұрылымның шұғыл градиенті байқалады: тікелей беткі қабаттың астында жылу қайтару векторының (dT/dx) бойымен бағытталған бағаналы кристаллиттер түзіледі, бұл жылу ағынының жоғары локальды тығыздығын білдіреді.

Негізгі морфологиялық ерекшелік — сұйық фазадан (>1400 °C) өте жылдам шынықтыру нәтижесінде пайда болған гетерогенді «ақ қабаттың» (White Layer) қалыптасуы. Салқындатудың жоғары жылдамдығы (106–107 °C/с) салдарынан бұл қабатта жоғары температуралы дельта-ферриттің (δ-Fe) және негізінен түйіршіктер шекарасында шоғырланған $Cr_{23}C_6$ типті хром карбидтерінің бөлінуі тіркеледі. №1 режимнің ең қауіпті ақауы – тіс ұштарындағы модификацияланған қабаттың когезиялық қабыршақтануы мен фрагментациясы (бөлшектенуі). Бұл феномен икемділігі төмен негізгі металдағы «қабықтың» термиялық шөгуі нәтижесінде айтарлықтай созылу қалдық кернеулерінің (σ_{res}) пайда болуымен түсіндіріледі. Ашық микрожарықтар мен деламинация аймақтарының түзілуі патогенді микрофлораның адгезиясына (жабысуына) жағдай жасайды, бұл құралдың пайдалану кезіндегі биоқауіпсіздігін айтарлықтай төмендетеді.



а) Режим №1



б) Режим №2

3-сурет. Электр эрозиялық кесуден кейінгі 10Х17Н13М2 болатынан жасалған сүйек ұстағыш тістерінің көлденең қимасының микроқұрылымы

Ескерту – авторлармен құрастырылды

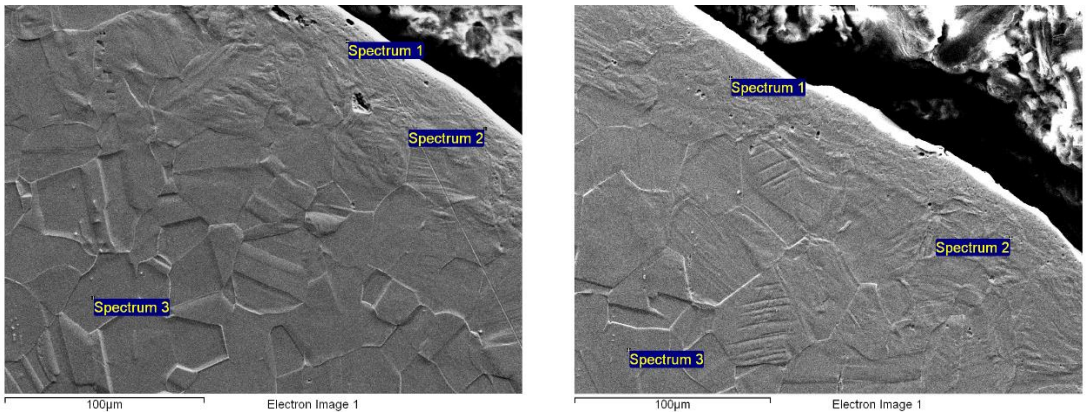
Бұған керісінше, № 2 режимде (Ton=40мкс, Toff=7мкс, 3б-сурет) алынған үлгінің микроқұрылымы аустенитті матрицаның неғұрлым дисперсті морфологиясымен сипатталады. Беткі қабат астындағы қабаттарда түйіршік өлшемінің кішіреюі жылу-физикалық тепе-теңдіктің өзгеруіне байланысты: импульстердің жоғары жиілігі мен қысқартылған үзіліс кристаллизация орталықтары санының артуына ықпал етеді, бұл γ-фаза түйіршіктерінің өсуін тежейді.

№ 2 режимдегі бетке жақын қабатты визуалды талдау құрылымдық тұтастықтың айтарлықтай артқанын көрсетеді. Термиялық өзгерген қабаттың матрицамен когерентті түйісуі байқалады, бұл ретте когезиялық үзілістер дерлік кездеспейді. Бұл әсер қалдық кернеулердің қалыптасу динамикасының тұрақтануымен түсіндіріледі: 8 А ток күші мен қысқартылған салқындату аралығында балқыманың неғұрлым біртекті аймағы дискретті емес түрде суиды, бұл фазааралық шекаралардағы созылу кернеулерінің пиктік мәндерін минималдайды. № 2 режимдегі модификацияланған қабаттың фазалық құрамы да δ -Fe және $Cr_{23}C_6$ жоғары дисперсті бөлінділерімен берілген, бірақ олардың біркелкі таралуы және айқын фрагментацияның болмауы геометриялық тұрғыдан тұрақты профильдің қалыптасуына ықпал етеді. Осылайша, разрядтың жоғары энергетикасына қарамастан, №2 режим ақаулық деңгейі төмен беттің жасалуын қамтамасыз етеді, бұл хирургиялық құралдардың коррозияға төзімділігі мен механикалық беріктігін қамтамасыз етудің шешуші факторы болып табылады.

WEDM энергетикалық параметрлерінің 10Х17Н13М2 болатының элементтік құрамы мен құрылымдық тұтастығына әсерін верификациялау үшін бетке жақын қабаттарға

жоғары дәлдікті микроталдау жүргізілді. РЭМ-морфология нәтижелері мен сандық талдау нүктелері 4-суретте, ал сандық мәндер 3 және 4-кестелерде көрсетілген.

№ 1 режимде (Ton=32мкс, I=5 A) алынған үлгіні зерттеу төмен қарқынды режимдерге тән модификацияланған қабаттың деламинациясын (қабаттануын) анықтады (4, а-сурет). «Ақ қабат / аустенитті матрица» фазааралық шекарасында байқалатын когезиялық үзіліс туындаған созылу қалдық кернеулерінің деңгейі шынықтырылған фазаның локальды беріктік шегінен асқанын көрсетеді. Бұл әсер электр эрозиялық кесудің ерекшелігімен негізделген: диэлектрлік ортада өте жылдам салқындату жағдайында (106–107 °C/с жылдамдықпен) термиялық кеңеюдің (α) шұғыл градиенті пайда болады. Нәтижесінде беткі жоғары көміртекті «қабық» тұтқыр төсеммен адгезиялық байланысын жоғалтады, бұл құралдың жұмыс жиектерінің фрагментациясына әкеледі.



а) Режим №1 б) Режим №2

4-сурет. Кесу бетінің РЭМ-кескіндері және микроталдау аймақтары

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Spectrum 1 және 2 («ақ қабат») нүктелеріндегі сандық ЭДС-талдау нәтижелері (3-кесте) хромның (17,43–17,56 % салмақ) және молибденнің (2,15–2,41 % салмақ) негізгі концентрацияларының сақталатынын растайды. Кремний (Si) мен марганец (Mn) деңгейлері ГОСТ 5632-2014 номиналды мәндерімен сәйкес келеді, бұл жоғары температуралы плазмалық разрядтың әсерінен легирлеуші компоненттердің селективті жанып кетпеуін көрсетеді. Модификацияланған қабаттағы молибден мөлшерінің тұрақтылығы – материалдың агрессивті хлоридті биологиялық орталарда питтингке төзімділігін қамтамасыз етудің шешуші факторы болып табылады.

3-кесте. Өңдеу аймағындағы 10Х17Н13М2 болатының элементтік құрамы (№1 режим)

Spectrum	In stats.	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total
Spectrum 1	Yes	2.38	0.68	17.43	1.86	65.86	9.64	2.15	100.00
Spectrum 2	Yes	2.54	0.68	17.56	1.43	66.28	9.11	2.41	100.00
Spectrum 3	Yes	0.56	0.71	17.27	1.70	66.30	11.34	2.11	100.00
Ескерту – авторлармен құрастырылды									

№ 1 режимде беткі қабаттың морфологиялық тұтастығының бұзылуына қарамастан, қорытпаның элементтік негізі тұтастай алғанда тұрақтылықты сақтайды. Дегенмен, салыстырмалы талдау көрсеткендей, аустенитті матрицадағы (Spectrum 3) никель мөлшері 11,34 % салмақты құраса, ал термиялық әсер ету аймағында (Spectrum 1, 2) оның салмағы

9,11–9,64 %-ға дейін төмендеуі байқалады. Мұндай концентрациялар градиенті WEDM-нің экстремалды жылулық әсері жағдайындағы диффузиялық процестер мен беткі қабаттың термиялық деструкциясынан туындаған локальды химиялық біртекті еместіктің пайда болғанын көрсетеді.

№ 2 режимге (Ton=40 мкс, I=8 A) аусу беткі қабат күйінің сапалық трансформациясына иінірткі болды. РЭМ-микрофотографиясы (4, б-сурет) № 1 режимге тән фрагментация немесе деламинация белгілері мүлдем жоқ, кеуектілігі минималды, тығыз әрі біртекті модификацияланған қабаттың қалыптасқанын тіркейді. ЭДС-талдау мәліметтеріне сәйкес (4-кесте), бұл режимде Spectrum 1 және 2 нүктелеріндегі Cr және Ni концентрациясы тиісінше 17,41–17,53 % және 9,79–9,84 % салмақты құрайды.

Модификацияланған қабаттағы никельдің матрицаға (10,23 % салмақ) қатысты неғұрлым біркелкі таралуы импульстің оңтайландырылған параметрлері кезінде аустенитті фазаның (γ-Fe) жоғары термодинамикалық тұрақтылығын растайды. Беткі қабаттың молибденмен 2,67 % салмаққа дейін локальды байытылуы электрод материалының балқымаға ішінара аусуын көрсетеді, бұл материалдың питтингтік коррозияға төзімділігін қосымша күшейтеді. Алынған нәтижелер №2 режимдегі параметрлердің өзгеруі хирургиялық құралды пайдалану кезінде локальды бұзылу қаупін азайтатын, құрылымдық тұтас барьерлік қабаттың қалыптасуына ықпал ететінін дәлелдейді.

4-кесте. Өңдеу аймағындағы 10Х17Н13М2 болатының элементтік құрамы (№2 режим)

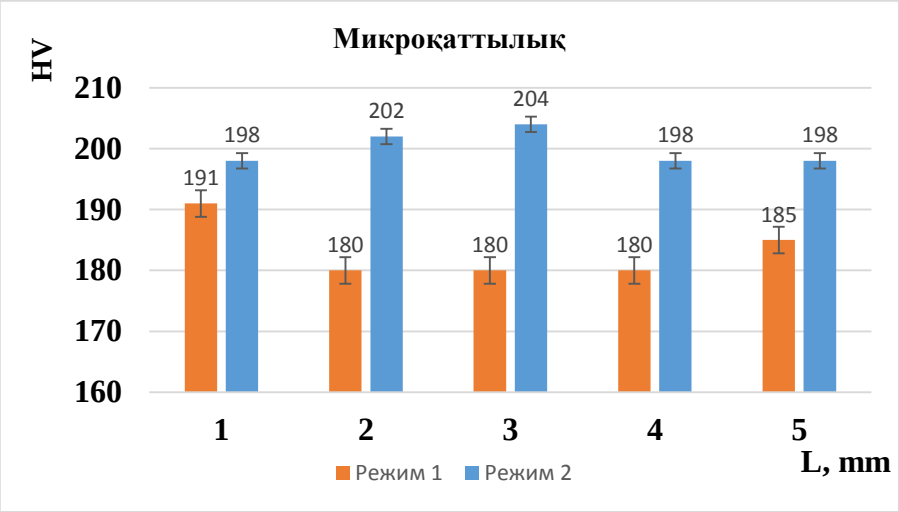
Spectrum	In stats.	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total
Spectrum 1	Yes	1.36	0.66	17.53	1.54	66.76	9.79	2.36	100.00
Spectrum 2	Yes	1.47	0.72	17.41	1.41	66.49	9.84	2.67	100.00
Spectrum 3	Yes	0.32	0.53	17.70	1.38	67.70	10.23	2.14	100.00
Ескерту – авторлармен құрастырылды									

№ 2 режимдегі элементтік профильдің принципиалды айырмашылығы – модификацияланған қабаттағы оттегінің (O) массалық үлесінің 1,36–1,47 % салмаққа дейін айтарлықтай төмендеуі болып табылады, бұл №1 режимнің көрсеткіштерінен (2,38–2,54 % салмақ) екі есеге жуық төмен. Бастапқы матрицадағы оттегінің фондық мөлшерін (0,32–0,56 % салмақ) ескерсек, анықталған заңдылық жоғары температуралық тотығу процестерінің тиімді тежелгенін көрсетеді.

Үзілістің қысқаруы (Toff=7 мкс) есебінен қол жеткізілген электродаралық саңылаудағы гидродинамиканы оңтайландыру эрозия өнімдерінің қарқынды шығарылуын қамтамасыз етеді және балқыманың сулы ортамен жанасу уақытын азайтады. Бұл механизм когезиялық сипаттамалары жоғары және металл емес оксидті қоспалардың мөлшері төмен ювенильді таза беттердің қалыптасуына ықпал етеді, бұл медициналық құралдардың коррозияға төзімділігін қамтамасыз етудің шешуші факторы болып табылады. Spectrum 3 нәтижелері құрал-саймандық электрод (Mo-сымы) материалының бақылаусыз диффузиялық аусуының болмайтынын растайды, ал токтың 8 А-ға дейін күшейтілуі болаттың химиялық құрамының деградациясына әкелмейді. Осылайша, №2 режим пайдалану қауіпсіздігі талаптарына жауап беретін, химиялық тұрақты және құрылымдық тұтас беткі қабаттың жасалуына кепілдік беретін оңтайлы режим болып табылады.

WEDM энергетикалық параметрлерінің материалдың механикалық қасиеттеріне әсерін бағалау үшін өңдеу аймағында микроқаттылықты талдау жүргізілді. Өлшенген мәндер (5-сурет) №2 режимде (Ton=40 мкс, I=8 A) микроқаттылықтың неғұрлым біркелкі таралғанын және 198–204 HV диапазонында ауытқитынын көрсетеді. Максималды мәндер

(204 HV-ге дейін) тікелей кесу жиегінде тіркелді, бұл металлографиялық зерттеу кезінде анықталған тығыз модификацияланған қабаттың қалыптасуын растайды. Сонымен қатар, №1 режим (Ton=32 мкс, I=5 A) 180-нен 191 HV-ге дейінгі ауытқулары бар тұрақсыз қаттылық профилін көрсетеді. Бірқатар өлшеу нүктелеріндегі көрсеткіштердің мұндай төмендеуі бұрын анықталған ақаулармен тікелей байланысты: микрожарықтар мен «ақ қабаттың» деламинация аймақтарының болуы материалдың индентордың енуіне тиімді қарсылығын төмендетеді, бұл беттің құрылымдық байланысының бұзылғанын көрсетеді.

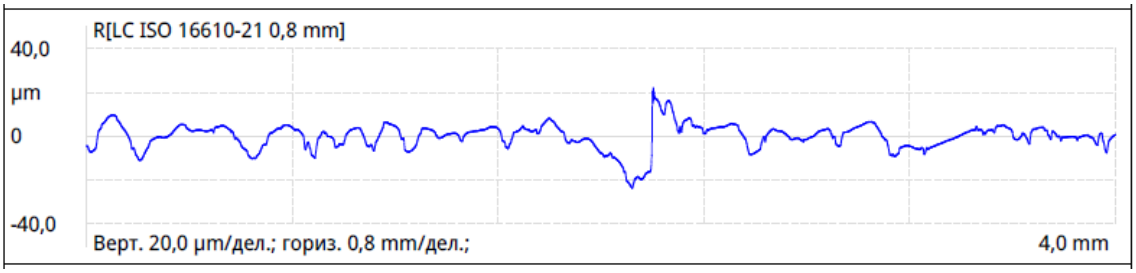


5-сурет. WEDM-нің әртүрлі режимдері үшін 10Х17Н13М2 болатының бетке жақын қабатында Виккерс бойынша микроқаттылықтың (HV) таралуы

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Алынған нәтижелерді күйдірілген күйдегі 10Х17Н13М2 маркалы болат үшін ГОСТ 5632-2014 нормативтік талаптарымен (оның типтік қаттылық мәндері шамамен 200 HV құрайды) салыстыру кезінде келесі заңдылықтар анықталды. №2 режимнің көрсеткіштері ГОСТ-тың эталондық мәндеріне толықтай сәйкес келеді, бұл құралдың конструкциялық беріктігінің сақталғанын және оңтайландырылған импульстік әсер кезінде матрицаның термиялық беріктігін жоғалтпағанын (разупрочнение) дәлелдейді. Керісінше, №1 режимде стандарт талаптарынан төмендеу жағына қарай (180 HV-ге дейін) ауытқу байқалады, бұл хирургиялық құралдар үшін шешуші фактор болып табылады. Қаттылықтың ГОСТ-тағы маркалық деңгейден төмендеуі беткі қабаттың жоғары ақаулығымен ұштасып, №1 режимді жарамсыз етеді, өйткені бұл сүйекпен жанасу кезінде жұмыс тістерінің тез деградациясына әкеледі. Осылайша, тек №2 режим ғана механикалық сипаттамалары медициналық өнеркәсіп стандарттарына толық жауап беретін беткі қабаттың алынуын қамтамасыз етіп, сүйек ұстағыштың бекітілу сенімділігі мен ұзақ мерзімділігіне кепілдік береді.

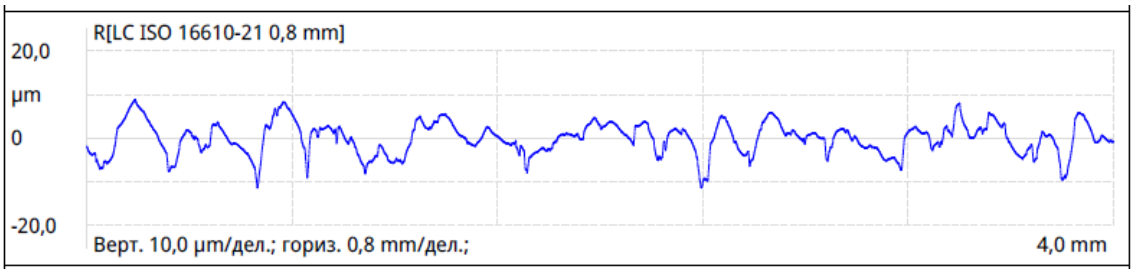
Кедір-бұдырлықтың сандық мәндерін талдау (6 және 7-суреттер) бұрын анықталған заңдылықтарды растайды. № 1 режим үшін (6-сурет) орташа арифметикалық кедір-бұдырлық Ra ≈ 3,2–3,5 мкм шамасын құрайды, бұл ретте Rz параметрі ≈ 18–22 мкм-ге жетеді, бұл айқын шыңдары мен ойықтары бар ірі микрорельефтің қалыптасқанын көрсетеді. Мұндай мәндер беткі қабаттың жоғары ақаулығын білдіреді және қаттылықтың ~180 HV-ге дейін төмендеуімен сәйкес келеді.



6-сурет. №1 режимде өңдеу кезіндегі Ra және Rz беткі қабат кедір-бұдырлығы параметрлерінің мәндері

Ескерту – авторлармен құрастырылды

№2 режим жағдайында (7-сурет) кедір-бұдырлық параметрлерінің айтарлықтай төмендеуі байқалады: Ra мәні ≈ 1,2–1,5 мкм диапазонында, ал Rz — ≈ 8–10 мкм аралығында. Алынған мәндер тегіс емес биіктіктері аз, неғұрлым біртекті және тегістелген бетті сипаттайды. №1 режиммен салыстырғанда кедір-бұдырлықтың Ra параметрі бойынша 2 еседен астам, ал Rz бойынша шамамен 2 есе төмендеуі өңдеу процесінің тұрақтанғанын және айқын термиялық зақымданулардың жоқтығын растайды.



7-сурет. №2 режимде өңдеу кезіндегі Ra және Rz беткі қабат кедір-бұдырлығы параметрлерінің мәндері

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Осылайша, №2 режим микроқаттылық бойынша нормативтік талаптарға сәйкестікті ғана емес, сонымен қатар сапа көрсеткіштері жоғары беткі қабаттың қалыптасуын қамтамасыз етеді. Бұл кедір-бұдырлық параметрлерінің (Ra және Rz) айтарлықтай төмендеуінен, құрылымдық тұтас және біртекті «ақ қабаттың» түзілуінен, сондай-ақ микрожарықтар мен деламинация аймақтары сияқты айқын ақаулардың болмауынан көрінеді. Сонымен қатар, бетке жақын аймақта легирлеуші элементтердің неғұрлым біркелкі таралуы және оттегі мөлшерінің төмендігі анықталды, бұл қабаттың қалыптасуындағы термодинамикалық жағдайлардың тұрақтанғанын көрсетеді. Аталған факторлардың жиынтығы беткі қабат күйі сапасының артқанын айқындайды және хирургиялық құралдың пайдалану сенімділігін арттыруға алғышарттар жасайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы жұмыста хирургиялық сүйек ұстағышты дайындау үшін қолданылатын 10Х17Н13М2 болатының беткі қабат сапасына сымды электр эрозиялық өңдеудің энергетикалық параметрлерінің әсерін бағалау міндеті шешілді. Кіріспе бөлімде қойылған, WEDM режимдері мен беткі қабаттың пайдалану сипаттамалары арасындағы өзара байланысты орнатуға бағытталған мақсаттар микроқұрылымды, элементтік құрамды, микроқаттылық пен кедір-бұдырлықты кешенді талдау арқылы іске асырылды.

Импульс ұзақтығы мен ток күшінің өзгеруі бетке жақын қабаттың қалыптасуына шешуші әсер ететіні анықталды. №1 режим микрожарықтар мен деламинациясы бар ақаулы құрылымның дамуымен, микроқаттылықтың 180–191 HV-ге дейін төмендеуімен және кедір-бұдырлықтың жоғары мәндерімен (Ra 3,2–3,5мкм; Rz 18–22 мкм) сипатталады. Сонымен қатар, №2 режим легирлеуші элементтері біркелкі таралған, оттегі мөлшері 1,36–1,47 салмақ %-ға дейін төмендеген, 198–204 HV деңгейіндегі тұрақты микроқаттылығы және айтарлықтай төмен кедір-бұдырлығы (Ra 1,2–1,5мкм; Rz 8–10мкм) бар құрылымдық тұтас қабаттың қалыптасуын қамтамасыз етеді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы WEDM энергетикалық параметрлері, «ақ қабат» морфологиясы, химиялық тұрақтылық және медициналық мақсаттағы аустенитті болат бетінің пайдалану сипаттамалары арасындағы кешенді өзара байланысты орнату болып табылады. Үзілісті (паузаны) оңтайландыру кезінде разряд энергетикасын арттыру құрылымның нашарлауына емес, керісінше, неғұрлым біркелкі жылу циклі мен эрозия өнімдерінің тиімді шығарылуы есебінен құрылымның тұрақтануына және ақаулықтың төмендеуіне ықпал ететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер биомедициналық материалдарды электр эрозиялық өңдеу кезінде беткі қабаттың қалыптасу механизмдері туралы түсініктердің дамуына үлес қосады.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы қаттылық бойынша нормативтік талаптарға сәйкестікті, кедір-бұдырлықтың 2 еседен астам төмендеуін және химиялық тұрақты қабаттың қалыптасуын қамтамасыз ететін оңтайлы өңдеу режимін (№2 режим) негіздеуде жатыр. Бұл аталған режимді жоғары механикалық және коррозиялық жүктемелер жағдайында жұмыс істейтін хирургиялық құралдардың функционалдық элементтерін өнеркәсіптік дайындау үшін ұсынуға мүмкіндік береді. Шектеу ретінде зерттеудің дайындаманың бекітілген қалыңдығы (12 мм) және сымды электродтың бір түрі үшін орындалғанын атап өткен жөн, бұл басқа технологиялық жағдайлар үшін қосымша верификацияны талап етеді.

Болашақ зерттеулердің келешегі өңдеу режимдерінің ауқымын кеңейтумен, баламалы электродтық материалдар мен диэлектрлік орталардың әсерін зерттеумен, сондай-ақ өңделген беттердің медициналық құралдарды нақты пайдалану жағдайларына жақын ортадағы шаршауға төзімділігін, тозуға төзімділігін және коррозияға төзімділігін бағалаумен байланысты. Разряд аймағындағы термодинамикалық процестерді модельдеу және WEDM режимдерін басқарудың адаптивті жүйелерін әзірлеу қосымша қызығушылық тудырады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетімен BR24992786 «Отандық медициналық құрал-сайман үлгілері мен медициналық мақсаттағы бұйымдарды дайындау технологиясын әзірлеу» бағдарламасын іске асыру шеңберінде қаржыландырылады.

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКАЛЫҚ КОМИТЕТТІҢ (IRB) МАҚҰЛДАУЫ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Жұмыс тек техникалық сипатта болды және оған адамдар немесе жануарлар қатыстырылмады, сондықтан бұл бөлім «Қолданылмайды» деп белгіленді.

АҚПАРТАНДЫРЫЛҒАН КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Зерттеуге қатысу басталғанға дейін барлық қатысушылардан жазбаша ақпарттандырылған келісім алынды; егер адамдардың қатысуы көзделмесе, бұл бөлім «Қолданылмайды».

МӘЛІМЕТТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын мәліметтер негізделген сұраныс бойынша тиісті автор тарапынан ұсынылуы мүмкін; немесе, жұмыс сандық модельдеу мен теориялық талдауға негізделгендіктен, жаңа эксперименталды мәліметтер жасалмады.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар медициналық құрал-сайман бойынша пікірлер ұсынғаны, сондай-ақ сарапшылық кеңестері мен практикалық ұсынымдары үшін академик Н.Ж. Батпенов атындағы Ұлттық травматология және ортопедия ғылыми орталығына алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Осы қолжазбаны дайындау барысында автор(лар) мәтінді қазақ тіліне академиялық аударма жасау және терминологиялық өңдеу үшін жасанды интеллект құралдарын пайдаланды. Барлық аудармалар мен техникалық терминдердің дәлдігі авторлар тарапынан тексерілді және бекітілді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Anil, S. E., Demirtas, H., Kalayci, A., & Cebi, A. (2023). Investigation of the layer effects formed by W-EDM on electrochemical grooving of Stellite 21. Machines, 11(8), 823. https://doi.org/10.3390/machines11080823

Bruns, S., Stark, Y., Wieland, M., Stahl, F., Kasper, C., & Scheper, T. (2007). Fast and efficient screening system for new biomaterials in tissue engineering: A model for peripheral nerve regeneration. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 82A(2), 419–429. https://doi.org/10.1002/jbm.a.31120

Chu, C. L., Chung, C. Y., Lin, P. H., & Wang, S. D. (2005). Fabrication and properties of porous NiTi shape memory alloys for heavy load-bearing medical applications. Journal of Materials Processing Technology, 169(3), 427–436. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.002

Doudkin, M., Kim, A., Kombayev, K., Azamatov, B., & Azamatova, Z. (2020). Research of cutting temperature reducing of titanium alloy grade 5 below polymorphic transformation depending on calculation of cutting modes. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 10(2), 747–758. https://doi.org/10.24247/ijmperdapr202074

Ho, K. H., & Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(13), 1287–1300. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7

Huang, T., Zhang, X., Zhang, X., & Ding, H. (2015). Corrigendum to "An efficient linear approximation of acceleration method for milling stability prediction" [Int. J. Mach. Tools Manuf. 91 (2015) 77–90]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 91, 77–90. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.02.006 (Ескерту: Мақала атауы түзетілді).

Kombayev, K., Khoshnaw, F., Kozhakhmetov, Y., Tleuzhanova, G., Azamatov, B., & Tabiyeva, Y. (2025a). Microplasma sprayed tantalum coatings on Ti Grade 5 extra-low interstitials: Investigation of thickness and porosity control. Coatings, 15(4), 464. https://doi.org/10.3390/coatings15040464

Kombayev, K., Nedobitkov, A., Gridunov, I., Kozhakhmetov, Y., Khoshnaw, F., & Aibar, K. (2025b). Surface crack analysis and quality enhancement of 30X13 (AISI 420) martensitic stainless steel gate valve shutters via electrolytic plasma hardening. Results in Engineering, 26, 104966. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104966

Mao, R., Sun, Z., Gan, S., et al. (2025). Optimization of process parameters for wire electrical discharge machining of 9Cr18Mov based on grey relational analysis. Processes, 13(5), 1547. https://doi.org/10.3390/pr13051547

Niinomi, M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 1(1), 30–42. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2007.07.001

Raghunath, V. (2018). Optimization of wire EDM process parameters for SS304 stainless steel using Taguchi method. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 8(2), 709–714. https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201883

Świercz, R., & Hołubek, R. (2020). Experimental investigation of influence of electrical discharge energy on the surface layer properties after EDM. Welding Technology Review, 92(5), 7–13. https://doi.org/10.26628/wtr.v92i5.1115 (Ескерту: Автордың тегі түзетілді: Hołubek).

Wegener, K., Bleicher, F., Krajnik, P., Hoffmeister, H.-W., & Brecher, C. (2017). Recent developments in grinding machines. CIRP Annals, 66(2), 779–802. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.006

Wu, S., Altenried, S., Zogg, A., Zuber, F., Maniura-Weber, K., & Ren, Q. (2018). Role of the surface nanoscale roughness of stainless steel on bacterial adhesion and microcolony formation. ACS Omega, 3(6), 6456–6464. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00769

Zhang, X., Liu, Y., Chen, G., Bai, S., Li, Z., Wang, F., & Xu, D. (2025). Long-term continuous corrosion of 316L stainless steel by Streptococcus mutans in simulated oral environment. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 13, 1725414. https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1725414

ГОСТ 5632–2014. (2014). Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Стандартинформ. https://prg.kz/document/?doc_id=34340759 // GOST 5632–2014. (2014). Nerzhaveyushchie stali i splavy korrozionno-stoykie, zharostoykie i zharoprochnye. Marki [Stainless steels and corrosion-resistant, heat-resistant and high-temperature alloys. Grades]. Standartinform. https://prg.kz/document/?doc_id=34340759 (In Russ.).

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Мұхаметбек Жақсылық Мұхаметбекұлы – Докторант ББ – 8D07102 «Машина жасау» Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті зерттеуш-іинженер, Өскемен, Қазақстан,
Мұхаметбек Жақсылық Мұхаметбекұлы – доктарант ОП – 8D07102 «Машиностроение» инженер-исследователь Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,
Mukhametbek Zhaksylyk – Doctoral student of the Educational Program 8D07102 «Mechanical Engineering» research engineer D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: ZhMukhametbek@edu.ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2196-010X

Азаматов Багдат Нурланович – PhD, «Алтай Шығыс Қазақстан өңірлік технопаркі»ЖШС бас директоры, Өскемен, Қазақстан
Азаматов Багдат Нурланович – PhD, Генеральный директор «Восточно Казахстанский региональный технопарк Алтай», Усть-Каменогорск, Казахстан
Azamatov Bagdat Nurlanovich – PhD, CEO of the “East Kazakhstan Regional Technopark Altai,” Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846

Қалиев Данияр Исатайұлы – PhD докторы, «Smart Engineering» ҚО жетекшісі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан,
Калиев Данияр Исатайулы – PhD доктор, руководитель ЦК «Smart Engineering», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,
Kaliyev Daniyar – PhD, Head of Competence Center «Smart Engineering», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: dkaliyev@edu.ektu.kz
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7281-2022

Комбаев Куат Курганович – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан,
Комбаев Куат Курганович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,
Kombayev Kuat – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748

Апбазов Куаныш Ермекұлы – бакалавр, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті зерттеуш-іинженер, Өскемен, Қазақстан,
Апбазов Куаныш Ермекулы – бакалавр, инженер-исследователь Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серик-баева, Усть-Каменогорск, Казахстан,
Apbazov Kuanysh – bachelor, research engineer D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: apbazovk@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9160-2932

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_11
МРНТИ 55.01.83

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 12Х18Н10Т И AISI 316 ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК

ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ҚОНДЫРҒЫЛАРДЫҢ ҚҰБЫР ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН 12Х18Н10Т ЖӘНЕ AISI 316 ӘРТҮРЛІ АУСТЕНИТТІК БОЛАТТАРДЫ ДӘНЕКЕРЛЕУДІҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

TECHNOLOGICAL FEATURES OF WELDING DISSIMILAR AUSTENITIC STEELS 12X18H10T AND AISI 316 FOR PIPELINE SYSTEMS OF HIGH-TEMPERATURE INSTALLATIONS

М.К. Скаков[1], Е.Ж. Ақболатов[2]*, Е.М. Қабдыкенова[3], Р. Ғабдысалық[4]
[1]РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», г. Курчатов, Казахстан
[2]Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан
[3]НАО «Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
[4]НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
*Автор-корреспондент: Ақболатов Елдос Жаннұрұлы, e-mail: Akhbolatov@nnc.kz

Ключевые слова:
петлевой натриевый контур, разнородная сварка, аустенитные стали, 12Х18Н10Т, AISI 316, трубопроводные системы, технология сварки, зона термического влияния.

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены технологические особенности сварки разнородных аустенитных коррозионно-стойких сталей 12Х18Н10Т и AISI 316, применяемых в оборудовании петлевого натриевого контура, создаваемого в рамках международной программы SAIGA для исследований перспективных быстрых ядерных реакторов с натриевым теплоносителем. Показано, что условия эксплуатации оборудования контура, характеризующиеся воздействием повышенных температур, химически активной среды жидкого натрия и радиационных нагрузок, предъявляют повышенные требования к структурно-фазовому состоянию сварных соединений. Проведён анализ влияния химического состава сталей и присадочных материалов на формирование структуры металла шва с использованием диаграммы Шеффлера. Обоснован выбор присадочной проволоки ER316L, обеспечивающей формирование двухфазной аустенитно-ферритной структуры с контролируемым содержанием δ-феррита и сниженной склонностью к образованию горячих трещин и межкристаллитной коррозии. Рассмотрены температурно-временные условия сенсибилизации аустенитных сталей, приведены технологические приёмы предотвращения межкристал-

© 2026 **М.К. Скаков, Е.Ж. Ақболатов, Е.М. Қабдыкенова, Р. Ғабдысалық**
Данная работа распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

литной коррозии применительно к сварным соединениям оборудования петлевого натриевого контура. Показана целесообразность применения TIG-сварки с контролируемым тепловложением и ограничением межслойной температуры.

Түйінді сөздер:
ілмекті натрий контуры, әртекті дәнекерлеу, аустенитті болаттар, 12Х18Н10Т, AISI 316, құбыржол жүйелері, дәнекерлеу технологиясы, жылулық әсер ету аймағы.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада натриймен салқындатылатын жылдам ядролық реакторларды зерттеуге арналған халықаралық SAIGA бағдарламасының аясында әзірленген ілмекті натрий контурында қолданылатын әртүрлі аустениттік коррозияға төзімді 12Х18Н10Т және AISI 316 болаттарын дәнекерлеу процесінің ерекшеліктері қарастырылады. Жоғары температураға, химиялық белсенді сұйық натрий ортасына және радиациялық жүктемелерге ұшыраумен сипатталатын контур жабдықтарының жұмыс жағдайлары дәнекерленген қосылыстардың құрылымдық-фазалық күйіне жоғары талаптар қоятыны көрсетілген. Болаттар мен дәнекерлеуге арналған сымның химиялық құрамының дәнекерленген металл құрылымының қалыптасу әсеріне Шеффлер диаграммасы арқылы талдау жүргізілген. Бақыланатын δ-феррит мөлшері бар екіфазалы аустенитті-ферритті құрылымды қосылыс металлы бар, сондай-ақ ыстық жарықшақтану мен түйіршікаралық коррозияға сезімталдығын төмендететін ER316L қоспа сымын таңдаудың негіздемесі келтірілген. Аустенитті болаттардың сенсибилизациясының температуралық-уақыттық шарттары қарастырылып, ілмекті натрий контуры жабдықтарының дәнекерленген қосылыстарына түйіршікаралық коррозияның алдын алудың технологиялық тәсілдер ұсынылған. Бақыланатын жылу енгізумен және қабатаралық температураны шектеумен TIG-дәнекерлеуді қолданудың орындылығы көрсетілген.

keywords:
Sodium loop facility, dissimilar welding, austenitic steels, 12Х18Н10Т, AISI 316, pipeline systems, welding technology, heat-affected zone.

ABSTRACT

The paper considers the technological features of welding dissimilar austenitic corrosion-resistant steels 12Х18Н10Т and AISI 316 used in the equipment of a sodium loop facility being developed within the framework of the international SAIGA program for studies of advanced sodium-cooled fast nuclear reactors. It is shown that the operating conditions of the loop equipment, characterized by exposure to elevated temperatures, a chemically active liquid sodium environment, and radiation loads, impose increased requirements on the structural and phase state of welded joints. An analysis of the influence of the chemical composition of the base materials and filler metals on the weld metal structure was carried out using the Schaeffler diagram. The choice of ER316L filler wire is substantiated, as it обеспечивает the formation of a two-phase austenitic–ferritic structure with a controlled δ-ferrite content and a reduced tendency to hot cracking and intergranular corrosion. The temperature–time conditions of sensitization of austenitic steels are considered, and technological approaches to preventing intergranular corrosion in welded joints of sodium loop equipment are presented. The expediency of using TIG welding with controlled heat input and limited interpass temperature is demonstrated.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, современное развитие высокотемпературных энергетических и исследовательских установок сопровождается повышенными требованиями к надёжности, герметичности и долговечности трубопроводных систем. Существенная роль в

обеспечении эксплуатационной надёжности таких систем принадлежит сварным соединениям, качество которых в значительной степени определяет ресурс оборудования и его устойчивость к воздействию температурных и механических нагрузок (Gadala, Gadala & Gomaa, 2024). В практике машиностроения всё более широкое применение находят конструкции, в которых используются элементы, изготовленные из разнородных материалов. Это обусловлено необходимостью сочетания высокой коррозионной стойкости, жаропрочности и технологичности изготовления оборудования. В трубопроводных системах высокотемпературных установок нередко возникает необходимость выполнения сварных соединений между аустенитными коррозионностойкими сталями различного химического состава и уровня легирования, что существенно усложняет технологию сварки (Mohammad & Tayebi, 2018).

Одной из таких систем является петлевой натриевый контур, разрабатываемый Национальным ядерным центром Республики Казахстан совместно с Комиссариатом по атомной и альтернативным видам энергии Франции (CEA) в рамках международной программы SAIGA, посвящённой изучению поведения тепловыделяющей сборки перспективного французского реактора в условиях аварии с потерей теплоносителя.

Контур предназначен для циркуляции разогретого жидкого натрия через экспериментальное устройство, размещаемое в центральном экспериментальном канале импульсного графитового реактора ИГР (Ақболатов и др, 2020). Эксплуатация контура предусматривает работу оборудования при температурах 450-500 ^{0}C, в химически активной среде жидкого натрия и в условиях интенсивного радиационного воздействия, что предъявляет повышенные требования к выбору конструкционных материалов и качеству сварных соединений. Конструктивно контур включает несколько функциональных систем, в том числе систему подачи натрия, систему подачи аргона, выхлопную систему и пневмосистему. Ключевой и наиболее технологически сложной частью контура является система подачи натрия (рис. 1), включающая элементы различного назначения и происхождения. Ряд узлов – клапаны, задвижки, расходомеры и другое трубопроводное оборудование зарубежного производства, – выполнены из аустенитной коррозионностойкой стали AISI 316. В то же время основные элементы контура отечественного изготовления, такие как аккумуляторный бак, холодная ловушка, индикатор засорения, натриевый фильтр, фильтр паров, ловушка паров и трубопроводные участки, изготовлены из стали 12Х18Н10Т.

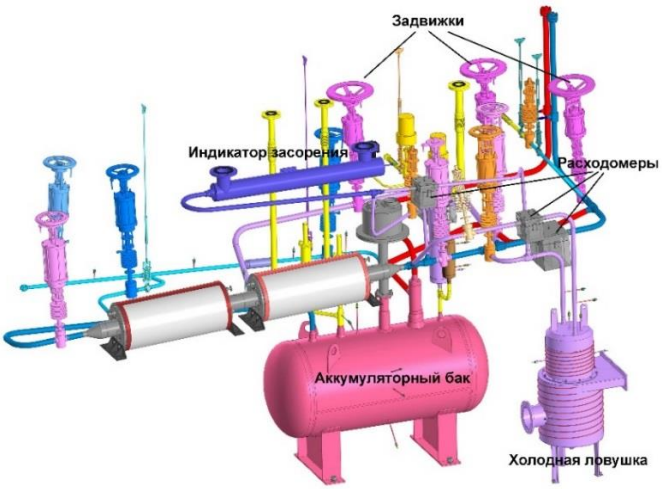


Рисунок 1. Система подачи натрия петлевого натриевого контура
Примечание – разработано авторами на основе КОМПАС-3D

Такое сочетание материалов обуславливает необходимость сочетания в одной системе сталей 12Х18Н10Т и AISI 316. Несмотря на близость структурного класса, согласно ГОСТ Р 71985-2025, сварка указанных сталей характеризуется как разнородное сварное соединение, что обусловлено различиями в химическом составе и уровне легирования. При сварке сталей 12Х18Н10Т и AISI 316 возможно формирование неблагоприятных структурно-фазовых состояний металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), увеличение склонности к образованию горячих трещин, а также изменение коррозионной стойкости сварных соединений (Исламкулов, 2014, Медовар, 1954; Меркушкин, 2020).

В связи с этим актуальной является задача разработки и обоснования технологических подходов к сварке разнородных аустенитных сталей 12Х18Н10Т и AISI 316, обеспечивающих формирование структурно устойчивых сварных соединений с требуемыми механическими и эксплуатационными характеристиками. Целью настоящей работы является анализ технологических особенностей сварки указанных сталей и оценка факторов, влияющих на качество и надёжность сварных соединений, применяемых в трубопроводных системах высокотемпературных установок.

МАТЕРИАЛЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ СОЧЕТАНИЯ ПРИ СВАРКЕ

Как известно из литературных данных: Дедюх (2012), Закс (1973), Кундрат (1988), Липпольд (2011), Hathesh (2020), Jacob (2018), Kim (2011), Saeidi (2015) и Suutala (1980), окончательная структура сталей аустенитного класса после сварки в значительной степени определяется теплофизическими условиями кристаллизации и их химическим составом. Согласно этим работам, фазовое и структурное состояние таких сталей может быть оценено с использованием псевдобинарной диаграммы состояния системы Fe–Cr–Ni при условии постоянного содержания железа (рис. 2). В соответствии с этой диаграммой, в зависимости от соотношения ферритообразующих (Cr, Si, Al, Mo, Vn, Nb, Ti, W) и аустенитообразующих (C, N, Ni, Mn, Cu) элементов, характеризуемого величинами $Cr_{экв}$ и $Ni_{экв}$, процесс кристаллизации может протекать по различным механизмам.

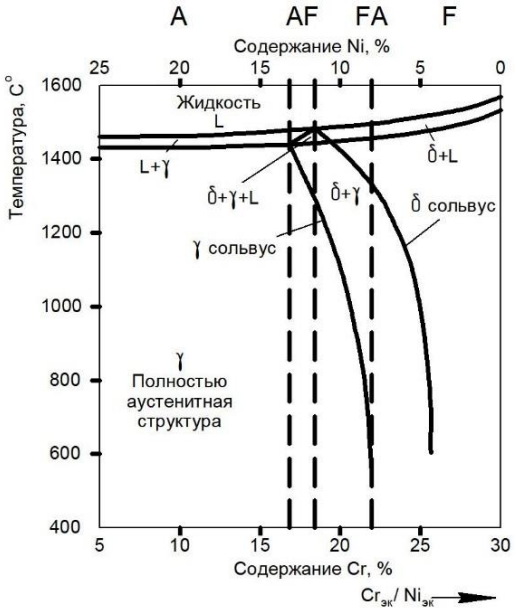


Рисунок 2. Псевдобинарная диаграмма состояния системы Fe–Cr–Ni при содержании железа 70 %

Примечание – составлено авторами на основе данных (Липпольд, 2011, Hathesh, 2020)

Согласно псевдобинарной диаграмме превращения системы Fe–Cr–Ni, в аустенитных сталях первичная кристаллизация может происходить как в аустенит, так и в феррит. При более высоких значениях отношения $Cr_{экв}/Ni_{экв}$ кристаллизация осуществляется через первичное образование феррита с последующим превращением его в аустенит (FA), тогда как при более низких значениях данного соотношения первичной фазой является аустенит (A). Однако при сварке и наплавке вследствие высоких скоростей охлаждения превращение феррита в аустенит часто протекает не полностью, в результате чего в микроструктуре металла шва сохраняется определённое количество ферритной фазы, и структура может характеризоваться как аустенитно-ферритная (AF). Данная ферритная фаза относится к дельта-ферриту (δ-ферриту), поскольку она образуется при высоких температурах кристаллизации, в отличие от альфа-феррита (α-феррита), формирующегося при более низких температурах в углеродистых сталях (Suutala, Takalo & Moisio, 1980). Наличие ограниченного количества δ-феррита в структуре сварного шва является благоприятным фактором, поскольку способствует снижению склонности к образованию горячих трещин. Известно, что однофазные аустенитные сварные швы по сравнению с двухфазной аустенитно-ферритной структурой обладают большей склонностью к образованию горячих трещин (Дедюх, 2012; Кривоносова, 2017; Липпольд, 2011). Феррит, нарушая сплошность аустенитных зерен и располагаясь в виде прослоек между ними, изменяет характер транскристаллитного разрушения и тем самым повышает трещиностойкость металла шва. Вместе с тем чрезмерное содержание δ-феррита (более 8 %) в сварном шве способствует образованию сигма-фазы, представляющей интерметаллическое соединение на основе железа и хрома. Эта фаза образуется в интервале температур 538–927 °C и отличается высокой твёрдостью и хрупкостью, что приводит к снижению ударной вязкости и пластичности металла. Производственный и экспериментальный опыт показывает, что оптимальным является содержание феррита в металле сварного шва на уровне не более 8 %. Такое количество обеспечивает повышенную вязкость металла, поскольку феррит, располагаясь преимущественно по границам аустенитных зерен, ограничивает их рост и стабилизирует структуру.

Следовательно, при сварке сталей 12Х18Н10Т и AISI 316 необходимо осуществлять контроль содержания ферритной фазы в металле шва. Для формирования двухфазной структуры металла шва сварочный материал должен содержать ферритообразующие элементы, такие как хром, титан, ниобий, молибден и кремний. Однако перед применением конкретного сварочного материала требуется предварительная оценка ожидаемой структуры металла шва, поскольку в рассматриваемом случае процесс сварки предполагает формирование разнородного соединения между сталями с различным химическим составом.

Предварительную оценку структуры металла шва целесообразно проводить с использованием диаграммы Шеффлера, позволяющей прогнозировать фазовый состав металла шва на основе соотношения эквивалентов $Cr_{экв}$ и $Ni_{экв}$. К примеру, при использовании присадочной проволоки Св-04Х17Н10М2 для сварки сталей 12Х18Н10Т и AISI 316 металл шва, согласно диаграмме Шеффлера, формируется с преимущественно однофазной аустенитной структурой (рис. 3) при соотношении $Cr_{экв}/Ni_{экв}$ = 1,29 (таб.1). В этом случае, как отмечено в работах Kim (2011), Kundrat (1988) и Suutala (1980), при значениях $Cr_{экв}/Ni_{экв}$<1,3 затвердевание металла шва протекает с образованием первичного аутенита, что повышает склонность сварного соединения к образованию горячих трещин. В то же время при использовании присадочной проволоки ER316L металл шва, согласно диаграмме Шеффлера, формируется в области аустенитно-ферритной структуры (рис. 3) при соотношении $Cr_{экв}/Ni_{экв}$ = 5,93 (таб.1). При значениях $Cr_{экв}/Ni_{экв}$ > 1,3 затвердевание металла шва протекает с образованием первичного δ-феррита с последующим частичным

превращением его в аустенит. Как уже отмечалось, в условиях сварки превращение δ-феррита в аустенит протекает не полностью, что приводит к сохранению определённого количества ферритной фазы в структуре металла шва. Таким образом, при использовании присадочной проволоки ER316L может формироваться двухфазная аустенитно-ферритная структура с содержанием δ-феррита на уровне порядка 5 %, что обеспечит контролируемое присутствие ферритной фазы и будет способствовать снижению склонности сварного соединения к образованию горячих трещин. Химический состав исследуемых сталей и присадочных материалов, использованных для расчёта $Cr_{экв}$ и $Ni_{экв}$, приведён в таблице 2.

Таблица 1. Расчётные значения эквивалентов $Cr_{гэкв}$ и $Ni_{экв}$ металла сварного шва

Присадочная проволока	Эквиваленты $Cr_{экв}$, %	Эквиваленты $Ni_{экв}$, %	Отношение $Cr_{экв}$ / $Ni_{экв}$, %
Св-04Х17Н10М2	21,33	16,98	1,29
ER316L	20,94	14,51	5,93
Примечание – составлено авторами по методике (Закс, 2021)			

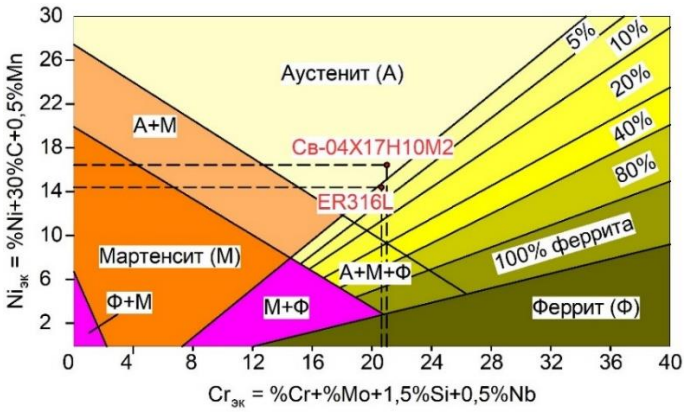


Рисунок 3. Содержание феррита в металле шва на диаграмме Шеффлера при сварке сталей 12Х18Н10Т с AISI 316 для присадочной проволоки Св-04Х17Н10М2 и ER316L
Примечание – разработано авторами на основе КОМПАС-3D

Таблица 2. Химический состав основного и присадочного металла (%)

Металл	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	P	S
12Х18Н10Т	≤0.12	≤0.8	≤2.0	17.0–19.0	9.0–11.0	–	0.4–0.7	≤0.035	≤0.025
AISI 316	≤0.08	≤0.75	≤2.0	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0	–	≤0.045	≤0.03
Св-04Х17Н10М2	≤0.03	≤0.8	≤2.0	16.0–18.0	9.0–11.0	2.0–3.0	–	≤0.03	≤0.025
ER316L	≤0.03	0.3–0.65	1.0–2.5	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	–	≤0.03	≤0.02
Примечание – составлено авторами на основе данных (ГОСТ 5632–2014, ASTM A312/A312M, ТУ 14-1-1959-77, ASME SFA-5.9)									

Таким образом, контроль фазового состава металла шва является важным фактором при выборе сварочных материалов. Дополнительные сложности связаны с различием в содержании стабилизирующих элементов. В стали 12Х18Н10Т функцию стабилизации аустенитной структуры и предотвращения карбидообразования выполняет титан, тогда как в стали AISI 316 стабилизация достигается за счёт снижения содержания углерода и повышения никеля и молибдена. В зоне термического влияния при сварке возможно локальное перераспределение углерода и легирующих элементов, что при

неблагоприятных условиях может привести к образованию карбидных фаз и снижению эксплуатационных свойств соединения.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НА СКЛОННОСТЬ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ

При сварке аустенитных сталей практически неизбежно наблюдается выделение карбидов хрома типа $Cr_{23}C_6$, преимущественно по границам зерен, что обусловлено высокой карбидообразующей способностью хрома (Кривоносова, 2006; Курочкин, 2006; Меркушкин, 2020). Интенсивность карбидообразования, как правило, возрастает при воздействии повышенных температур в интервале 470–850 °C, характерных для сварочных процессов. В результате этого увеличивается склонность металла сварного шва и околошовной зоны к межкристаллитной коррозии (МКК). Поскольку хром является основным элементом, обеспечивающим коррозионную стойкость аустенитных сталей, его локальное связывание в карбиды приводит к формированию зон, обеднённых хромом, преимущественно вдоль границ зерен. Такие приграничные области становятся наиболее уязвимыми к коррозионному разрушению. Схематическое изображение выделения карбидов хрома по границам зерен аустенита приведено на рисунке 4.

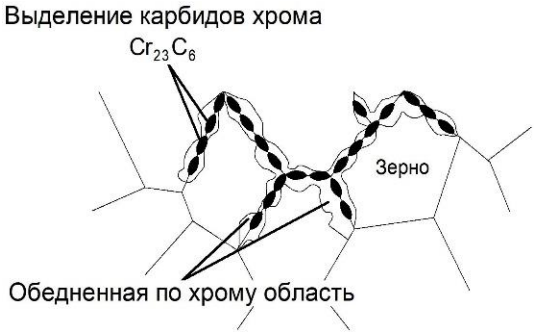


Рисунок 4. Схематическое изображение выделения карбидов на границах зерен в аустените
Примечание – составлено авторами на основе данных (Меркушкин, Березовская и Сомина, 2020)

Зависимость возникновения МКК от температуры и времени выдержки в коррозионностойких аустенитных сталях представлена на рисунке 5.

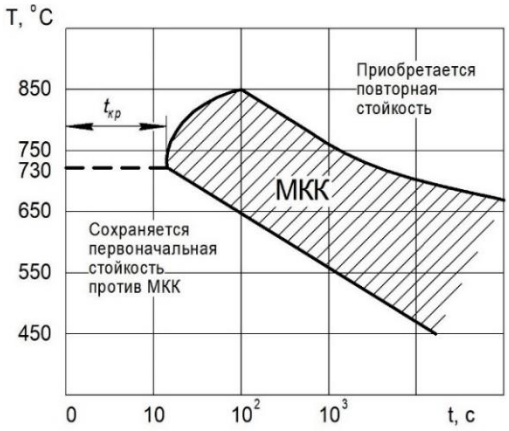


Рисунок 5. Склонность стали к межкристаллитной коррозии в зависимости от температуры нагрева и времени выдержки
Примечание – составлено авторами на основе данных (Кривоносова, Акулова и Мышкина 2017)

На С-образной температурно-временной кривой выделяется область сенсибилизации, соответствующая повышенной склонности металла к межкристаллитной коррозии. Для формирования чувствительности к МКК требуется минимальное время выдержки при температурах порядка 650–750 °С. Данное время, соответствующее указанному температурному интервалу, принято называть критическим ($t_{кр}$) (Меркушкин, Березовская и Сомина, 2020). При более высоких и более низких температурах продолжительность выдержки, необходимая для возникновения чувствительности к МКК, существенно увеличивается.

Процесс карбидообразования носит самопроизвольный характер и начинается при пребывании металла в интервале температур сенсибилизации. В условиях одновременного воздействия коррозионной среды, внешних и внутренних растягивающих напряжений разрушение металла развивается преимущественно по сварному шву и в околошовной зоне.

В настоящее время в промышленной практике разработан ряд мер по предотвращению МКК в сварных соединениях коррозионн-стойких аустенитных сталей. Применительно к сварке разнородных сталей 12Х18Н10Т и AISI 316, на наш взгляд, можно выделить следующие основные приёмы:

- Минимизация содержания углерода в металле шва. Данный подход реализуется за счёт применения низкоуглеродистых присадочных материалов (С < 0,03 %). В рассматриваемом случае использование проволоки ER316L, характеризующейся пониженным содержанием углерода, позволяет снизить вероятность образования карбидов хрома в металле шва.

- Формирование двухфазной аустенитно-ферритной структуры металла шва. Наличие первичного δ-феррита в аустенитном шве способствует более быстрому восстановлению концентрации хрома в обедненных приграничных областях за счет высокой скорости диффузии хрома в ферритной фазе. Как отмечалось, проволока ER316L обеспечивает формирование аустенитно-ферритной структуры с содержанием δ-феррита, что одновременно снижает склонность сварного соединения к образованию горячих трещин и МКК.

- Минимизация времени пребывания металла в интервале критических температур (400–850 °С). Данный подход реализуется за счёт снижения тепловложения, увеличения скорости охлаждения и оптимизации конструкции сварного соединения. Применение рациональных режимов сварки с пониженной погонной энергией позволяет ограничить перегрев металла сварного шва и ЗТВ.

- Проведение послесварочной термической обработки. Закалка (аустенизация) при температурах 1050–1100 °С либо стабилизирующий отжиг при температуре 850–900 °С с выдержкой 2–3 часа и последующим охлаждением на воздухе способствуют растворению карбидных фаз или выравниванию распределения хрома в объёме аустенитных зерен, что снижает чувствительность сварных соединений к МКК.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ 12Х18Н10Т И AISI 316

Технология сварки разнородных сталей 12Х18Н10Т и AISI 316 должна обеспечивать формирование сварных соединений с минимальной дефектностью, стабильным структурно-фазовым состоянием металла шва и околошовной зоны, а также воспроизводимостью получаемых характеристик. С учётом геометрических параметров элементов петлевого натриевого контура, толщины стенок трубопроводов (3-5 мм) и корпусов, а также повышенных требований к чистоте металла шва и его коррозионной стойкости, в качестве основного способа сварки целесообразно применение дуговой сварки

неплавящимся электродом в среде защитного газа (TIG-сварки). Данный способ обеспечивает стабильный тепловой режим, точный контроль тепловложения, что имеет принципиальное значение для формирования прогнозируемой структуры металла шва и снижения склонности сварных соединений к образованию горячих трещин и МКК. Кроме того, TIG-сварка отличается высокой технологической гибкостью и мобильностью, что особенно важно при выполнении монтажных работ.

При разработке технологии сварки особое внимание должно уделяться режимам тепловложения, поскольку они непосредственно влияют на размеры ЗТВ, скорость охлаждения металла и условия карбидообразования в интервале температур сенсибилизации (470–850 °C). Повышенная погонная энергия способствует увеличению времени пребывания металла в указанном температурном диапазоне и, как следствие, росту склонности к МКК, тогда как недостаточное тепловложение может приводить к дефектам сплавления и нарушению однородности структуры сварного соединения. В этой связи для сварных соединений оборудования петлевого натриевого контура предпочтительным является импульсный режим TIG-сварки. Однако, как показано в работе Мельникова (2014), влияние частоты импульсов тока на геометрические параметры шва при TIG-сварке аустенитных нержавеющих сталей является ограниченным, особенно в диапазоне 60–120 Гц. Это связано с низкой теплопроводностью и высоким электрическим сопротивлением аустенитных сталей, вследствие чего тепло не успевает перераспределяться в металле между отдельными импульсами, а форма и размеры шва остаются практически неизменными. Аналогичные результаты приведены в работе Krantz & Coppolecchia (1971), где показано, что в диапазоне высоких частот импульса (выше 120 Гц) существенного изменения скорости охлаждения металла шва не происходит. В связи с этим более целесообразным, по-видимому, является применение режимов TIG-сварки в частотах до 120 Гц. Такие режимы обеспечивают малое время пребывания металла в области температур сенсибилизации и равномерное проплавление.

Сварка элементов петлевого натриевого контура, как правило, выполняется без предварительного подогрева, что соответствует особенностям аустенитных сталей. При этом особое значение приобретает контроль межслойной температуры, поскольку её повышение может способствовать увеличению времени пребывания металла в интервале температур сенсибилизации, накоплению остаточных сварочных напряжений и изменению структурно-фазового состояния металла шва и зоны термического влияния. В связи с этим рекомендуется выполнение сварки с ограничением межслойной температуры и использованием поэтапного наложения сварочных валиков, обеспечивающего равномерное распределение тепловложения. В процессе сварки необходимо осуществлять постоянный контроль межслойной температуры, которая не должна превышать 175 °C, что соответствует рекомендациям, приведённым в нормативных источниках API RP 582:2023.

Особое внимание необходимо также уделить подготовке и разделке кромок. Для сварки трубопроводов, как правило, применяется V-образная разделка кромок в зависимости от толщины стенки. Угол раскрытия разделки должен обеспечивать свободный доступ дуги и присадочного материала к корню шва, исключая при этом избыточное тепловложение. Согласно требованиям НП-104-18, для сварки аустенитных коррозионно-стойких сталей угол скоса кромок составляет 35° ± 2°, притупление кромки – 0,3…0,5 мм, зазор между свариваемыми элементами – 1,5 ± 0,5 мм (рис.6). Такая конструкция стыка позволяет обеспечить стабильное формирование корневого шва при сварке и снизить вероятность образования непроваров и пор.

Наряду с выбором способа сварки и режимов тепловложения, при разработке технологии сварки необходимо учитывать дополнительные технологические требования,

направленные на обеспечение структурной стабильности и коррозионной стойкости сварных соединений. В первую очередь повышенные требования предъявляются к чистоте защитного газа. При выполнении сварки нержавеющих сталей целесообразно использование аргона чистотой не ниже 99,99 %. Также при сварке трубопроводных элементов необходимо обеспечить защиту корневой части шва от окисления, для чего необходимо обеспечить, поддув защитного газа в корень шва с расходом аргона в пределах 4–5 л/мин. Кроме того, при разработке технологии сварки должны учитываться требования к контролю качества сварных соединений. Для сварных соединений оборудования петлевого натриевого контура рекомендуется применение комплекса неразрушающих методов контроля, включающего визуально-измерительный, капиллярный и радиографический контроль в соответствии с НП-084-15.

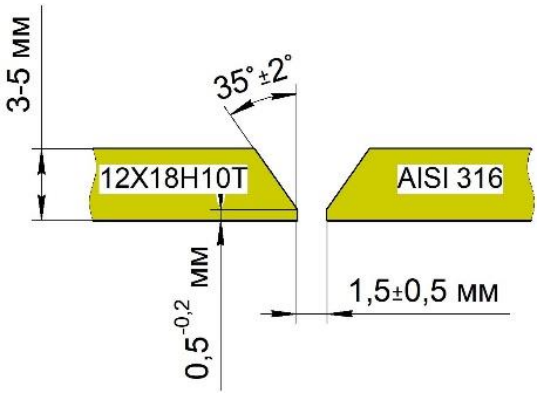


Рисунок 6. Конструктивные элементы стыка
Примечание – составлено авторами на основе данных (НП-104-18)

Соблюдение совокупности указанных технологических требований должно обеспечить формирование сварных соединений сталей 12Х18Н10Т и AISI 316, характеризующихся высокой структурной стабильностью, минимальной склонностью к образованию дефектов и требуемыми эксплуатационными характеристиками при работе в условиях высокотемпературной натриевой среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены технологические и структурно-фазовые особенности сварки разнородных аустенитных коррозионно-стойких сталей 12Х18Н10Т и AISI 316, применяемых в элементах петлевого натриевого контура. Установлено, что фазовое состояние металла шва при сварке указанных сталей в значительной степени определяется соотношением эквивалентов $Cr_{экв}/Ni_{экв}$ и выбором присадочного материала. На основе анализа диаграммы Шеффлера показано, что применение присадочной проволоки ER316L обеспечивает формирование двухфазной аустенитно-ферритной структуры с контролируемым содержанием δ-феррита, что снижает склонность сварных соединений к образованию горячих трещин по сравнению с однофазной аустенитной структурой.

Показано, что одним из основных факторов, ограничивающих коррозионную стойкость сварных соединений аустенитных сталей, является МКК, связанная с процессами карбидообразования в интервале температур сенсибилизации. Снижение склонности к МКК достигается за счёт применения низкоуглеродистых присадочных материалов, ограничения времени пребывания металла в критическом температурном диапазоне, а также формирования аустенитно-ферритной структуры металла шва, способствующей более равномерному распределению хрома.

Обоснован выбор дуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа в качестве основного способа соединения элементов петлевого натриевого контура. Показано, что применение импульсных режимов сварки с ограниченным тепловложением и контролем межслойной температуры позволяет минимизировать зону термического влияния и создать благоприятные условия для формирования структурно устойчивого металла шва.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP 32728891 «Разработка и экспериментальное обоснование технологии сварки разнородных аустенитных сталей 12Х18Н10Т и AISI 316 для трубопроводов АЭС».

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ОДОБРЕНИИ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫМ ЭТИЧЕСКИМ КОМИТЕТОМ (IRB): Поскольку работа носила исключительно технический характер и не включала участие людей или животных, данный раздел отмечен как «Не применимо»

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ИНФОРМИРОВАННОМ СОГЛАСИИ: Участие людей не предусматривалось, данный раздел отмечен как «Не применимо».

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ: Поскольку работа основана на обзоре литературы новые экспериментальные данные не создавались.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы научной статьи не использовали инструменты искусственного интеллекта (ИИ) в ходе подготовки научной статьи (помощь в написании текста, редактировании, проверка фактов, анализ данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Gadala, M., Gadala, I., & Gomaa, A. (2024). Failure assessment of seam-welded pipe under fatigue and thermal loading. Engineering Failure Analysis, 167, 108934. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108934

Mohammad Soltani, H., & Tayebi, M. (2018). Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding. Journal of Alloys and Compounds, 767, 112–121. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.302

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. (2022, October 17). Kazakhstan-French SAIGA Research Program. https://www.nnc.kz/en/news/show/397?utm

Ақболатов, Е. Ж., Богомолова, И. Н., Коровиков, А. Г., & Шевченко, А. М. (2020). Опыт изготовления кожуха наружного неподвижной ампулы НА-228 исследовательского реактора ИГР. Вестник НЯЦ РК, (4), 99–104. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-4-99-104 // Akbolatov, E. Zh., Bogomolova, I. N., Korovikov, A. G., & Shevchenko, A. M. (2020). Opyt izgotovleniya kozhukha naruzhnogo nepodvizhnoi ampuly NA-228 issledovatelskogo reaktora IGR [Experience in manufacturing the outer casing of the fixed ampoule NA-228 of the IGR research reactor]. Vestnik NYaTs RK, (4), 99–104. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-4-99-104 (In Russ.)

Медовар, Б. И. (1954). Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. Киев: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. // Medovar, B. I. (1954). Svarka khromonikelevykh austenitnykh stalei [Welding of chromium-nickel austenitic steels]. Kyiv: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo mashinostroitelnoi literatury. (In Russ.)

Меркушкин, Е.А., Березовская, В.В., & Сомина, С.В. (2020). Межкристаллитная коррозия сталей. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. // Merkushkin, E. A., Berezovskaya, V.V., & Somina, S.V. (2020). Mezhkristallitnaya korroziya stalei [Intergranular corrosion of steels]. Yekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta. (In Russ.)

Исламкулов, К. М., & Смагулов, Д. У. (2014). Способ повышения сопротивляемости высоколегированной аустенитной стали образованию горячих трещин при сварке. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, (11), 7–9. // Islamkulov, K. M., & Smagulov, D. U. (2014). Sposob povysheniya soprotivlyaemosti vysokolegirovannoi austenitnoi stali obrazovaniyu goryachikh treshchin pri svarke [A method for increasing the resistance of high-alloy austenitic steel to hot cracking during welding]. Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovanii, (11), 7–9. (In Russ.)

Suutala, N., Takalo, T., & Moisio, T. (1980). Ferritic-austenitic solidification mode in austenitic stainless steel welds. Metallurgical Transactions A, 11A(5), 717–725.

Jacob, G. (2018). Prediction of solidification phases in CrNi stainless steel alloys manufactured by laser based powder bed fusion process. NIST Advanced Manufacturing Series, 100–114, 1–38. https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-14

Hathesh, M. (2020). A review on welding related problems and remedy of austenitic stainless steels. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7, 5166–5174. https://doi.org/10.4236/MNSMS.2023.132002

Липпольд, Д. (2011). Металлургия сварки и свариваемость нержавеющих сталей / пер. с англ.; под ред. Н. А. Соснина, А. М. Левченко. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. // Lippold, D. (2011). Metallurgiya svarki i svarivaemost nerzhaveyushchikh stalei [Welding metallurgy and weldability of stainless steels] / translated from English; N. A. Sosnin & A. M. Levchenko (Eds.). Saint Petersburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta. (In Russ.)

Kundrat, D. M., & Elliott, J. F. (1988). Phase relationships in the Fe-Cr-Ni system at solidification temperatures. Metallurgical Transactions A, 19, 899–908.

Дедюх, Р. И. (2012). Теория сварочных процессов. Превращения в металлах при сварке: учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета. // Dedyukh, R. I. (2012). Teoriya svarochnykh protsessov. Prevrashcheniya v metallakh pri svarke: uchebnoe posobie [Theory of welding processes. Transformations in metals during welding: Textbook]. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. (In Russ.)

Saeidi, K., Gao, X., Lofaj, F., Kvetková, L., & Shen, Z. J. (2015). Transformation of austenite to duplex austenite-ferrite assembly in annealed stainless steel 316L consolidated by laser melting. Journal of Alloys and Compounds, 633, 463–469. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.249

Kim, Y. H., Kim, D. G., Sung, J. H., et al. (2011). Influences of Cr/Ni equivalent ratios of filler wires on pitting corrosion and ductility-dip cracking of AISI 316L weld metals. Metals and Materials International, 17, 151–155. https://doi.org/10.1007/s12540-011-0221-1

Закс, И. А. (1973). Сварка разнородных сталей. Ленинград: Машиностроение. // Zaks, I. A. (1973). Svarka raznorodnykh stalei [Welding of dissimilar steels]. Leningrad: Mashinostroenie. (In Russ.)

Кривоносова, Е. А., Акулова, С. Н., & Мышкина, А. В. (2017). К проблеме коррозионного разрушения сварных швов. Вестник ПНИПУ, 19(3), 114–137. // Krivonosova, E. A., Akulova, S. N., & Myshkina, A. V. (2017). K probleme korrozionnogo razrusheniya

svarnykh shvov [On the problem of corrosion destruction of welded joints]. Vestnik PNIPU, 19(3), 114–137. (In Russ.)

Курочкин, А. А., & Гуревич, С. М. (2006). Сварка коррозионностойких сталей и сплавов. Москва: Машиностроение. // Kurochkin, A. A., & Gurevich, S. M. (2006). Svarka korrozionnostoikikh stalei i splavov [Welding of corrosion-resistant steels and alloys]. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)

Мельников, А. Ю., Фивейский, А. М., & Шолохов, М. А. (2015). Исследование влияния параметров импульсов на размеры шва при аргонодуговой сварке. В Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума, Екатеринбург, 25–27 ноября 2014 года (с. 106–110). Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. EDN TSQKZL. // Melnikov, A. Yu., Fiveiskii, A. M., & Sholokhov, M. A. (2015). Issledovanie vliyaniya parametrov impulsov na razmery shva pri argonodugovoi svarke [Study of the influence of pulse parameters on weld size during argon arc welding]. In Svarka i diagnostika: sbornik dokladov mezhdunarodnogo foruma, Yekaterinburg, November 25–27, 2014 (pp. 106–110). Yekaterinburg: Uralskii federalnyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B. N. Eltsina. EDN TSQKZL. (In Russ.)

Krantz, B. M., & Coppolecchia, V. (1971). The effects of pulsed gas metal-arc welding parameters on weld cooling rates. Welding Research Supplement, 11, 474–479.

API RP 582:2023. (2023). Welding guidelines for the chemical, oil, and gas industries. American Petroleum Institute.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (НП-104-18): утв. Приказом Ростехнадзора от 14.11.2018 г. № 554. URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293733/4293733534.htm // Federalnye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoi energii «Svarka i naplavka oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok» (NP-104-18): utv. Prikazom Rostekhnadzora ot 14.11.2018 g. No. 554 [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Welding and surfacing of equipment and pipelines of nuclear power installations" (NP-104-18): Approved by Order of Rostechnadzor dated November 14, 2018, No. 554]. URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293733/4293733534.htm (In Russ.)

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций» (НП-084-15): утв. Приказом Ростехнадзора от 07.12.2015 г. № 502. URL: https://docs.secnrs.ru/catalog/FNP/NP_084_15/ // Federalnye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoi energii «Pravila kontrolya osnovnogo metalla, svarnykh soedinenii i naplavlennykh poverkhnostei pri ekspluatatsii oborudovaniya, truboprovodov i drugikh elementov atomnykh stantsii» (NP-084-15): utv. Prikazom Rostekhnadzora ot 07.12.2015 g. No. 502 [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Rules for inspection of base metal, welded joints and deposited surfaces during operation of equipment, pipelines and other elements of nuclear power plants" (NP-084-15): Approved by Order of Rostechnadzor dated December 7, 2015, No. 502]. URL: https://docs.secnrs.ru/catalog/FNP/NP_084_15/ (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Скаков Мажын Канапинович – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов қ., Қазақстан
Скаков Мажын Канапинович – доктор ф.-м. наук, профессор, Национальный ядерный центр Республики Казахстан, г. Курчатов, Казахстан
Skakov Mazhyn Kanapinovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan,
e-mail: skakov@nnc.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3716-8846

Ақболатов Елдос Жаннұрұлы – машинажасау магистрі, ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
Ақболатов Елдос Жаннұрұлы – магистр машиностроения, Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан
Akbolatov Eldos Zhannuruly – Master of Mechanical Engineering, Institute of Atomic Energy Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan,
e-mail: akhbolatov@nnc.kz,
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1223-980X

Қабдыкенова Еркежан Мұратқызы – физика магистрі, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Қабдыкенова Еркежан Мұратқызы – магистр физики, Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Kabdykenova Erkezhan Muratkyzy – Master of Physics, S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: mailto:muratovna.erke@bk.ru

Ғабдысалық Риза – PhD докторы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
Ғабдысалық Риза – доктор PhD, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Gabdysalyk Riza – PhD, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: riza.gabdysalyk@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_12
SRSTI 53.03.11

CASTING AND ROLLING TECHNOLOGIES, CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

ҚҰЮ-ПРОКАТТАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНЫҢ ҚАЗІРГІ ДЕҢГЕЙІ ЖӘНЕ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

G.A. Smailova [1], **A.E. Uderbayeva** [1*], **B.A. Bekbossynova** [1], **Sh. Koshanova** [2], **A.A. Rysbekova** [2]
[1]Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[2]Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan
*Corresponding author: Uderbayeva Assemgul, e-mail: a.uderbayeva@satbayev.university

Keywords:
casting and rolling mills, metallurgy, rolling production, energy saving, continuous casting, deformation, metal structure.

ABSTRACT
The current development of metallurgical production is characterized by the search for new technological solutions aimed at increasing efficiency, reducing costs, and improving product quality. One of the most promising areas is the combination of continuous casting and rolling processes within casting and rolling units. These complexes allow the use of liquid metal heat, minimize the number of intermediate operations, and increase the productivity of metallurgical enterprises. The article analyzes existing solutions in the field of casting and rolling technologies, considers their advantages and disadvantages, and summarizes global and domestic experience in their implementation. Particular attention is paid to the problems arising during the operation of casting and rolling mills, as well as promising directions for their further development. The results obtained can be used in the modernization of existing enterprises, the design of new production facilities, as well as for educational and scientific purposes.

Түйінді сөздер:
құю-прокаттау орнақтары, металлургия, прокат өндірісі, энергия үнемдеу, үздіксіз құю, деформация, металл құрылымы.

ТҮЙІНДЕМЕ
Металлургия өндірісінің қазіргі заманғы дамуы тиімділікті арттыруға, өзіндік құнды төмендетуге және өнім сапасын жақсартуға бағытталған жаңа технологиялық шешімдерді іздеумен сипатталады. Ең перспективалы бағыттардың бірі құю-прокаттау агрегаттары шеңберінде үздіксіз құю және прокаттау процестерін біріктіру болып табылады. Бұл кешендер сұйық металл жылуын пайдалануға, аралық операциялар санын азайтуға және металлургиялық кәсіпорындардың өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Мақалада құю-прокаттау технологиялары саласындағы қолданыстағы шешімдерге талдау жүргізілді, олардың артықшылықтары мен кемшіліктері қаралды, әлемдік және отан-

© 2026 **G.A. Smailova, A.E. Uderbayeva, B.A. Bekbossynova, Sh. Koshanova, A.A. Rysbekova**
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

дық енгізу тәжірибесі қорытылды. Құю-прокаттау орнақтарын пайдалану кезінде туындайтын проблемаларға, сондай-ақ оларды одан әрі дамытудың перспективалық бағыттарына ерекше назар аударылды. Алынған нәтижелер жұмыс істеп тұрған кәсіпорындарды жаңғырту, жаңа өндірістерді жобалау кезінде, сондай-ақ білім беру және ғылыми мақсаттарда пайдаланылуы мүмкін.

Ключевые слова:
литейно-прокатные станы, металлургия, прокатное производство, энергосбережение, непрерывное литьё, деформация, структура металла.
.

АННОТАЦИЯ

Современное развитие металлургического производства характеризуется поиском новых технологических решений, направленных на повышение эффективности, снижение себестоимости и улучшение качества продукции. Одним из наиболее перспективных направлений является совмещение процессов непрерывного литья и прокатки в рамках литейно-прокатных агрегатов. Данные комплексы позволяют использовать тепло жидкого металла, минимизировать количество промежуточных операций и повысить производительность металлургических предприятий. В статье проведён анализ существующих решений в области литейно-прокатных технологий, рассмотрены их преимущества и недостатки, обобщён мировой и отечественный опыт внедрения. Особое внимание уделено проблемам, возникающим при эксплуатации литейно-прокатных станов, а также перспективным направлениям их дальнейшего развития. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации действующих предприятий, проектировании новых производств, а также в образовательных и научных целях.

INTRODUCTION

The development of metallurgical production in the 21st century is linked to the need to increase energy efficiency, reduce production costs, and improve product quality. In this context, particular attention is paid to technologies that allow individual stages of the production cycle to be combined. One such direction has been the creation of continuous casting and rolling mills (CCRM), which combine the processes of continuous casting and hot rolling. Historically, the idea of combining casting and rolling processes arose at the beginning of the 20th century, but technical limitations long prevented its industrial implementation (Xu et al., 2020). It was only in the 1970s and 1980s that the first successful examples of CPS implementation appeared, primarily in the aluminum industry. Subsequently, the technology was also developed in steel production.

The metallurgical industry has traditionally been one of the basic industries ensuring the functioning and development of mechanical engineering, construction, energy, transport, and many other sectors of the economy. The key task of metallurgy is to produce high-quality metals and alloys with minimal resource and energy costs. In the context of global competition and increasing environmental requirements for production, this task is becoming particularly relevant (SMS Group, 2021).

The classic process for producing finished rolled products involves successive stages of metal smelting, casting into molds, crystallization, cutting ingots into billets, heating them in furnaces, and subsequent rolling. Despite the proven reliability of this approach, it is characterized by significant energy and time costs, as well as the high cost of finished products. In addition, such processes require large production areas and significant capital investments.

In the 20th century, continuous casting technologies (CCT) underwent significant development, enabling a substantial increase in the efficiency of metallurgical processes. However, even the use of CCT casting did not completely eliminate the gap between the casting

and rolling stages: after crystallization, the metal requires additional heating and transportation, which entails additional costs (Lee & Park, 2021).

The solution to this problem was the introduction of continuous casting and rolling mills (CRM), which are integrated units that combine the process of continuous casting and subsequent hot rolling. CLR allow the heat of liquid metal to be used and eliminate a number of intermediate operations, which reduces energy costs, shortens the production cycle, and improves product quality.

The history of casting and rolling technologies spans more than a century. The first experiments combining casting and rolling date back to the late 19th century, but it was only with the development of materials science, thermodynamics, and automated control systems that the industrial implementation of these technologies became possible. Currently, CLR are used for the production of steel and non-ferrous alloys, providing a wide range of rolled and sheet products (Thompson & Bradley, 2019).

A progressive and highly efficient process for producing semi-finished products is continuous casting. The advantages of continuous casting of billets consist not only in a very significant reduction of the overall production cycle for obtaining finished metal and capital costs, but also in a substantial improvement in billet quality due to the uniformity of their structure and a sharp reduction in metal consumption.

The yield of acceptable slabs produced by continuous casting is approximately 20% higher for killed carbon steel and 10–12% higher for rimmed steel compared to ingot rolling on a slabbing mill. In continuous casting of steel billets without stopping the machine, known as “heat-to-heat casting,” the yield of acceptable product increases to 99% due to the reduction of metal losses associated with machine stoppages. At the same time, the productivity of the casting machine increases significantly as a result of raising the machine operating time to 90–95%. The efficiency of continuous casting is also significant in the production of alloy steel.

By properly selecting the conditions of the crystallization process, steels of all grades and compositions can be cast on continuous casting machines, ranging from low-carbon rimmed steels to high-alloy steels. The process of continuous steel casting is readily automated. Continuous casting machines are divided into several main types (Figure 1) (Nippon Steel Corporation, 2019): vertical machines with transverse cutting of the semi-finished product in the vertical position (Figure 1a); vertical machines with bending of the cast metal and cutting in the horizontal position (Figure 1b); radial machines with a constant radius of curvature of the secondary solidification zone (Figure 1c); horizontal machines with single-sided (Figure 1d) and double-sided (Figure 1e) withdrawal of the strand.

The first continuous casting machines for steel billets that found the widest industrial application were vertical-type units. Liquid steel from the steelmaking ladle is fed into an intermediate tundish preheated to approximately 1200 °C. From the tundish, the liquid steel flows into the mold located below. In this mold, the starter bar serves as a movable descending bottom.

In the mold with copper walls, rapid cooling of the liquid metal occurs, resulting in the formation of a solid shell. The steel billet is formed in accordance with the dimensions of the mold.

The mold is continuously cooled by water circulating under pressure between its walls; at the same time, it performs a reciprocating vertical oscillation with an amplitude of 15–30 mm in order to prevent sticking of the liquid metal.

The steel solidifying in the mold adheres to the starter bar and is withdrawn downward by the pulling rolls. In the secondary cooling zone, the billet is cooled by water until complete solidification over the entire cross section. After that, in vertical-type machines, it is cut into measured lengths while remaining in the vertical position and then fed to the rolling mills.

The height of vertical-type continuous casting machines, which depends on a number of factors (billet cross section, chemical composition of the steel, withdrawal speed, and cut length), reaches 40–50 m, which requires high capital and operating costs. At the same time, it should be noted that vertical machines are the most versatile: they are used to cast a wide range of steel grades and to produce billets of various purposes and sizes; moreover, for casting billets of large thickness, they are the simplest and most convenient.

A specific feature of vertical continuous casting machines with bending of the cut billets is that, at the exit from the pulling rolls, the leading end of the billet is bent to the horizontal position, straightened, and cut into measured lengths in the horizontal position. This makes it possible to reduce the height of the machine, simplify the overall casting process, and increase its productivity. However, such machines require a large floor area and powerful equipment for billet straightening.

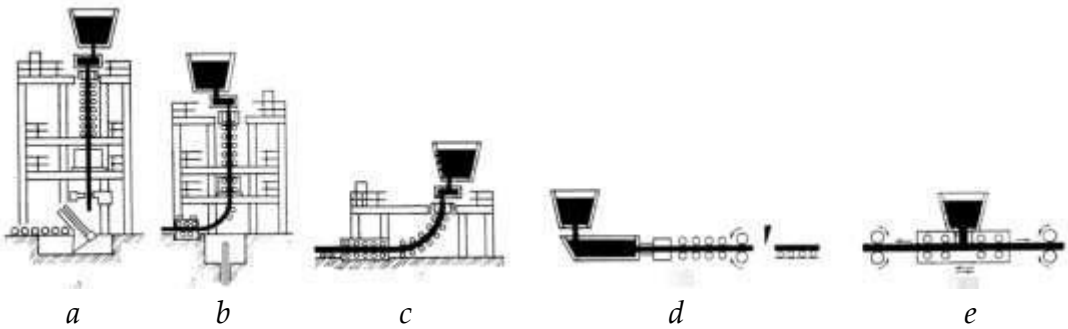


Figure 1. Types of continuous casting installations for billets
Note – compiled by the authors

Radial-type continuous casting machines appeared in the 1960s as a result of efforts to reduce the height of continuous casting installations and to create conditions for combining continuous casting and rolling of metal within a single complex. In this case, the mold and the guiding devices are curved along an arc with a constant radius. Experience has shown that billets produced on radial-type machines are in no way inferior in quality to those produced on vertical-type machines. At the same time, the height of radial continuous casting machines is significantly lower than that of vertical ones, which demonstrates their clear economic advantage (U.S. Steel Corporation, 2018).

On radial-type machines, higher casting speeds can be achieved due to variation in the length of the secondary cooling zone and a high degree of automation, and consequently higher productivity and improved quality of finished products. However, these machines also require large floor areas and powerful straightening equipment. It should also be noted that during straightening, the profile of cast billets is somewhat distorted, and surface cracks may appear on billets made from certain steel grades.

Continuous casting machines (CCMs) usually have several strands. In general, the number of billets cast simultaneously on vertical continuous casting machines, depending on the capacity of the steelmaking ladle as well as the cross section of the cast billet, may reach up to eight.

A further achievement in the development of continuous casting machines was the creation of horizontal-type machines (see Figure 1 d and e). Such machines have a height of no more than 8 m, do not require tall buildings, and significantly reduce shop construction costs. To stabilize the process of withdrawing metal from the mold, a method of producing two strands from a single mold is employed. Steel entering such a mold has two solidification fronts. As a

result, structural and surface defects of the strand that occur during single-sided withdrawal are eliminated.

A highly promising method for improving the quality of metal produced on continuous casting machines is electromagnetic stirring of the metal during the crystallization process. This leads to a more uniform structure and a reduction in axial porosity of the strands.

Continuous casting machines produce slabs with cross sections of (120–250) × (900–1850) mm², blooms with a cross section of 280 × 280 mm², as well as billets of smaller cross sections. The casting speed ranges from 0.7 to 2.0 m/min. The productivity of continuous casting machines depends on the casting speed, the number of strands, and the range of produced cross sections.

At present, the problem of integrating continuous casting machines and rolling mills into a single complex is the main direction for improving the efficiency of the entire metallurgical production process. Solving this problem would make it possible to utilize the internal heat of cast billets, reduce metal losses due to oxidation during reheating in furnaces, and significantly decrease metal losses during billet cutting.

However, the implementation of integrated operation of continuous casting machines and rolling mills in a single continuous flow during the production of steel sections is extremely difficult (much more difficult than in the production of non-ferrous metal profiles), primarily due to the large difference between the exit speed of the cast semi-finished product from the continuous casting machine and the rolling speed of this product on the mills (U.S. Steel Corporation, 2018).

Full integration of continuous casting machines with rolling mills is possible by increasing the withdrawal speed of the cast billet from the machine, as well as by using special rolling mills as an intermediate link between the continuous casting machine and the finishing rolling mills. These mills operate at an entry speed corresponding to the speed of the continuous casting machine and provide high reduction ratios of 20–40 (planetary mills).

Integration of continuous casting of steel billets with rolling is possible when using multi-strand continuous casting machines equipped with several molds. In this case, the billets exiting the molds must be cut and fed sequentially into the rolling mill. Experience in the combined operation of continuous casting machines and rolling mills shows that, when producing finished sheets of varying widths, the most technologically efficient and economically justified solution is the use of slab molds with rapidly adjustable dimensions.

When casting slabs of constant dimensions while producing finished sheets of different widths, reducing devices are required, by means of which the slabs can be width-reduced to the required sizes (Salunkhe & Venkataraman, 2022). For slab width reduction and thickness reduction, reducing stands with vertical and horizontal rolls may be employed; these stands are installed downstream of the continuous casting machines.

The relevance of this topic is determined by a number of factors: the need to reduce energy consumption and production costs; growing demands on the quality of rolled metal products; the need to increase productivity while minimizing capital investments; and increased competition in the global metal products market.

The purpose of this work is to analyze the state and prospects of development of casting and rolling technologies in modern metallurgical production. To achieve this, we will consider: the main methods of combining casting and rolling processes; global and domestic experience in implementing LPS; the advantages and disadvantages of existing solutions; promising areas for technological development (Chernov, 2017).

Thus, the introduction of casting and rolling units into industrial practice is one of the key factors in the modernization of metallurgy, allowing it to increase its efficiency and competitiveness in the face of modern challenges.

MATERIALS AND METHODS

The methodological basis of this study is based on a systematic analysis of literary sources, patent information, the results of experimental and production tests of casting and rolling mills, as well as statistical data from leading metallurgical enterprises (Salunkhe & Venkataraman, 2022; Chernov, 2017). This comprehensive approach made it possible not only to summarize the accumulated global and domestic experience, but also to identify general patterns in the development of combined casting and rolling technologies.

The study used the following groups of materials: scientific publications in domestic and foreign journals devoted to the theoretical and practical aspects of the operation of casting and rolling mills; monographs and textbooks summarizing the fundamental principles of metallurgical processes; patent developments reflecting new technical solutions in the field of mold designs, rolling stands, and automatic control systems; reports from industrial enterprises containing data on the implementation of LPS and their operational characteristics; comparative studies published by international research organizations (Nalimov, 2010).

A set of methods was used to achieve the set goals: Historical and technical analysis was used to study the evolution of ideas for combining casting and rolling processes from the first experimental installations to modern industrial units. Comparative analysis made it possible to classify the methods of combination and identify their advantages and disadvantages. System approach - provided an opportunity for a comprehensive review of casting and rolling technologies, considering the relationship between equipment design, process parameters, and the quality of the final product; Generalization of experimental data - used to compare the results of LPS implementation in different countries and at enterprises of different capacities.

The efficiency of the continuous casting process for slabs, blooms, or other semi-finished products intended for subsequent rolling is well known. However, this efficiency increases even further when the casting and rolling processes are combined within a single unit or mill. The application of this technological process for producing rolled products by a continuous method directly from liquid metal opens up broad prospects for improving the efficiency of metallurgical production.

With this technology, it becomes possible to utilize the primary heat of the strand for deformation, eliminate intermediate storage of metal, and achieve complete continuity of the casting and rolling processes, which ensures a sharp increase in labor productivity.

The machines included in the aggregate for implementing this process become more compact; their weight and the required production area are reduced. Along with operational advantages, specific capital investments are also significantly reduced. Among the known methods of combining rolling with continuous casting, the following should be noted:1) liquid metal is fed directly into the roll gap; 2) the crystallization process begins separately from deformation, but rolling starts while the core of the strand is still in the liquid state; 3) rolling of the continuously formed strand is carried out after the completion of crystallization.

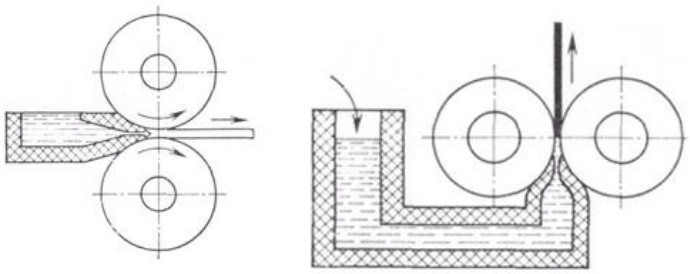
The first method was proposed by Bessemer and was called ingotless rolling; however, at that time it could not be practically implemented.

In the 1930s, pilot mills specially designed to develop this process for both non-ferrous metals and steel were built in the United States and the former USSR. However, positive results were not achieved, and the mills had to be dismantled. The main drawback of this method was the rupture of the metal shell formed at the very initial stage of contact between the liquid metal and the rolls, which caused structural inhomogeneity of the metal and other defects.

Subsequently, this process was significantly improved by feeding the metal not directly onto the rolls, but through guides installed between the rolls. This made it possible to stabilize the bite angle, which must be relatively small and constant.

In this form, the ingotless rolling process was successfully developed in two variants described below (Solovyov, 2022).

1. Liquid aluminum is fed through a distribution box into the roll gap formed by two horizontal rolls arranged one above the other (Figure 2a). Upon contact with the rolls, the liquid aluminum crystallizes, and the resulting strip exits the rolls continuously. Variant 1 is used at a number of plants in CIS countries for the production of aluminum strip in coils with a thickness of 8-12 mm, a width of 1030 mm, and a mass exceeding 2 t. The application of this technology instead of rolling strip from an ingot provided a substantial economic effect not only at the rolling stage itself, but also during subsequent processing of the coil due to the significant increase in its mass.



a	b

Figure 2. Diagram of continuous casting of aluminum strip:
a – with a horizontal crystallizer; b – with a vertical crystallizer
Note – compiled by the authors

2. The second variant of ingotless rolling differs from the one described above in that both rolls are arranged in the same horizontal plane, and liquid aluminum is fed into the roll gap from bottom to top, also through a distribution guide; however, in this case the guide is positioned vertically (Figure 2b). For the implementation of this process, several mills were built for the production of aluminum strip with widths of up to 1000–1600 mm and thicknesses of 3-8 mm. These mills are successfully operated at the Mikhailovsky and Kanaker aluminum plants, as well as at the Nachterstedt plant (Germany). The production cost of 1 t of aluminum sheet manufactured using Variant 2 is lower than that of Variant 1.

A slab continuous casting machine at the Keihin plant (Japan) is equipped with a device by means of which a slab containing a liquid phase is slightly reduced while passing through roller guides. This makes it possible to prevent the formation of axial segregation at the final stage of solidification. The slab width ranges from 600 to 2240 mm, and the thickness is 232 mm.

The second method is characterized by partial separation of the crystallization and deformation processes; however, since rolling begins while the core of the strand is still in the liquid state (Figure 3), the rolls are positioned close to the mold (Ivanov & Titov, 2021).

This method began to be applied several years ago in Austria for steel production using molds of the classical type with copper walls, along which the shell of the forming strand slides. This process makes it possible to eliminate the formation of a shrinkage cavity in the central part of the strand. However, in this case deformation occurs at the temperature corresponding to the transition of the metal from the liquid phase to the solid phase, when the plastic properties of the metal are very low. As a result, cracks may form in the central part of the strand; these cracks can be filled with the mother liquor enriched with alloying elements, which may lead to structural inhomogeneity of the strand. In addition, the mother liquor is displaced toward the trailing part of the strand, which will inevitably cause non-uniformity of the chemical composition along the strand length.

Despite this drawback, the described method has nevertheless found application in steel production. Thus, in Germany an installation has been built in which steel billets with a cross section of 160 × 160 mm are cast and then rolled without cutting in a continuous mill equipped with two horizontal and two vertical stands, reducing the section to 90 × 90 mm.

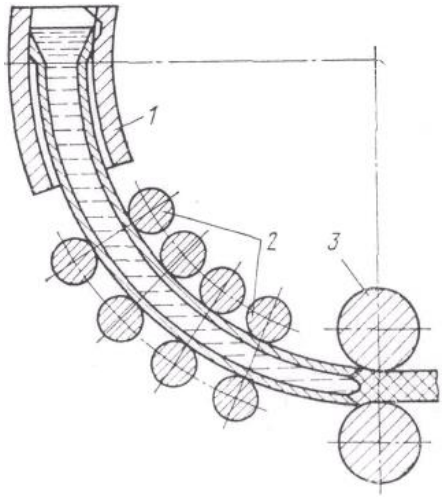


Figure 3. Schematic diagram of the combined process of continuous casting and subsequent rolling of metal in the two-phase state: 1 – mold; 2 – roller zone of secondary cooling; 3 – rolls of the first stand of the continuous rolling mill
Note – compiled by the authors

In recent years, there have been no reports on further dissemination of this method. For most steel grades, its application does not ensure high quality of rolled products. This method has also proven unsuitable for aluminum and other non-ferrous metals. However, it is очевидно that this process may occasionally occur in the ingotless rolling methods discussed above. If the peripheral speed of the rolls is increased, crystallization may shift into the deformation zone or even beyond it.

The third method consists in rolling the continuously formed strand after the completion of crystallization (Petrov & Loginov, 2020). Compared with the previous method, this approach provides the highest metal quality. In any case, rolling does not reduce the homogeneity of the continuously cast metal; its mechanical properties are improved and the possible product range is expanded. In research and in the practical implementation of results, this method has been adopted by VNIImetmash as the principal approach for combining rolling with continuous casting of aluminum, copper, steel, zinc, and other materials.

Data on the implementation of casting and rolling mills in various countries was used for analysis: Japanese enterprises (Keihin Works, Nippon Steel) - serial production of thin strips using a combination of casting and rolling; United States Steel (USA) - use of continuous casting machines with integrated rolling, providing a capacity of up to 20,000 tons/day; plants in Germany and Austria - use of planetary and forging-rolling units.

Thus, the materials and research methods represent a combination of theoretical analysis and generalization of practical experience in the operation of casting and rolling complexes, which ensures the objectivity and reliability of the results obtained.

RESULTS AND DISCUSSION

The development of casting and rolling mills (CRM) is a natural stage in the evolution of metallurgical production. The combination of casting and rolling processes is aimed at solving several key tasks at once: reducing production costs, reducing energy consumption, improving

the quality of rolled metal, and shortening the production cycle (Nippon Steel Corporation et al., 2019, Chernov et al., 2017).

An analysis of patent and technical literature shows that in recent decades, the integration of continuous casting and hot rolling has become a priority. Unlike the traditional "casting - solidification - heating - rolling" scheme, the casting-rolling method eliminates the intermediate heating stage, allowing the use of crystallization heat. This significantly reduces energy consumption and increases the efficiency of the entire process.

The study showed that integrating casting and rolling processes provides the following advantages: Energy savings: using crystallization heat reduces fuel consumption by 20 - 30%; Shortened production cycle: eliminating secondary heating and intermediate storage reduces the cycle time by almost half. Reduced capital costs: continuous casting requires less space, fewer furnaces, and less auxiliary equipment. Improved metal structure: intensive deformation during crystallization contributes to grain refinement and improved mechanical properties. Production flexibility: a wide range of products can be manufactured, from thin strips to structural and shaped profiles (Fedorov, 2022,Thompson & Bradley, 2019; Nippon Steel Corporation, 2019).

Despite the obvious advantages, the implementation of LPS has revealed a number of problems that hinder their widespread use: The complexity of temperature control - any deviation from the optimal parameters can lead to the formation of cracks and internal defects; Limited thickness of the workpiece - continuous casting works most effectively with strip thicknesses of up to 70 - 100 mm. With larger sizes, difficulties arise with uniform cooling; High requirements for the quality of the source metal - the presence of non-metallic inclusions or variations in composition have a negative effect on rollability; Increased loads on equipment - the need to work with hot metal requires the use of materials with high thermal and wear resistance (U.S. Steel Corporation, 2018; Salunkhe & Venkataraman, 2022).

Industrial implementation examples. International experience.

Japan: Nippon Steel has developed industrial continuous casting machines for producing thin steel strips with a thickness of 2 - 3 mm directly from a liquid bath. The economic effect was manifested in a 25% reduction in energy costs and a 15% increase in productivity.

USA: U.S. Steel Corporation has implemented installations that integrate continuous casting and hot rolling. These complexes produce up to 20,000 tons of product per day, making them among the most productive in the world.

Germany: SMS Group is actively developing planetary rolling mills that allow the combination of casting and rolling of ingots wider than 1.5 m.

To evaluate the effectiveness of the CRM, a comparative analysis was conducted with the traditional "casting - heating - rolling" process (Table 1) (Petrov, Loginov, 2020).

Table 1. Comparative characteristics of the traditional production process and casting and rolling mills (CRM)

Indicator	Traditional scheme	CRM	Economic effect
Energy consumption, Gcal/t	1,2 - 1,4	0,8 - 0,9	25 - 30 %
Cycle duration, h	6 - 8	3 - 4	40 - 50 %
Equipment metal consumption	high	20- 25% lower	reduction in capital investments
Structural quality	heterogeneous	finer grain	improved properties
Productivity	standard	10- 15% higher	increase in output
Note – compiled by the author based on (Petrov, Loginov, 2020)			

The results of the analysis show that casting and rolling technology in most cases is more efficient and competitive compared to traditional technology.

An analysis of current trends allows us to identify several areas for improving the CRM:

1. Development of new mold designs that ensure more uniform cooling and reduce the risk of defects.

2. Use of high-temperature alloys and refractory materials to increase equipment reliability.

3. Automation and digitalization of processes - use of intelligent control systems to stabilize parameters.

4. Adaptation of continuous casting machines for the production of high-alloy and special steels required in the aviation, energy, and defense industries.

5. Combination with additive technologies - in the future, it may be possible to create hybrid production complexes where the billet is formed in a continuous casting machine and further processing is carried out using 3D printing methods.

The results of the analysis show that casting and rolling technologies have high potential for further development in metallurgy. Their implementation makes it possible to solve problems related to increasing energy efficiency, reducing production costs, and improving product quality. For the scientific community, it is important to identify the patterns of metal structure formation when combining processes, which opens up new avenues for research in the field of physical metallurgy and materials science.

Foreign experience (Japan, USA, Germany) demonstrates the high efficiency of LPS in the mass production of thin strips. Domestic experience also confirms the feasibility of using this technology, especially in aluminum production. A comparative analysis showed a 20-30% reduction in energy consumption, a nearly twofold reduction in cycle time, and a 10-15% increase in productivity (Kuzina & Arsentyev, 2021; Tarasov, 2019; Zaitsev, 2020).

Prospects for development are linked to improvements in mold designs, the use of new materials, the digitization of control systems, and the expansion of the product range to include high-alloy steels.

CONCLUSION

The analysis of the development and implementation of continuous casting and rolling mills (CRM) allows us to draw the following conclusions:

1. The combination of casting and rolling processes is one of the most promising areas of development in modern metallurgy. It reduces the energy intensity of production, shortens the production cycle, and improves product quality.

2. A comparative analysis has shown that the use of LPS reduces energy consumption by 20- 30%, shortens the cycle time by almost half, and increases productivity by 10-15% compared to traditional schemes.

3. Industrial experience with the implementation of LPS in Japan, the USA, and Germany has confirmed its high efficiency. Particularly significant results have been achieved in the production of thin strip and aluminum tape.

4. The main limitations of the technology are related to the need for strict temperature control, limited blank thickness, and increased requirements for the quality of the source metal. These problems are holding back the widespread use of CRM.

5. Promising areas for development include improving the design of crystallizers, introducing new materials for rolling mill working parts, digitizing process control, and expanding the product range by working with high-alloy steels and alloys.

6. In the long term, casting and rolling technologies are capable of occupying a key position in the metallurgical complex, ensuring the sustainable development of the industry by reducing

production costs and improving the quality and environmental friendliness of production. Thus, the results of the study confirm that casting and rolling mills are not only a technical but also a strategic solution that can determine the competitiveness of metallurgical enterprises in the global market.

CONFLICTS OF INTEREST: The authors declare that they have no conflicts of interest.

NOTICE ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors of the scientific articles did not use artificial intelligence (AI) tools in the preparation of their works.

REFERENCES

Xu, C., Li, J., & Zhang, T. (2020). Recent developments in continuous casting and rolling. Journal of Materials Processing Technology, 285, 116–125. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116125

SMS Group. (2021). Advanced technologies for casting and rolling. https://www.sms-group.com/

Lee, S., & Park, J. H. (2021). Optimization of thermo-mechanical rolling processes in modern steelmaking. Metallurgical and Materials Transactions B, 52(1), 221–233. https://doi.org/10.1007/s11663-020-02002-3

Thompson, R., & Bradley, M. (2019). Integrated design approaches for high-efficiency rolling mills. Ironmaking & Steelmaking, 46(7), 589–598. https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1533887

Nippon Steel Corporation. (2019). Technical reports on continuous casting and rolling. https://www.nipponsteel.com/

U.S. Steel Corporation. (2018). Innovations in integrated casting and rolling. https://www.ussteel.com/

Salunkhe, P., & Venkataraman, A. (2022). Advances in predictive modeling for continuous casting. Materials Today Communications, 32, 104–112. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104007

Чернов, Н. И. (2017). Металлургические процессы и оборудование. Политех-Пресс. https://polytech.example.ru/ // Chernov, N. I. (2017). Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie [Metallurgical processes and equipment]. Politekh-Press. https://polytech.example.ru/ (In Russ.)

Налимов, А. А. (2010). Теоретические основы прокатного производства. Машиностроение. https://mashinostroenie.example.ru/ // Nalimov, A. A. (2010). Teoreticheskie osnovy prokatnogo proizvodstva [Theoretical foundations of rolling production]. Mashinostroenie. https://mashinostroenie.example.ru/ (In Russ.)

Соловьев, В. А. (2022). Металлургические агрегаты нового поколения. Наука. https://nauka.example.ru/ // Solovyov, V. A. (2022). Metallurgicheskie agregaty novogo pokoleniya [New generation metallurgical units]. Nauka. https://nauka.example.ru/ (In Russ.)

Иванов, И. П., & Титов, Д. С. (2021). Энергоэффективность металлургического производства. ЮУрГУ. https://susu.example.ru/ // Ivanov, I. P., & Titov, D. S. (2021). Energoeffektivnost metallurgicheskogo proizvodstva [Energy efficiency of metallurgical production]. YuUrGU. https://susu.example.ru/ (In Russ.)

Петров, А.В., & Логинов, П. С. (2020). Цифровые модели оптимизации процессов прокатки. Металлург, (10), 45–53. https://metallurg.example.ru/ // Petrov, A.V., & Loginov, P.S. (2020). Tsifrovye modeli optimizatsii protsessov prokatki [Digital optimization models for rolling processes]. Metallurg, (10), 45–53. https://metallurg.example.ru/ (In Russ.)

Федоров, С.Н. (2022). Моделирование затвердевания сляба в машинах непрерывного литья заготовок. Сталь, (5), 18–25. https://stal.example.ru/ // Fedorov, S.N. (2022). Modelirovanie zatverdevaniya slyaba v mashinakh nepreryvnogo lit'ya zagotovok [Simulation of slab solidification in continuous casters]. Stal', (5), 18–25. https://stal.example.ru/ (In Russ.)

Кузина, М.В., & Арсентьев, Д. Д. (2021). Системы автоматизации в современных прокатных станах. Вестник МГТУ, (4), 112–120. https://bmstu.example.ru/ // Kuzina, M.V., & Arsentyev, D.D. (2021). Sistemy avtomatizatsii v sovremennykh prokatnykh stanakh [Automation systems in modern rolling mills]. Vestnik MGTU, (4), 112–120. https://bmstu.example.ru/ (In Russ.)

Тарасов, П. Ю. (2019). Инновационные методы охлаждения при прокатке стали. Черная металлургия, (12), 63–70. https://metalurji.example.ru/ // Tarasov, P. Yu. (2019). Innovatsionnye metody okhlazhdeniya pri prokatke stali [Innovative cooling techniques in steel rolling]. Chernaya metallurgiya, (12), 63–70. https://metalurji.example.ru/ (In Russ.)

Зайцев, Е. В. (2020). Математическое моделирование деформации при горячей прокатке. Известия вузов. Черная металлургия, (1), 33–41. https://izvuz-metall.example.ru/ // Zaitsev, E. V. (2020). Matematicheskoe modelirovanie deformatsii pri goryachey prokatke [Mathematical modeling of hot rolling deformation]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya, (1), 33–41. https://izvuz-metall.example.ru/ (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Смаилова Гулбаршын Абылкасымовна – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан
Смаилова Гулбаршын Абылкасымовна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
Smailova Gulbarshyn – PhD, Associate Professor, K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: g.smailova@satbayev.university,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2293-6232

Удербаева Асемгуль Еркинбековна – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан
Удербаева Асемгуль Еркинбековна – доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
Uderbayeva Assemgul – PhD, Associate Professor, K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: a.uderbayeva@satbayev.university,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1641-7404

Бекбосынова Баглан Асылхановна – PhD докторы, оқытушы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан
Бекбосынова Баглан Асылхановна – доктор PhD, преподаватель, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
Bekbossynova Baglan преподаватель – PhD, lecturer, K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: Bekbosynova_bagl@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6642-3431

Кошанова Шолпан Кенгановна – техника ғылымдарының магистры, аға оқытушы, Қазақстан Азаматтық авиация академиясы, Алматы қ., Қазақстан
Кошанова Шолпан Кенгановна – магистр технических наук, старший преподаватель. Казахстанская Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан
Koshanova Sholpan – Master of technical sciences, Senior lecturer,. Academy of Civil Aviation Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
e-mail: s.koshanova@agakaz.kz
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6623-7743

Рысбекова Айнара Амангелдіқызы – аға оқытушы, Қазақстан Азаматтық авиация академиясы, Алматы қ., Қазақстан
Рысбекова Айнара Амангелдиевна – сеньор-лектор, Казахстанская Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан
Rysbekova Ainara – Senior Lecturer, Academy of Civil Aviation Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
e-mail: a.rysbekova@agakaz.kz
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9878-7029

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_13
МРНТИ 36.29.33

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ПОЛУЧЕНИЮ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ, ЛИДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АЭРОФОТОТҮСІРІС, ЛИДАР ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ МЕН ЖЕРДЕГІ ЛАЗЕРЛІК СКАНЕРЛЕУДІҢ ҮЙЛЕСІМІ НЕГІЗІНДЕ ГЕОКЕҢІСТІКТІК ДЕРЕКТЕРДІ АЛУҒА КЕШЕНДІ ТӘСІЛДІ ҚОЛДАНУ

APPLICATION OF AN INTEGRATED APPROACH TO GEOSPATIAL DATA ACQUISITION BASED ON A COMBINATION OF AERIAL PHOTOGRAPHY, LIDAR TECHNOLOGIES AND GROUND-BASED LASER SCANNING

М.М. Тогузова [1], М.Е. Рахымбердина [1], А.К. Капасов [1*], Б. Апшикур [1], А.К. Абдыгалиева [1]
[1]НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева»,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан
*Автор-корреспондент: Капасов Азамат Кайсарович, e-mail: AKapasov@edu.ektu.kz

Ключевые слова:
Лазерное сканирование, мультиспектральные данные, БПЛА, цифровая модель местности, ортофотоплан, геоинформационный анализ, аэрофотосъемка, лидарные технологии.

АННОТАЦИЯ
В статье представлен комплексный подход к обработке данных полевых геологических обследований с использованием ГИС-технологий. Интегрированы изображения с беспилотных летательных аппаратов (в т.ч. мультиспектральные), данные лидарного сканирования. Получены высокодетализированные ортофотопланы, цифровые модели рельефа и 3D-модели исследуемого участка, отражающие сложное строение обнажений. Показано, что совместная обработка фотограмметрических, мультиспектральных и лидарных данных повышает точность выявления геологических структур по сравнению с разрозненным применением методов. Научная новизна работы – применение комплексного подхода к получению геопространственных данных на основе сочетания аэрофотосъемки, лидарных технологий и наземного лазерного сканирования и разработка единого метода комплексного использования разнородных данных для геологического картирования. Результаты могут найти применение при поиске месторождений редких металлов, инженерно-геологических изысканиях и мониторинге опасных процессов.

Түйінді сөздер:
Лазерлік сканерлеу, мультиспектрлік

ТҮЙІНДЕМЕ
Мақалада ГАЖ технологияларын қолдана отырып, далалық геологиялық зерттеулердің деректерін өңдеудің кешенді тәсілі келтіріл-

© 2026 **М.М. Тогузова, М.Е. Рахымбердина, А.К. Капасов, Б. Апшикур, А.К. Абдыгалиева**
Данная работа распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

деректер, ұшқышсыз ұшу аппараттары, жергілікті жердің цифрлық моделі, ортофотоплан, геоақпараттық талдау, аэрофототүсіріс, лидар технологиялары.

ген. Ұшқышсыз ұшу аппараттарының суреттері (оның ішінде мультиспектральды), лидар сканерлеу деректері біріктірілген. Жоғары егжей-тегжейлі ортофотопландар, сандық рельефтік модельдер және экспозициялардың күрделі құрылымын көрсететін зерттелетін учаскенің 3D модельдері алынды. Фотограмметриялық, мультиспектрлік және лидар деректерін бірлесіп өңдеу әдістерді шашыраңқы қолданумен салыстырғанда геологиялық құрылым-дарды анықтау дәлдігін арттыратыны көрсетілген. Жұмыстың ғылыми жаңалығы-аэрофототүсірілім, лидар технологиялары мен жердегі лазерлік сканерлеудің үйлесімі негізінде геокеңістіктік деректерді алуға кешенді тәсілді қолдану және геологиялық картаға түсіру үшін гетерогенді деректерді біріктірудің бірыңғай әдісін әзірлеу. Нәтижелер сирек металдар кен орындарын іздеуде, инженерлік-геологиялық зерттеулерде және қауіпті процестерді бақылауда қолданыла алады.

keywords:
Laser scanning, multispectral data, UAV, digital terrain model, orthophotoplane, geoinformation analysis, aerial photography, lidar technologies.

ABSTRACT
The article presents an integrated approach to processing field geological survey data using GIS technologies. Integrated images from unmanned aerial vehicles (including multispectral), lidar scanning data. Highly detailed orthophotographs, digital relief models, and 3D models of the area under study were obtained, reflecting the complex structure of the outcrops. It is shown that the combined processing of photogrammetric, multispectral, and lidar data improves the accuracy of detecting geological structures compared with the disparate use of methods. The scientific novelty of the work is the application of an integrated approach to obtaining geospatial data based on a combination of aerial photography, lidar technologies and ground–based laser scanning and the development of a single method for integrating heterogeneous data for geological mapping. The results can be used in the search for deposits of rare metals, engineering and geological surveys and monitoring of hazardous processes.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсификации геологических исследований и перехода к цифровым методам анализа пространственных данных возрастает роль геоинформационных технологий в обработке материалов полевых обследований. Современные геологические объекты, особенно участки с обнажением горных пород, характеризуются высокой структурной сложностью, пространственной неоднородностью и динамичностью процессов. Это требует применения комплексных методов сбора и анализа данных, обеспечивающих высокую точность, воспроизводимость и наглядность результатов.

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью интеграции разнородных источников пространственной информации, включая данные беспилотных летательных аппаратов, лазерного сканирования в единую геоинформационную среду. Традиционные методы полевых геологических наблюдений, основанные преимущественно на визуальных описаниях и локальных измерениях, обладают ограниченной пространственной репрезентативностью и не всегда позволяют выявить скрытые закономерности строения и развития геологических объектов. Использование ГИС и данных дистанционного зондирования расширяет аналитические возможности исследований, повышает детальность картографических материалов и способствует более глубокому пониманию геологической структуры территории.

В научных исследованиях последних лет геоинформационное картографирование рассматривается как базовый инструмент интеграции и анализа пространственных данных

в геологии. В работах зарубежных авторов подчеркивается, что использование ГИС позволяет эффективно объединять результаты полевых наблюдений, дистанционного зондирования и геофизических измерений, обеспечивая целостное представление о геологическом строении территории. Существенный вклад в развитие теоретических и прикладных аспектов геоинформационного анализа внесли исследования авторов (Longley et. al., 2015, Chen et. al., 2021), в которых ГИС рассматривается как универсальная платформа для пространственного моделирования природных процессов.

Фотограмметрическая реконструкция и построение цифровых моделей рельефа и поверхности получили широкое распространение благодаря развитию технологий беспилотной аэрофотосъемки. В зарубежной литературе подробно описаны возможности БПЛА для детального картографирования обнажений горных пород, анализа тектонических структур и морфологии рельефа. Работы (Westoby et. al., 2012, Bupathy , 2021, Carrivick et. al., 2016) демонстрируют высокую точность цифровых моделей, полученных методом Structure from Motion, и их применимость для геологических и геоморфологических исследований. Отдельное направление составляют исследования, посвященные использованию лазерного сканирования, включая наземное и воздушное сканирование с технологией LiDAR, для построения высокоточных облаков точек и выявления мелкомасштабных структурных элементов (LaRue et. al., 2020).

В казахстанской научной литературе вопросы применения ГИС и данных дистанционного зондирования в геологических и геоэкологических исследованиях также активно поднимаются. В работах отечественных авторов (Alpysbay et. al., 2024, Alibekova et. al, 2023) рассматриваются возможности использования космических снимков и цифровых моделей рельефа для геологического картографирования, оценки инженерно-геологических условий и мониторинга природных процессов. Ряд исследований, выполненных на примере регионов Восточного и Юго-Восточного Казахстана (Рафиков и др., 2024, Ulykpanova, 2024), подтверждает эффективность интеграции полевых данных и материалов дистанционного зондирования в ГИС-среде при изучении сложных геологических объектов.

Вместе с тем анализ научных публикаций показывает, что при наличии значительного количества работ, посвященных отдельным методам – БПЛА-съемке, лазерному сканированию или дистанционному зондированию – вопросы их комплексной обработки и совместного анализа для конкретных геологических объектов, особенно участков с обнажением пород, остаются недостаточно структурированными. Это определяет необходимость дальнейшего методического развития геоинформационных подходов, ориентированных на интеграцию разнородных полевых и дистанционных данных в рамках единого технологического процесса.

Целью данного исследования является разработка и апробация подхода к геоинформационной обработке и анализу данных полевого обследования для геологических исследований на основе объединения данных БПЛА, лазерного сканирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на геологическом объекте с обнажениями горных пород и сложным рельефом, расположенном вблизи села Таргын (Восточный Казахстан) (рисунок 1).

Полевой этап включал комплексную съемку территории с применением современных геодезических и дистанционных технологий. Для аэрофотосъемки использовался мультиспектральный дрон senseFly eBee X, регистрирующий изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также DJI Phantom 4 Multispectral. Для повышения точности позиционирования была выполнена геодезическая съемка опорных точек с помощью двухчастотного GNSS-приемника Trimble SP60 в режиме RTK, что

обеспечило сантиметровую точность координат. Дополнительно осуществлялось наземное лазерное сканирование с использованием сканера Trimble SX12, позволившее детально зафиксировать рельеф и объекты на местности. Предварительная калибровка оборудования перед съемкой гарантировала высокое качество исходных данных.

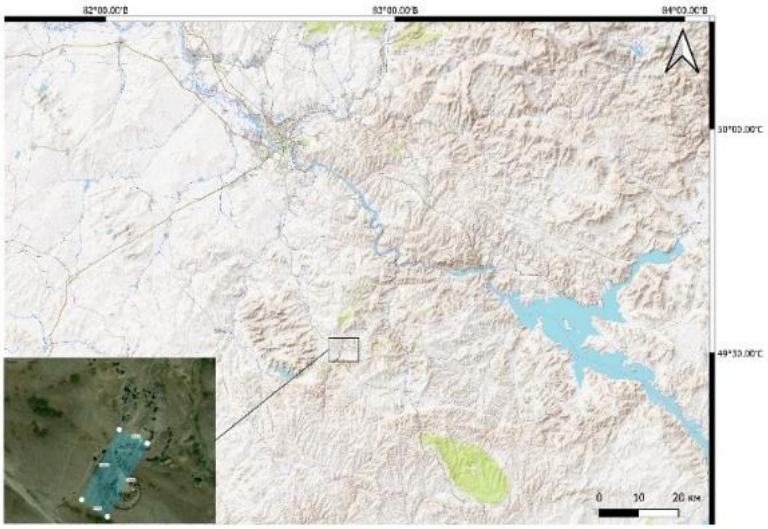


Рисунок 1. Объект исследования
Примечание – составлено авторами

Собранные полевые данные были обработаны с помощью специализированного программного обеспечения (Agisoft Metashape, DJI Terra, QGIS) в единой геоинформационной системе. Методологической основой исследования послужили методы цифрового моделирования рельефа, фотограмметрической обработки изображений и дистанционного зондирования Земли. Комплексное применение этих методов позволило интегрировать разнородные пространственные данные, выровнять их в общей координатной системе и получить достоверное представление об исследуемой территории для последующей геологической интерпретации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Камеральная обработка является завершающим и наиболее аналитически значимым этапом комплексных геодезических и дистанционных исследований. Именно на этой стадии выполняются систематизация, проверка и интеграция всех пространственных данных, полученных в ходе полевых наблюдений – аэрофотосъемки, лидарного сканирования, GNSS-измерений и наземного лазерного сканирования.

Главная цель камеральной обработки заключается в преобразовании необработанных полевых данных в структурированные цифровые модели и тематические картографические продукты, пригодные для последующего анализа в геоинформационных системах (ГИС). На данном этапе обеспечивается согласование координатных систем, устранение геометрических и радиометрических искажений, а также создание ортофотопланов, цифровых моделей рельефа (ЦМР) и трехмерных визуализаций исследуемых территорий.

Значимость камерального этапа определяется тем, что качество и точность итоговых цифровых карт зависят не только от примененного оборудования, но и от корректности алгоритмов обработки данных, выбранных параметров фильтрации и методов совмещения данных различных источников.

Камеральная обработка данных дистанционного зондирования и полевых обследований опирается на принципы геоинформационного картографирования и цифрового моделирования геосистем (Chaminé et. al, 2021, Farella et. al, 2023).

В процессе обработки реализуются следующие ключевые этапы:

1) импорт и систематизация данных – объединение фотограмметрических, лидарных, мультиспектральных и GNSS-измерений в единую координатную систему;

2) фильтрация и классификация данных – удаление шумов, выделение земной поверхности и тематических объектов;

3) геометрическая коррекция – выравнивание изображений и облаков точек с учетом параметров полета и калибровки оборудования;

4) радиометрическая коррекция – нормализация яркостных характеристик изображений для обеспечения однородности визуального восприятия и достоверности спектрального анализа;

5) построение цифровых моделей (DEM, DSM) – формирование трехмерных представлений рельефа и поверхностных структур;

6) интеграция и визуализация данных в ГИС – создание тематических слоев, построение ортофотопланов и аналитических карт.

Фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков выполнялась с использованием алгоритмов пространственной триангуляции, что позволило вычислить координаты точек по перекрывающимся изображениям с высокой точностью (Чибуничев, 2022, Remondino, 2022). Лидарные данные формировались на основе измерения времени пролета лазерного импульса, обеспечивая построение облаков точек предельно высокой плотности и точности (Altuntas, 2023, Haala, 2021). В совокупности применение этих технологий позволило получить детальные цифровые модели рельефа и поверхности, которые служат основой для дальнейшего геоинформационного анализа и построения тематических карт. Использование специализированных программных комплексов обеспечило автоматизацию описанных операций, оптимизацию вычислений и корректное совмещение разнородных форматов данных.

Таким образом, камеральная обработка является важным этапом в создании цифровых моделей рельефа природных и техногенных объектов, обеспечивая научную достоверность, метрическую точность и аналитическую глубину пространственных исследований.

В весенне-летний период 2025 года в пределах территории, расположенной между населенными пунктами Огневка и Сагыр, были выполнены комплексные полевые исследования с использованием БПЛА, лидарных и спутниковых геодезических технологий с целью получения детализированных пространственных данных для формирования ЦМР и трехмерной визуализации исследуемой местности. Собранные данные предназначены для последующего построения цифровых моделей рельефа природных и техногенных месторождений редких металлов.

Полевой этап включал подготовку оборудования, разработку маршрутов аэрофотосъемки, установку мобильной GNSS-станции, выполнение наземного лазерного сканирования и геодезических измерений (рисунок 2). Такой комплексный подход обеспечил высокую детализацию данных и возможность их интеграции в единую пространственно-координатную систему.

Для организации аэрофотосъемочных работ с использованием БПЛА senseFly eBee X применялось программное обеспечение eMotion, предназначенное для планирования и управления миссиями. На рисунке 3 показана рабочая зона миссии, в пределах которой был спланирован маршрут полета. В программе задавались границы полигона съемки, направление пролетов, ключевые точки маршрута и параметры полета, включая:

– высоту съемки (в среднем 100–120 м для обеспечения оптимального пространственного разрешения);

– скорость движения дрона (5–7 м/с для исключения смазывания изображений);
– углы обзора камеры;
– коэффициенты продольного и поперечного перекрытия снимков (примерно 75–80 % и 65–70 % соответственно).

Рисунок 2. Полевые работы в пределах территории объекта исследования
Примечание – составлено авторами

Рисунок 3. План полетной миссии БПЛА senseFly eBee X
Примечание – составлено авторами

В условиях отсутствия стабильного интернет-соединения все картографические данные и полетные задания были подготовлены заранее и загружены в программу eMotion, что позволило обеспечить автономное выполнение миссии. Такой подход способствовал оптимизации маршрута полета, сокращению времени съемки и повышению качества получаемых фотограмметрических данных.

После завершения аэрофотосъемочных работ материалы, полученные с камеры S.O.D.A. 3D, были импортированы в программный комплекс Agisoft Metashape Professional

для выполнения камеральной обработки. Данная камера является специализированным фотограмметрическим сенсором, предназначенным для высокоточного трехмерного картографирования и создания детализированных цифровых моделей местности (ЦММ). В процессе обработки выполнялась автоматическая триангуляция снимков, построение плотного облака точек, генерация ЦММ и ортотрансформация изображений. ЦММ (рисунок 4, а), созданная на основе плотного облака точек, точно отражает морфологические особенности исследуемой территории - перепады высот, уклоны, формы склонов и микрорельеф.

Ортофотоплан (рисунок 4, б) представляет собой метрически точное изображение местности, пригодное для проведения геоинформационного анализа, совместного использования с другими пространственными данными и создания тематических карт различного назначения.

Кроме того, на основе фотограмметрической реконструкции была создана трехмерная модель объекта (рисунок 4, в), представляющая совмещенное отображение рельефа и поверхностных структур. В отличие от ЦММ, трехмерная модель обеспечивает наглядную визуализацию ландшафтных и техногенных элементов, что позволяет выполнять пространственные измерения, морфометрический анализ и моделирование геологических и инженерных процессов.

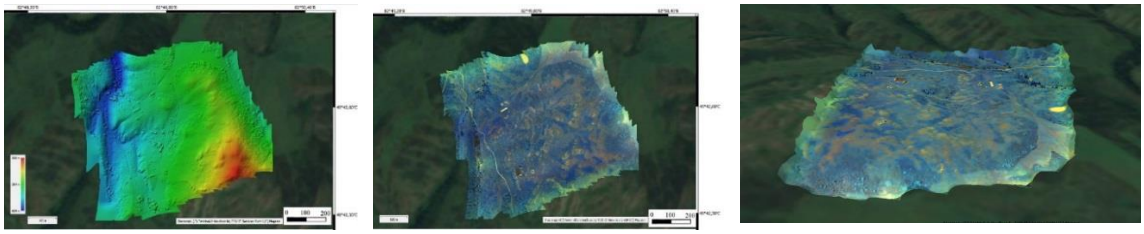
Таким образом, использование камеры S.O.D.A. 3D в составе беспилотного комплекса senseFly eBee X позволило получить высокоточные фотограмметрические данные, ставшие основой для построения цифровых моделей рельефа и трехмерных визуализаций территории.

а б в

Рисунок 4. Результаты фотограмметрической обработки данных:
а – ЦММ; б – ортофотоплан; в – 3D модель поверхности
Примечание – составлено авторами

Для анализа состояния природных объектов и характеристик подстилающей поверхности использована мультиспектральная камера Parrot Sequoia+, установленная на БПЛА senseFly eBee X. Камера регистрирует отраженное излучение в четырех спектральных диапазонах – зеленом, красном, красной границе (Red Edge) и ближнем инфракрасном (NIR), что обеспечивает получение информации, недоступной при стандартной RGB-съемке. Такой подход позволяет оценивать биофизические параметры растительности, состояние почвенного покрова и степень антропогенного воздействия.

На основе обработки мультиспектральных данных в программном комплексе Agisoft Metashape Professional созданы цифровая модель местности (рисунок 5, а), ортофотоплан (рисунок 5, б), трехмерная модель исследуемого участка (рисунок 5, в). Полученные результаты дают представление о структуре поверхности и пространственном распределении природных объектов. Визуализация в трехмерном виде позволяет рассчитывать вегетационные индексы (NDVI, NDRE и др.), применяемые для выявления экологических и техногенных изменений территории.



а *б* *в*

Рисунок 5. Результаты обработки мультиспектральных данных:
а – ЦММ; *б* – ортофотоплан; *в* – 3D-модель поверхности
Примечание – составлено авторами

Ортофотоплан, построенный по данным мультиспектральной аэрофотосъёмки с БПЛА senseFly eBee X, наглядно демонстрирует выраженную спектральную неоднородность поверхности. Съёмка выполнена мультиспектральным сенсором Parrot Sequoia+ (4 канала) с центрами спектральных диапазонов около 550 нм (зелёный), 660 нм (красный), 735 нм (red edge) и 790 нм (ближний ИК) (рисунок 6).

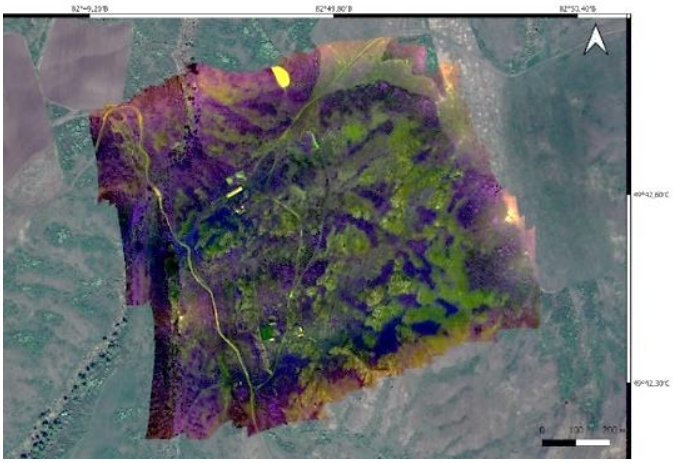


Рисунок 6. Результаты аэросъемки мультиспектральным сенсором Parrot Sequoia+
Примечание – составлено авторами

При среднем высотном уровне полёта ~100 м это обеспечило ортофотоплан с пространственным разрешением порядка 20–30 см/пикс. Полученное изображение в ложноцветовой композиции (ближний ИК – красный – зелёный в каналах RGB) выявляет значительные вариации отражательной способности разных участков. Например, отношение отражения в красном и зелёном каналах (650/560 нм) достигает повышенных значений (~1,5) в отдельных зонах по сравнению с фоновым уровнем (~1,0 для неизменённых пород), что указывает на возможное обогащение поверхности соединениями железа.

Одновременно индексы растительности (NDVI) в этих аномальных участках низкие (< 0,2), что подтверждает отсутствие густого растительного покрова и истинно литогенную природу аномалий (для сравнения, пикселы с NDVI > 0,3 считаются покрытыми растительностью и исключаются из анализа).

Такое сочетание спектральных характеристик отражает различия в литологическом составе пород, степени их вторичных минералогических изменений и интенсивности

экзогенных процессов (выветривания, эрозии и т. д.). На основе выявленных спектральных аномалий удалось выделить несколько участков, потенциально перспективных для поисков рудных проявлений.

Зоны ортофотоплана, характеризующиеся жёлто-оранжевыми и светло-фиолетовыми оттенками, интерпретируются как участки развития сильно окисленных и вторично изменённых пород. Спектральная сигнатура этих участков типична для зон интенсивного выветривания и окисления, где в приповерхностных породах присутствуют гидроокислы железа. Эти минералы обладают высокой отражательной способностью в красном видимом диапазоне и выраженным поглощением в ближнем ИК-диапазоне, что и обуславливает наблюдаемый цветовой тон на ложноцветном изображении.

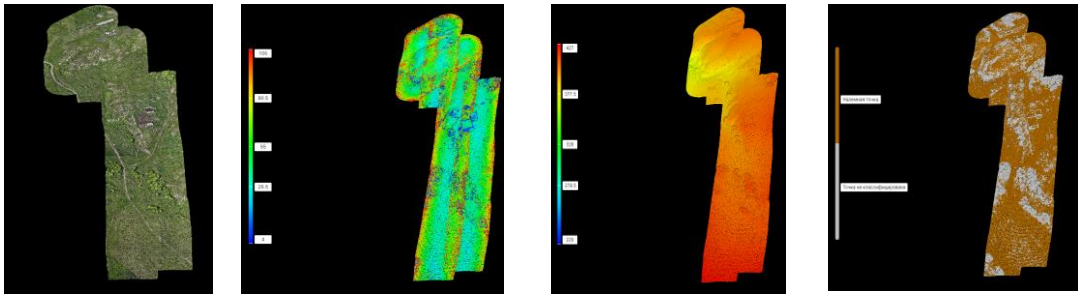
Подобная комбинация спектральных признаков характерна для госсанов – надрудных зон окисления рудных тел, формирующихся в верхних горизонтах месторождений и представленных продуктами вторичных окислительных процессов. В нашем случае наличие лимонит-гётитовых аномалий указывает на возможное развитие поверхностных ореолов минерализации.

Выделенные участки с железистыми оттенками образуют как локальные пятна размером в десятки метров, так и протяжённые полосовидные аномалии, вытянутые вдоль тектонических линий на несколько сотен метров. Чаще всего они приурочены к понижениям рельефа – например, долинам временных водотоков или отрицательным формам рельефа, где могли накапливаться продукты окисления. Одновременно прослеживается связь части аномалий с линейными структурами, что позволяет предположить контролирующую роль разломов и зон трещиноватости: вдоль этих структур, вероятно, происходила циркуляция минерализующих флюидов, оставивших после выветривания яркий отпечаток в виде железистых ореолов. Выявленные спектральные аномалии в ложноцветном ортофотоплане напрямую указывают на перспективные зоны рудоконтролирующих структур, зоны окисления и вторичных изменений пород, что делает мультиспектральный метод съёмки эффективным инструментом на этапе поисково-оценочных работ.

Для выполнения лидарной съемки использовался квадрокоптер DJI Matrice 350 RTK, оснащенный лидарным модулем Zenmuse L2 и мобильной станцией D-RTK. При планировании маршрута были заданы ключевые параметры миссии: границы полигона, высота полета (в среднем 80–120 м для LiDAR), скорость движения дрона и степень перекрытия пролетов. Обработка и визуализация данных выполнялись в специализированном программном обеспечении DJI Terra. В результате камеральной обработки в DJI Terra получены корректно структурированные и метрически точные лидарные данные, готовые к интеграции с фотограмметрическими материалами и использованию при создании ЦМР.

После выполнения реконструкции в программе DJI Terra были получены результаты обработки лидарных данных, представленные в нескольких вариантах визуализации: RGB-отображение; отражаемость (Reflectivity); высота (Elevation); тип (Classification) (рисунок 7).

На рисунке 7, *а* представлена RGB-визуализация, которая обеспечивает реалистичное отображение поверхности и используется для визуального сопоставления с ортофотопланами и другими картографическими материалами. Карта отражательной способности (рисунок 7, *б*) характеризует различия физических свойств поверхности и позволяет дифференцировать типы грунтов, растительность и инженерные сооружения по интенсивности отраженного сигнала. Карта высот (рисунок 7, *в*) представляет пространственное распределение отметок рельефа и служит основой для построения ЦМР и проведения морфометрического анализа (уклоны, экспозиции, профили). Карта классификации (рисунок 7, *г*) отражает результаты автоматического разделения облака точек на тематические классы (земная поверхность, растительность, здания, шумовые отражения), что используется при создании чистых цифровых моделей рельефа (DTM) и поверхности (DSM).



а *б* *в* *г*

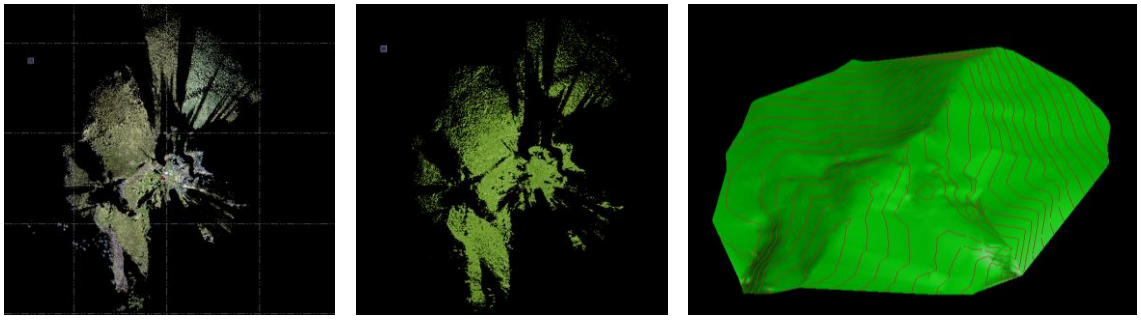
Рисунок 7. Результаты обработки данных лидара Zenmuse L2:
а – визуализация в RGB-диапазоне; *б* – отображение по отражательной способности (Reflectivity); *в* – распределение по высотным отметкам (Elevation); *г* – классификация объектов по типам поверхности (Classification)

Примечание – составлено авторами

Полученные материалы являются исходными данными для разработки цифровых карт фактического материала и последующего геоинформационного анализа, оценки геоморфологии и пространственного моделирования территории.

Для получения детализированных данных рельефа исследуемого участка дополнительно выполнено лазерное сканирование сканером Trimble SX12, которое, в отличие от аэрофотосъемки и лидарных данных с БПЛА, позволяет фиксировать мелкие элементы рельефа и инженерные объекты с миллиметровой точностью на локальных участках.

На рисунке 8, *а* представлено облако точек, полученное непосредственно после полевых измерений. Данная визуализация необходима для оценки качества измерений, выявления зон недостаточной плотности точек и определения участков, требующих фильтрации. На следующем этапе выполняется автоматическая классификация точек по категориям: земля, растительность, здания, шумы. Это позволяет изолировать точки земной поверхности, которые в дальнейшем используются для построения ЦМР. Далее проводится дополнительная очистка данных (рисунок 8, *б*): удаляются шумовые и ложные отражения, не относящиеся к поверхности. Этот процесс существенно повышает точность модели и устраняет артефакты при генерации рельефа.



а *б* *в*

Рисунок 8. Результаты съемки лазерным сканером Trimble SX12:
а – исходное облако точек; *б* – данные после расширенной фильтрации;
в – ЦМР с горизонталями

Примечание – составлено авторами

После очистки выполняется разряжение облака точек с шагом 5 метров для оптимизации объема данных. Это снижает вычислительную нагрузку и облегчает

последующую обработку при сохранении основных геометрических характеристик рельефа. На основе очищенного облака точек создается цифровая модель поверхности, отражающая морфологию рельефа. Заключительным этапом обработки является генерация горизонталей (рисунок 8, *в*), используемых в дальнейшем для инженерно-геодезических расчетов, морфометрического анализа и создания цифровых карт.

Таким образом, данные лазерного сканирования с Trimble SX12 прошли все этапы - от первичной классификации до построения горизонталей. Итогом стала высокоточная ЦМР, которая может быть использована для геологических, инженерных и проектных работ. Проведенные полевые работы показали высокую эффективность применения комплексного подхода к получению пространственных данных, основанного на сочетании аэрофотосъемки, лидарных технологий и наземного лазерного сканирования.

Анализ интегрированных данных позволил, в частности, выявить структурные закономерности залегания пород и зоны техногенного воздействия, что подтверждает высокую эффективность предложенного подхода на данном полигоне. Сформированный набор пространственных данных обеспечивает всестороннее описание геологического объекта. На его основе можно детально исследовать геоморфологические особенности участка, выявлять структурные закономерности залегания пород и анализировать влияние внешних факторов (например, эрозии или техногенных воздействий). Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что созданные высокоточные модели и карты могут использоваться для решения прикладных задач – от планирования горно-геологических работ до мониторинга опасных геологических процессов. Таким образом, интеграция данных БПЛА, мультиспектральной и лидарной съемки в едином информационном пространстве существенно повышает информативность и достоверность геологических исследований по сравнению с разрозненным применением указанных методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования разработан и экспериментально проверен новый подход к геоинформационной обработке данных полевого обследования геологического объекта, основанный на интеграции разнородных данных. Применение комплексной методики позволило получить высокодетализированные ортофотопланы, цифровые модели рельефа и 3D-модели, обеспечивающие целостное представление о пространственной структуре исследуемой территории. Установлено, что совместная обработка данных, полученных различными датчиками, обеспечивает более высокую точность и информативность результатов по сравнению с раздельным использованием отдельных методов. Научная новизна работы состоит в разработке единого технологического процесса совместной обработки фотограмметрических, мультиспектральных и лидарных данных для геологических целей, что ранее не было реализовано в полной мере применительно к объектам со сложным рельефом и обнажениями пород.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их применения для решения широкого круга прикладных задач геологии и смежных областей. Созданные высокоточные цифровые модели и тематические карты могут использоваться при поиске и разведке месторождений (в том числе редких металлов), инженерно-геологических изысканиях, мониторинге геологических процессов и экологическом контроле территории. Предложенный подход может быть адаптирован для исследования различных геологических условий и объектов, повышая эффективность и достоверность интерпретации пространственных данных. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением методики за счет включения новых типов данных (например, геофизических), совершенствования алгоритмов автоматической обработки и

анализа, а также с апробацией комплекса методов на других полигонах для подтверждения универсальности и воспроизводимости полученных результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках программно-целевого финансирования (Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан) BR24992854 «Разработка и внедрение конкурентоспособных научно обоснованных технологий для обеспечения устойчивого развития горно-металлургической отрасли Восточно-Казахстанской области».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной научной статьи авторы использовали инструмент генеративного искусственного интеллекта – ChatGPT (модель GPT-4) на платформе OpenAI – для помощи в частичном редактировании текста и уточнении структуры разделов. Все предложенные ИИ материалы были проверены и одобрены авторами перед включением в финальную версию рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic information science and systems (4th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118676950

Chen, S., Li, M., Guo, H., & Liu, X. (2021). Fundamentals and advances of geographic information systems: A review. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(3), 132. https://doi.org/10.3390/ijgi10030132

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179, 300–314. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021

Bupathy, P., Sivanpillai, R., Sajithvariyar, V. V., & Sowmya, V. (2021). Optimizing low-cost UAV aerial image mosaicing for crop growth monitoring. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIV-M-3-2021, 7–13. ASPRS 2021 Annual Conference, 29 March–2 April 2021. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-3-2021-7-2021

Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). Structure from Motion in the geosciences. Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781118895818

LaRue, E. A., Wagner, F. W., Fei, S., Atkins, J. W., Fahey, R. T., Gough, C. M., & Hardiman, B. S. (2020). Compatibility of aerial and terrestrial LiDAR for quantifying forest structural diversity. Remote Sensing, 12(9), 1407. https://doi.org/10.3390/rs12091407

Alpysbay, M. A., Orynbassarova, E. O., Sydyk, N. K., Adebiyet, B., & Kamza, A. T. (2024). Mining mapping and exploration using remote sensing data in Kazakhstan: A review. Engineering Journal of Satbayev University, 146(2). https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i2.05

Alibekova, N., Abisheva, A., Dosmukhambetova, B., Saktaganova, N., Abdikerova, U., & Budikova, A. (2023). Use of GIS technologies for zoning urban areas taking into account engineering-geological conditions. International Journal of GEOMATE, 25(110), 167–175. https://doi.org/10.21660/2023.110.3970

Рафиков, Т. К., Ерболқызы, М., & Жилдикбаева, А. Н. (2024). Применение данных дистанционного зондирования Земли и анализа NDVI в Восточно-Казахстанской области. Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты, 1(101), 183–189. https://doi.org/10.37884/1-2024/18 // Rafikov, T. K., Yerbolkyzy, M., & Zhildikbayeva, A. N. (2024). Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli i analiza NDVI v Vostochno-Kazakhstanskoy oblasti [Application of Earth remote sensing data and NDVI

analysis in the East Kazakhstan region]. Izdenister, natizheler – Issledovaniya, rezul'taty, 1(101), 183–189. https://doi.org/10.37884/1-2024/18 (In Russ.).

Ulykpanova, M. M., Auezova, Z., Ramazanova, N., Mussabaeva, M., & Zhanguzhina, A. (2024). Application of remote-sensing data in geochemical studies of soils of the Yertis River basin within East Kazakhstan. Quaestiones Geographicae, 43(1), 157–164. https://doi.org/10.14746/quageo-2024-0009

Chaminé, H. I., Pereira, A. J. S. C., Teodoro, A. C., et al. (2021). Remote sensing and GIS applications in earth and environmental systems sciences. SN Applied Sciences, 3, 870. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04855-3

Farella, E. M., Remondino, F., Cahalane, C., Qin, R., Loghin, A. M., Di Tullio, M., Haala, N., & Mills, J. (2023). Geometric processing of very high-resolution satellite imagery: Quality assessment for 3D mapping needs. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-1/W3-2023, 47–54. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-47-2023

Чибуничев, А. Г. (2022). Фотограмметрия: учебник для вузов. Москва: Издательство МИИГАиК. // Chibunichev, A. G. (2022). Photogrammetry: A textbook for universities. Moscow: Publishing House of MIIGAiK. (In Russ.).

Remondino, F., Morelli, L., Stathopoulou, E., Elhashash, M., & Qin, R. (2022). Aerial triangulation with learning-based tie points. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2022. Proceedings of the XXIV ISPRS Congress, 6–11 June 2022, Nice, France.

Altuntas, C. (2023). Review of scanning and pixel array-based LiDAR point-cloud measurement techniques to capture 3D shape or motion. Applied Sciences, 13(11), 6488. https://doi.org/10.3390/app13116488

Haala, N., Kölle, M., Cramer, M., Laupheimer, D., Mandlburger, G., & Glira, P. (2021). Hybrid georeferencing, enhancement and classification of ultrahigh resolution UAV LiDAR and image point clouds for monitoring applications. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V-2-2020. Proceedings of the XXIV ISPRS Congress, 2020 edition.

ChatGPT. (2026). Уточнение и редактирование научного текста статьи [Большая языковая модель]. OpenAI. https://chat.openai.com // ChatGPT. (2026). Utochnenie i redaktirovanie nauchnogo teksta stat'i [Clarification and editing of scientific text of the article] [Large language model]. OpenAI. https://chat.openai.com (In Russ./AI-generated).

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Тогузова Маржан Мельсовна – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Тогузова Маржан Мельсовна – доктор PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Toguzova Marzhan Melsovna – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: MToguzova@edu.ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7395-6060

Рахымбердина Маржан Есенбековна – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Рахымбердина Маржан Есенбековна – доктор PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
R**akhymberdina Marzhan Yessenbekovna** – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: MRahymberdina@edu.ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2196-6512

Капасов Азамат Кайсарович – магистр, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Капасов Азамат Кайсарович – магистр, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Kapasov Azamat Kaysarovich – master, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: AKapasov@edu.ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2103-9513

Апшикур Байтак – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Апшикур Байтак – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Apshikur Baytak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: BApshikur@edu.ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2103-9513

Абдыгалиева Алмагуль Кайыркановна – магистр, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
Абдыгалиева Алмагуль Кайыркановна – магистр, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Abdygalieva Almagul Kayyrkanovna – master, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: AAbdygolieva@ektu.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0006-3877-3713

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_14
SRSTI 44.39.29

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF A BI-ROTOR WIND POWER INSTALLATION FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

АВТОНОМДЫ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН БИРОТОРЛЫ ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН ТАЛДАУ

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИРОТОРНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

M.B. Tustykbayev [1]*, **B.N. Absadykov** [1], **E.S. Askarov** [2]
[1]Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[2]International University Of Transportation And Humanities, Almaty, Kazakhstan
*Corresponding author: Bakhyt Absadykov, e-mail: b.absadykov@satbayev.university

Keywords:
wind turbine, small-scale distributed generation, autonomous power supply, bi-rotor turbine, Betz limit, Digital Twin, isolated microgrid, energy storage, power coefficient.

ABSTRACT
This work presents an analysis of ways to improve the efficiency of low-power autonomous power supply systems through the selection of the optimal aerodynamic and electromechanical design for wind turbines. Based on a literature review and theoretical concepts expanding upon the classical Betz limit, the study examines methods for overcoming operational challenges in isolated microgrids under turbulent and low-wind conditions, as well as approaches to assessing battery degradation. The potential feasibility of achieving a power coefficient of up to 81.4% in two-stage turbines is substantiated. The scientific novelty lies in the comprehensive analysis and conceptual identification of the coaxial counter-rotating bi-rotor configuration as the most promising solution for small-scale distributed generation. The practical significance of the work consists in systematizing data on the potential of integrating Digital Twin technology to optimize aerodynamic performance, enable predictive monitoring, and facilitate intelligent energy storage management, which conceptually elevates wind turbines to the class of highly reliable systems.

Түйінді сөздер:
жел энергетикалық қондырғысы, шағын үлестірілген энергетика, автономды электрмен жабдықтау, биторлы турбина, Бец шегі, цифрлық егіз, оқшауланған микрожелі,

ТҮЙІНДЕМЕ
Бұл жұмыста жел энергетикалық қондырғыларының оңтайлы аэродинамикалық және электромеханикалық схемасын таңдау арқылы қуаты шағын автономды электрмен жабдықтау жүйелерінің тиімділігін арттыру жолдарын талдау ұсынылған. Әдебиеттерге шолу және классикалық Бец шегін дамытатын теориялық тұжырымдамалар негізінде турбулентті және әлсіз желдер кезінде оқшауланған микрожелілерде пайдалану қиындық-тарын еңсеру әдістері, сондай-ақ аккумуляторлық батареялардың

© 2026 **M.B. Tustykbayev, B.N. Absadykov, E.S. Askarov**
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

энергия жинақтағыштар, жел энергиясын пайдалану коэффициенті.

тозуын бағалау тәсілдері қарастырылады. Екі сатылы турбиналарда жел энергиясын пайдалану коэффициентін 81,4 %-ға дейін жеткізудің әлеуетті мүмкіндігі негізделеді. Ғылыми жаңашылдық шағын үлестірілген энергетика үшін ең перспективалы шешім ретіндеосьтес қарсы айналатын бироторлы компоновканы кешенді талдаудан және тұжырымдамалық ерекшелеуден тұрады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы аэродинамикалық сипаттамаларды оңтайландыру, предиктивті мониторинг және жинақтағыштарды зияткерлік басқару үшін цифрлық егіз технологиясын енгізу әлеуеті туралы деректерді жүйелеуде жатыр, бұл тұжырымдамалық түрде жел турбиналарын жоғары сенімді жүйелер класына шығарады.

Ключевые слова:
ветроэнергетическая установка, малая распределенная энергетика, автономное электроснабжение, бироторная турбина, предел Беца, цифровой двойник, изолированная микросеть, накопители энергии, коэффициент использования энергии ветра.

АННОТАЦИЯ

В работе представлен анализ путей повышения эффективности автономных систем электроснабжения малой мощности посредством выбора оптимальной аэродинамической и электромеханической схемы ветроэнергетических установок. На основе обзора литературы и теоретических концепций, развивающих классический предел Беца, рассматриваются методы преодоления сложностей эксплуатации в изолированных микросетях при турбулентных и слабых ветрах, а также подходы к оценке деградации аккумуляторных батарей. Обосновывается потенциальная возможность достижения коэффициента использования энергии ветра до 81,4% в двухступенчатых турбинах. Научная новизна заключается в комплексном анализе и концептуальном выделении соосной контрвращающейся бироторной компоновки как наиболее перспективного решения для малой распределенной энергетики. Практическая значимость работы состоит в систематизации данных о потенциале внедрения технологии цифрового двойника для оптимизации аэродинамических характеристик, предиктивного мониторинга и интеллектуального управления накопителями, что концептуально переводит ветротурбины в класс высоконадежных систем.

INTRODUCTION

Global trends in wind energy development

The use of the kinetic energy of air masses has a history spanning thousands of years, inextricably linked to the development of human civilization. The first documented evidence of wind power to propel sailing vessels on the Nile River dates back to 5000 BC, and by 200 BC, simple wind-powered water pumps were already being used in China to irrigate agricultural land. During this same period, the first vertical-axis windmills appeared in what is now Iran and Afghanistan, used for grinding grain in arid climates. In the 11th–13th centuries, these technologies reached Europe: Dutch engineers created massive wind pumps to drain lakes and reclaim land from the sea, and windmills became a vital driver of Europe's pre-industrial economy.

The transition from purely mechanical work to electricity generation occurred in the late 19th century. The first experimental wind turbines were built by Austrian Josef Friedländer in 1883, Scottish professor James Blyth in 1887, and American Charles Brush in 1888. Following the oil crisis of the 1970s, interest in wind energy as an independent energy source increased exponentially, spurring the development of large industrial turbines.

The first quarter of the 21st century has become an era of global energy transition. Awareness of the climate threats associated with greenhouse gas emissions and the depletion of readily available hydrocarbon reserves have placed wind energy at the forefront of decarbonization of the global economy. The evolution of the industry over the past twenty-five

years has demonstrated unprecedented growth rates. According to official data from the Global Wind Energy Council (GWEC, 2025), the global wind turbine fleet has exceeded 1.1 TW of installed capacity, with wind currently providing approximately 8% of all global electricity generation.1

A clear geographic polarization is evident: while Europe was the undisputed leader at the turn of the 2010s, by 2025, the dominant position has shifted to Asian countries, primarily China, whose corporations have seized the initiative in the megawatt-scale offshore installation segment and produce more than half of all turbines globally. The technological vector of "big" (utility-scale) wind energy is aimed exclusively at scaling unit capacity: rotor diameters of modern offshore machines already exceed 250 meters, and the capacity of a single unit reaches 15-18 MW. However, this gigantomania is accompanied by an exponential growth of problems. The installation of such giants requires unique vessels, the transportation of blades by land is practically impossible without the reconstruction of road infrastructure, and the issue of recycling used composite blades (made of fiberglass and carbon fiber) still does not have an environmentally friendly and cost-effective mass-scale solution.

Specifics and challenges of small-scale distributed generation

In the shadow of gigantic offshore and onshore wind farms lies an equally important sector: small-scale distributed energy (Small Wind), aimed at independent consumers (Tarasiuk et al., 2025; Babina, 2012). In many regions of the world with low population density (Arctic and subarctic zones, high mountains, isolated islands, vast steppe and desert areas), the construction of long power transmission lines from centralized power plants is completely economically impractical. Such autonomous facilities—cell phone towers, meteorological and seismic stations, border outposts, farms, remote villages, and private homes—are in dire need of reliable, independent energy sources. The global market for small wind turbines is expected to reach record levels by 2030, as demand for decentralized energy systems steadily grows (Tarasiuk et al., 2025). Traditionally, diesel generation has been used for such facilities, but the logistics of fuel delivery (often by helicopters or all-terrain vehicles during winter seasons) make the cost per kilowatt-hour astronomical. Wind turbines offer an alternative, but blindly copying "large" wind energy technologies and simply scaling them down has proven to be an engineering dead end. Low-power wind turbines (typically in the range of 1 to 50 kW) are forced to operate in the harsh aerodynamic conditions of the near-surface layer of the atmosphere (at tower heights of 10 to 30 meters). This layer is characterized by extreme turbulence caused by air mass friction with the earth's surface. Here, a pronounced velocity gradient (vertical wind shear) is present, along with numerous aerodynamic shadows and turbulence from buildings, trees, and complex terrain. Moreover, surface winds are characterized by constant, chaotic changes in direction. The priority for an autonomous wind turbine is not generating maximum peak power during hurricane-force winds, but rather the ability to ensure a stable and continuous power supply at low and medium wind speeds (3–6 m/s), which statistically prevail 70–80% of the year in most continental regions. An autonomous station requires absolute operational reliability, as access for repair crews is often impossible for several weeks or months. Any mechanical failure or prolonged downtime due to weak winds leads to deep battery discharge, the shutdown of life support systems, and the need for emergency startup of backup generators (Tarasiuk et al., 2025). This necessitates a fundamental rethinking of classic aerodynamic designs and a transition to innovative multi-rotor concepts.

MATERIALS AND METHODS

Theoretical foundations and comparative analysis of classical WT designs

Wind energy engineering has historically developed within two main paradigms: horizontal-axis wind turbines (HAWT) and vertical-axis wind turbines (VAWT). Each concept has its own theoretical basis and specific limitations. Horizontal-axis propeller-type wind

turbines account for the overwhelming share of the global market. Their aerodynamic principle is based on the generation of lift force when air flows around profiled blades (Babina, 2012; Kashem et al., 2021) The blade profile has an aerodynamic shape, resulting in a higher flow velocity over the convex part of the blade than under the flat part. According to Bernoulli's law, this generates lift, which causes the rotor to rotate. The undeniable advantages of HAWTs include high theoretical efficiency. Modern three-bladed turbines can achieve Cp – wind power coefficient values of approximately 0.45–0.50, which brings them very close to the theoretical Betz aerodynamic limit for a single disk (Betz, 1920; Kashem et al., 2021). They are also characterized by high speed, which reduces the requirements for the multiplier and reduces the generator size. However, for autonomous systems, such installations exhibit a number of critical drawbacks. The most important of these is a catastrophic dependence on flow direction. In surface turbulence, the wind changes direction every second. The attitude control system has inertia and inevitably lags. This results in "oblique flow," which reduces the swept area and causes flow separation at the blades. Experiments have shown that in a turbulent environment, small HAWTs lose up to 40-50% of their design output (Babina, 2012). Destructive gyroscopic moments are additional drawbacks. Alternating cyclic loads during nacelle rotation bend the mast and break out bearings. Furthermore, HAWTs are characterized by high starting speeds (3.5-5 m/s), making them useless in light wind zones. An alternative paradigm is vertical-axis turbines: Savonius and Darrieus rotors (Babina, 2012; Habib et al., 2023). The main advantage of VAWTs for standalone installations is their absolute omnidirectionality. Cylindrical symmetry allows them to capture wind from any direction without the need to rotate the nacelle. The absence of a wind-orientation mechanism increases the overall reliability of the unit. The vertical shaft arrangement allows heavy electromechanical equipment to be located at the very bottom, dramatically reducing the load on the mast and simplifying maintenance (Babina, 2012; Kashem et al., 2021). However, these advantages come with fundamental drawbacks. VAWTs have low overall efficiency. As shown in a comprehensive analysis of the efficiency of horizontal and vertical turbines, Savonius and Darrieus rotors have very high aerodynamic drag coefficients, which significantly reduces their overall efficiency compared to propeller-driven counterparts. As a result, the overall efficiency of VAWTs for real installations is a modest 0.15–0.35 (Babina, 2012; Habib et al., 2023). This specific flow pattern generates strong vibrations. Pulsations in the lift force cause uneven torque, which leads to bearing wear. Finally, classic Darrieus models lack self-starting. When stationary, they cannot spin up on their own, draining the batteries' scarce energy (Habib et al., 2023).

Energy storage systems (Batteries) in autonomous microgrids: The physics of interaction

Justifying the efficiency of any stand-alone wind turbine is impossible without a thorough understanding of the operation of the buffer storage system. A stand-alone wind turbine never directly powers the load. It is integrated into a complex circuit: the wind generator generates alternating current, which is rectified, fed to a battery bank via an intelligent controller, and then converted by an inverter for the load. In this circuit, the battery is the most vulnerable, expensive, and critical element (Tarasiuk, 2025). Deep-cycle traction batteries are used for stand-alone systems. The choice of battery chemistry is dictated by operating conditions. Lead-acid AGM (Absorbent Glass Mat) batteries are characterized by a low initial cost and the ability to deliver ultra-high currents. However, they have a limited service life and are critically vulnerable to chronic undercharging. In calm conditions, the plates quickly become coated with lead sulfate, and capacity drops. Gel lead batteries are more resistant to deep discharges, but require precision from the controller: excess voltage causes gassing and swelling. The most advanced solution is lithium iron phosphate (LiFePO4) batteries, which offer exceptional service life and no memory effect. Engineering calculations for the required capacity of these batteries are based on a comprehensive assessment of load power, runtime, inverter efficiency, Depth of Discharge (DOD), temperature corrections, and the Peukert effect (Kumar, 2023). Despite careful

calculations, the most pressing problem remains electromagnetic cogging in permanent magnet generators. In light winds, the kinetic energy of a single rotor in a traditional turbine is simply insufficient to overcome magnetic attraction. As a result, the terminal voltage is zero, the controller cannot open the circuit, and the batteries reach critical discharge. Under such conditions, battery life is reduced several times faster than expected (Kumar, 2023; Tarasiuk, 2025). This makes it vital to transition to multi-rotor concepts with significantly increased starting torque.

Evolution towards spatial and coaxial multi-rotor systems (MRWT)

Understanding the mechanical limitations of a single wind turbine led science to the concept of dividing the swept area—the creation of multi-rotor wind turbines. The idea is to place multiple small rotors on a single support structure, which, according to the square-cube law, reduces overall weight. In recent decades, researchers have been actively modeling various configurations. Trirotor systems create positive aerodynamic interference, tetrarotor systems demonstrate phenomenal reliability due to redundancy, and hexarotor matrices generate a cumulative barrier (Chronis et al., 2022). However, spatial networks are completely unsuitable for small-scale autonomous power generation due to their monstrous design. The abundance of trusses creates colossal drag, and the steering mechanisms experience extreme stress in turbulent conditions. Scientific thought has arrived at an elegant compromise: combining the advantages of multiple rotors but placing them compactly – one behind the other on a single axis. Thus, the concept of a bi-rotor coaxial counter-rotating wind turbine was born (Nardecchia et al., 2021). When discussing the transition to bi-rotor systems, it is impossible to ignore the fundamental contribution of Kazakhstani science. Professor Sh. A. Ershin and his scientific school conducted in-depth theoretical and applied research in the field of vertical-axis bi-rotor turbines (Ershin et al., 2015). Based on their theory of turbulent flow aerodynamics, a team of scientists developed and patented innovative carousel-type wind turbines with two coaxial, autonomous counter-rotating shafts. The practical triumph of these ideas was the creation of the "Bolotov Windrotor" by engineer A. V. Bolotov (Bolotov & Bolotov, 2018). This coaxial turbine achieved a near-perfect efficiency of 48% for vertical-axis systems, capturing flows of any intensity and generating current in winds of only 2 m/s. The experience of their long-term integration proves that the bi-rotor paradigm is the most justified choice for distributed energy.

RESULTS AND DISCUSSION

Justification of the absolute efficiency of the bi-rotor WT (CRWT- Counter-Rotating Wind Turbine)

The selection of the coaxial bi-rotor configuration as the optimal solution for autonomous microgrids is based on three fundamental pillars: an aerodynamic breakthrough, innovative electromechanics, and ideal dynamic balancing.

Aerodynamic superiority: Beyond classical limits

Classical theory mathematically proves that a turbine cannot extract more than 59.26% of the kinetic energy of an air flow (Betz, 1920). When passing through the blades of a single wind turbine, the flow swirls, and the kinetic energy of this parasitic rotation is irretrievably lost in the wake. A bi-rotor system radically changes hydrodynamics. The rear rotor, with reverse-pitch blades and counter-rotating, captures the swirling air mass, "straightens" the flow, and converts the lost energy into shaft rotation. Linear momentum theory, expanded by B.G. Newman, demonstrated that the theoretical power limit for a coaxial system increases to 64% (Newman, 1986). Further theories using Computational Fluid Dynamics (CFD) have shown that with careful selection of induction coefficients, the theoretical maximum for a two-stage turbine reaches 81.4%, which is 22% higher than the Betz limit (Agrawal, 2010; Chantharasenawong, 2008). Counter-rotation causes rapid breakdown of tip vortex sheets, providing intense mixing of air

layers and accelerating wake velocity recovery by 46.5% compared to conventional HAWTs (Cioni et al., 2024).

Electromechanical Superiority: Double Rotation Generator

The birotor wind turbine implements a revolutionary paradigm: a generator with a rotating stator (Neagoe et al, 2023; Niu et al., 2022). The front rotor rotates the inductor (magnets), and the rear rotor rotates the armature (windings) in the opposite direction. The relative rotation speed of the magnetic field is equal to the sum of their magnitudes.

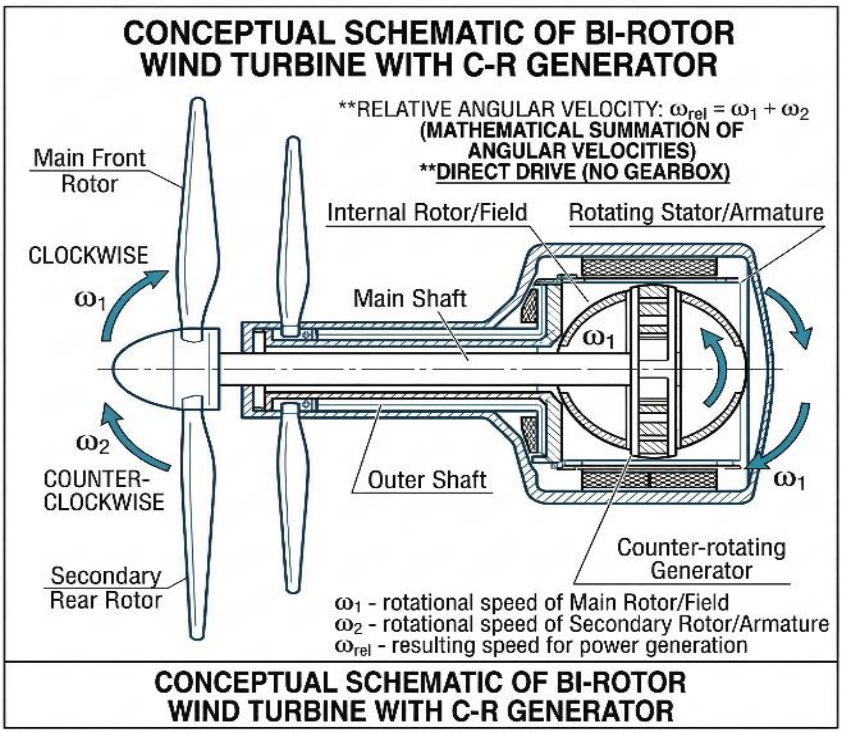


Figure 1. Schematic diagram of a bi-rotor wind turbine with a counter-rotating electric generator (rotor-stator)

Note – compiled by the authors in AutoCad

This doubles the electromotive force, allowing the generator to begin charging the battery at wind speeds half that of a single turbine (1.5–2 m/s) (Neagoe et al, 2023). This speed addition effect eliminates the need for a mechanical gearbox (direct drive) and allows the counter torques to easily break the magnetic sticking of the teeth, providing a soft and early start (Niu et al., 2022).

Dynamic stabilization and compensation of reactive torque

In a single-rotor turbine, the reactive torque tends to twist the mast. In a bi-rotor design, two counter-rotating wheels create two reactive torques directed in opposite directions. With proper design, these torques cancel each other out directly at the generator's central unit (Mihnenkov et al., 2002). The resulting torsional load tends to zero, allowing the use of ultra-light telescopic towers. The mutual cancellation of these torques completely eliminates the occurrence of destructive gyroscopic precession during sudden changes in wind direction.

Application of digital twin technology in the development and operation of bi-rotor wind turbines

The relevance of introducing the digital twin concept into the renewable energy sector stems from the need to dramatically improve the efficiency and predictively forecast autonomous installations (Massel et al., 2019; Kumar et al., 2023).

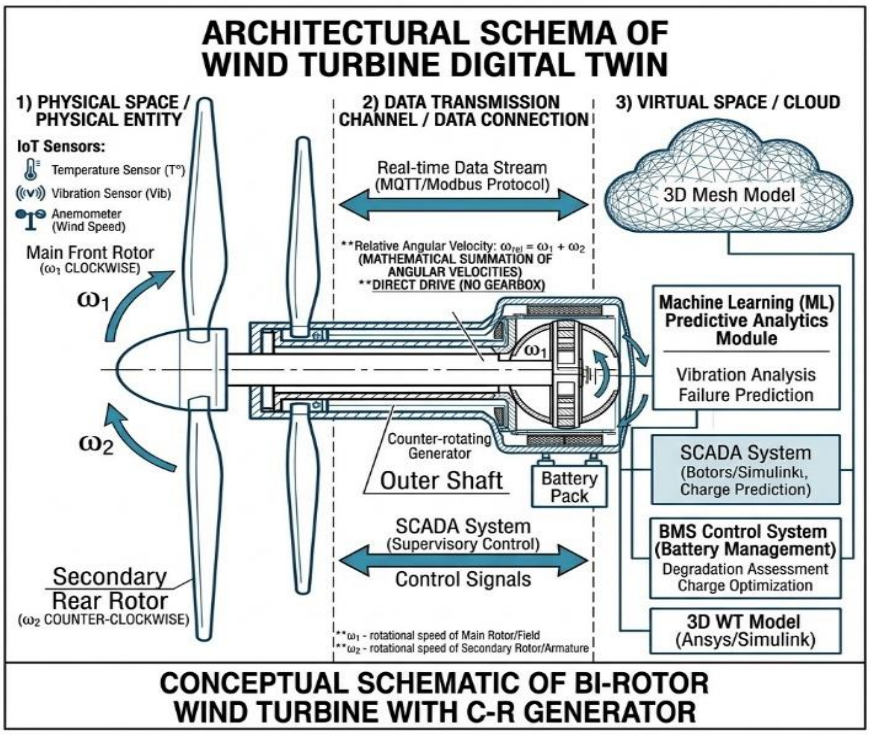


Figure 2. Three-level architecture of the Digital Twin system for an autonomous wind turbine

Note – compiled by the authors in AutoCad

A digital twin is a living, virtual copy of a physical object that synchronizes with it in real time. When developing an autonomous bi-rotor wind turbine, the use of this technology solves several fundamental problems. First, during the design phase, a digital copy of the turbine is created for Computational Fluid Dynamics - CFD simulations, enabling the selection of the mathematically ideal distance between coaxial wind wheels without the need for expensive full-scale prototypes (Massel et al., 2019). Second, during the operational phase, the integration of an IoT sensor network enables predictive maintenance. Neural network algorithms detect microdefects in bearings long before they occur, predicting wear and preventing sudden, emergency failures far from civilization (Kumar et al., 2023). Finally, a crucial function is the intelligent management of energy storage devices. Integrating a digital twin with a Battery Management System (BMS) enables precise assessment of the battery's State of Health (SOH). The twin adapts the controller's operating algorithms to anticipate periods of calm, protecting batteries from deep discharge and significantly extending their lifespan (Kumar et al., 2023).

Environmental and economic justification, acoustic safety, and predictive maintenance strategies for birotor wind turbines

The mass introduction of birotor wind power plants for decentralized power supply requires not only confirmation of their aerodynamic efficiency, but also a comprehensive environmental and economic justification. The life cycle of small-scale power plants is associated with strict standards of acoustic impact on humans and the need to minimize total operating costs throughout the entire 25-year period of operation. Noise pollution is one of the most critical limiting factors when placing wind turbines near farms and private residential areas. According to the recommendations of the World Health Organization (WHO), structural noise is recognized as the second most important environmental risk factor for human health after atmospheric air pollution (Evrard & Ecotière, 2024). Classical horizontal-axial turbines, in addition to the audible

aerodynamic noise generated by the separation of the turbulent boundary layer at the trailing edge of the blades, produce a significant amount of infrasound (acoustic vibrations with a frequency below 20 Hz). Since low-frequency waves have an extremely low degree of atmospheric attenuation, they can travel vast distances and penetrate dense building structures, causing people to experience a subjective feeling of internal vibration, headaches, and sleep disturbances (Oštrina et al., 2023). Although the direct threat to health from the infrasound of small wind turbines has not been scientifically proven and remains the subject of discussion, the cumulative effect of the operation of several single-rotor turbines can create zones of acoustic discomfort (Evrard & Ecotière, 2024). In this aspect, birotor architecture demonstrates an undeniable environmental advantage. Firstly, due to the increased energy extraction coefficient, the birotector system develops rated power with a smaller rotor diameter. This proportionally reduces the circumferential velocity at the ends of the blades, which are the main source of high—frequency whistling. Secondly, the mutual rotation of the front and rear impellers acts as an active acoustic dissipator. The periodic intersection of the oncoming blades effectively "breaks up" the low-frequency vortex structures, shifting the spectrum of the generated noise to the high-frequency region. High-frequency sound waves fade rapidly in the atmosphere and are absorbed by the natural terrain. Measurements show that the sound pressure from coaxial installations at a distance of 10 meters rarely exceeds the threshold of 40 dBA, which is comparable to background noise in a quiet office and allows them to be mounted directly on the roofs of residential buildings.The economic feasibility of any generating equipment is assessed using the universal integral indicator LCoE (Leveled Cost of Energy) — the normalized cost of electricity generation throughout the entire life cycle. For isolated Arctic and steppe power systems, which are completely dependent on the complex logistics of fuel delivery, the LCoE index of traditional autonomous diesel generation reaches astronomical values. The integration of renewable energy sources makes it possible to reduce this financial barrier several times. In a comparative analysis of the economic models of classical single-rotor turbines and multi-rotor systems, birotor complexes demonstrate high investment attractiveness. The addition of a second rotor and the introduction of a sophisticated dual-rotation generator increase the initial capital cost (CAPEX) by 15-20% compared to the basic configuration (Oukara et al., 2024). However, in the long run, this surplus is completely eliminated. Due to the accelerated recovery of the satellite footprint and utilization of the energy of the parasitic swirl of the air stream, the annual electricity generation of the biotor system increases by 25-30% while maintaining the same sweeping area. In terms of 20 years of operation, this increase more than compensates for the initial investment, radically reducing the final LCoE and speeding up the payback period of the project. Regular operating and maintenance (O&M) costs account for the lion's share in the cost structure of wind power (Donnelly et al., 2024). In traditional horizontal wind turbines, the most vulnerable, difficult and expensive to maintain link is a mechanical step-up gearbox (multiplier). Gearbox gears are susceptible to micropitting, require expensive regular replacement of synthetic oil and installation of filtration systems to remove condensate and solid particles. Moreover, at temperatures below -30 ° C, the oil thickens, which leads to jamming of the transmission and catastrophic breakdowns. The architecture of a birotor wind turbine with a dual-rotation generator allows you to gracefully solve this problem by implementing the Direct Drive concept. Reliability studies show that gearless turbines have significantly lower failure rates and minimize total operating costs (O&M) throughout their service life. The complete absence of a mechanical transmission puts the installation in the category of maintenance-free systems. For autonomous and remote facilities, where the logistics cost of calling a repair team can be many times higher than the cost of the replacement part itself, switching to direct drive is the only economically feasible solution.The maximum reduction in operating costs in autonomous microgrids is achieved due to the synergy of biotor mechanics and cyberphysical control systems. The classic

reactive approach (repair of equipment after its actual breakdown) is absolutely unacceptable for autonomous life support stations due to unacceptably long downtime. At the same time, preventive maintenance (replacement of parts strictly on schedule, regardless of their condition) leads to unjustified overspending of expensive spare parts. The digital twin technology provides a painless transition to a Predictive Maintenance strategy. The integration of heterogeneous data streams (collecting telemetry, vibration accelerometer readings, thermocouples, and encoders) allows the digital model to continuously analyze the physical condition of the unit. Mathematical algorithms detect anomalies and early signs of degradation (for example, fatigue microcracks of blades or insulation defects of windings) long before their transition to a critical stage. The introduction of predictive monitoring based on digital twins reduces total maintenance costs by 47% compared to the reactive approach and increases the operational readiness coefficient of the complex to 99.5%. In the future, the total digitalization of small birotor installations will open the way to blockchain tokenization algorithms for distributed energy resources. This will allow the creation of peer-to-peer microgrids in which excess generated electricity will be automatically redistributed and traded between neighboring autonomous consumers using smart contracts, which will create an additional source of income and accelerate the return on investment.

Structural reliability, mechanical load calculation, and standardization of small birotor wind turbines.

In addition to aerodynamic and electromechanical advantages, the full-scale implementation of birotor wind turbines for autonomous life support systems requires rigorous assessment of their structural reliability, fatigue strength, and precision dynamic balancing. The design and operation of small-capacity wind turbines (with an effective swept area of less than 200 square meters and an operating voltage of up to 1000 V) are strictly regulated by international and adapted national regulations, in particular GOST R 54418.2 (corresponding to the international standard IEC 61400-2) (GOST R 54418.2-2014, 2015). This standard defines uncompromising requirements for the engineering integrity of subsystems, overspeed protection algorithms, and the mechanical strength of components under extreme wind loads (storms) and blade icing. The bi-rotor turbine concept, despite its aerodynamic perfection, poses a number of complex challenges for design engineers. Unlike traditional single-rotor systems, the mechanical "heart" of a bi-rotor unit is a highly loaded coaxial shaft assembly, where the outer hollow shaft rotates counter to the inner solid shaft. With the two rotor masses rotating in opposite directions, the loads on the radial support and thrust bearings are generated not only by the static weight of the generator and the aerodynamic thrust force, but also by a complex set of dynamic factors. This matrix of influences includes high-frequency centrifugal forces, as well as Coriolis effects, which inevitably arise during feathering (changes in the airflow vector and nacelle rotation). Classic analytical formulas for calculating the basic dynamic service life (rating life) of rolling bearings under such conditions prove inadequate. Accurately determining local stresses in the contact zone of rollers and treads under asymmetric loads from two independent aerodynamic masses requires the use of advanced multi-body dynamic modeling (Multi-Body Simulation) and finite element analysis (FEA) (Kim et al., 2017). A critical technological step in ensuring the design life of a bi-rotor design is the precision dynamic balancing of both wind turbines. Even minimal uneven mass distribution (imbalance) in composite blades rotating in opposite directions can generate destructive high-frequency resonant vibrations. In a birotor design, the rotational speeds of the front and rear wheels generate vibrations that are transmitted unimpeded to the central shaft and support mast. This inevitably leads to accelerated fatigue failure of the metal structures, degradation of winding insulation, and premature failure of the dual-rotor generator. Dynamic balancing in the factory is performed based on the construction of precise vector diagrams of mass distribution. This allows for the precise addition of corrective weights to minimize the level of structural noise, eliminate vibrations, and significantly increase the service life of bearing

assemblies. The electromechanical reliability of a coaxial system also critically depends on maintaining a precise torque balance. In an ideal operating mode, the electromagnetic braking torque generated by the front wind wheel on the inductor should be almost completely balanced by the counter-reactive torque of the rear wind wheel, transmitted to the stator. The moment equation ensures smooth operation of the entire generator set, eliminates spontaneous twisting of the nacelle around the tower, and prevents damage to the power collector cables. As comprehensive fault-tolerance reviews demonstrate, replacing the traditional mechanical multiplier with a direct drive in a birotor design eliminates the most vulnerable transmission component, radically reducing the likelihood of catastrophic mechanical failures. However, this solution places increased demands on the quality of neodymium magnets, their protection against demagnetization during overheating, and the thermal stability of the generator's armature windings. Thus, an in-depth structural reliability analysis confirms that, with strict adherence to design standards (GOST), the use of finite element modeling, and high-quality dynamic balancing, birotor wind turbines are capable of providing phenomenal mean time between failures, outperforming classic geared counterparts even in the harshest climatic conditions of isolated regions (Umnov, 2018).

CONCLUSION

An analytical review demonstrates that the use of conventional wind turbines in the stand-alone microgrid sector faces insurmountable aerodynamic and design barriers. The evolution of multi-rotor systems has logically led engineering to an optimal compromise—the coaxial counter-rotating (bi-rotor) wind turbine. The rationale for the high efficiency of this solution is based on four key factors: Aerodynamic breakthrough: Overcoming the Betz limit and achieving a theoretical KEUC (Kinetic Energy Utilization Coefficient) of up to 81.4% by utilizing the swirling wake, which provides a significant increase in output.

- Electric synergy with storage: The dual-rotation generator doubles the relative speed, eliminates the multiplier, solves the problem of starting sticking, and begins charging the battery in light winds.
- Dynamic survivability: Mutual compensation of reactive moments and damping of gyroscopic loads relieve the mast and increase vibration resistance.
- Cyber-physical integration: The use of digital twins radically improves airflow optimization, predictive failure forecasting, and battery management.
- Thus, the development and research of a bi-rotor wind turbine using a digital twin is the most promising, economically feasible and scientifically significant direction for further research.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This research received no external funding.

INSTITUTIONAL REVIEW BOARD STATEMENT: Not applicable. This study did not involve human participants or animals; the research is purely technical and based on theoretical modeling and analysis of wind turbine systems.

INFORMED CONSENT STATEMENT: Not applicable. The study did not involve human participants.

DATA AVAILABILITY STATEMENT: The data supporting the findings of this technical study, including the theoretical models of the bi-rotor wind turbine, are available from the corresponding author upon reasonable request.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to colleagues for their methodological support and helpful discussions, as well as to the anonymous reviewers for their valuable comments that helped improve the quality of this manuscript.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: During the preparation of this work, the authors used the Gemini large language model to assist

with information retrieval, stylistic editing, and verifying the grammatical correctness of the manuscript. After using this tool, the authors thoroughly reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the final publication.

Gemini 3.1 Pro. (2026, February 5). Information retrieval, stylistic editing, and grammar checking of the manuscript abstract and main text [Large language model]. Google. https://gemini.google.com

REFERENCES

Global Wind Energy Council. (2025). Global Wind Report 2024–2025. GWEC Market Intelligence. https://gwec.net/

Бабина, Л. В. (2012). Анализ ветроустановок для электростанций малой мощности. Научный журнал КубГАУ, 78(04), 1–10. https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vetroenergeticheskih-ustanovok-dlya-elektrostantsiy-maloy-moschnosti // Babina, L. V. (2012). Analiz vetroustanovok dlya elektrostantsiy maloy moshchnosti [Analysis of wind turbines for low-power power plants]. Nauchnyj zhurnal KubGAU, 78(04), 1–10. https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vetroenergeticheskih-ustanovok-dlya-elektrostantsiy-maloy-moschnosti (In Russ.)

Болотов, А. В., & Болотов, С. А. (2018). Опыт эксплуатации вертикально-осевых ветроэнергетических установок. Энергетика и экология, (2), 45–52. // Bolotov, A. V., & Bolotov, S. A. (2018). Opyt ekspluatatsii vertikal'no-osevykh vetroenergeticheskikh ustanovok [Experience in operating vertical-axis wind power plants]. Energetika i ekologiya, (2), 45–52. (In Russ.)

Ершин, Ш. А., & Ершин, Ч. Ш. (2015). Аэродинамика многороторных ветродвигателей карусельного типа: монография. КазНУ. // Ershin, Sh. A., & Ershin, Ch. Sh. (2015). Aerodinamika mnogorotornykh vetrodvigateley karusel'nogo tipa: monografiya [Aerodynamics of multi-rotor carousel-type wind turbines: Monograph]. KazNU. (In Russ.)

Массель, Л. В., & Массель, А. Г. (2019). Разработка цифрового двойника ветровой электростанции: постановка задачи и проектирование. Информатизация и системы управления в промышленности, (1), 15–22. https://doi.org/10.25729/ESI.2019.13.1.002 // Massel', L. V., & Massel', A. G. (2019). Razrabotka tsifrovogo dvoynika vetrovoy elektrostantsii: postanovka zadachi i proektirovanie [Development of a digital twin of a wind power plant: Problem statement and design]. Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti, (1), 15–22. https://doi.org/10.25729/ESI.2019.13.1.002 (In Russ.)

Михненков, Л. В. (2002). Ветроэнергетическая установка планетарного типа. Научный вестник МГТУ ГА, (49), 110–113. https://cyberleninka.ru/article/n/planetarnaya-vetroenergeticheskaya-ustanovka // Mikhnenkov, L. V. (2002). Vetroenergeticheskaya ustanovka planetarnogo tipa [Planetary-type wind power plant]. Nauchnyj vestnik MGTU GA, (49), 110–113. https://cyberleninka.ru/article/n/planetarnaya-vetroenergeticheskaya-ustanovka (In Russ.)

Agrawal, V. V. (2010). Design and aero-acoustic analysis of a counter-rotating wind turbine [PhD thesis, Purdue University]. https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/Design_and_aero-acoustic_analysis_of_a_counter-rotating_wind_turbine/2115160

Betz, A. (1920). Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren [The maximum theoretically possible utilization of wind by wind motors]. Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, (26), 307–309. (In Germ.)

Chantharasenawong, C. (2008). Axial momentum theory for turbines with coaxial counter rotating rotors. In Commemorative International Conference of KMUTT (pp. 12–18).

Chronis, T., et al. (2022). Application of global optimization algorithms to multi-rotor systems. Renewable Energy, 185, 412–425. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.064

Cioni, S., et al. (2024). Wake dynamics of wind turbines in unsteady streamwise flow conditions. Journal of Fluid Mechanics, 980, A15. https://doi.org/10.1017/jfm.2024.57

Habib, M. A., et al. (2023). Comparison between horizontal and vertical axis wind turbine. Energy Conversion and Management, 276, 116521. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116521

Kumar, Y., et al. (2023). Digital twin for battery management systems in autonomous wind systems. Energies, 16(8), 3510. https://doi.org/10.3390/en16083510

Neagoe, M., et al. (2023). Comparative analysis of torque-adding wind energy conversion systems with a counter-rotating vs conventional electric generator. Energies, 16(5), 2134. https://doi.org/10.3390/en16052134

Newman, B. G. (1986). Multiple actuator-disc theory for wind turbines. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 24(3), 215–225. https://doi.org/10.1016/0167-6105(86)90022-9

Niu, S., et al. (2022). Comparative study of contra-rotating permanent magnet vernier and wound-field flux-switching machines. Energies, 15(4), 1423. https://doi.org/10.3390/en15041423

Tarasiuk, O., et al. (2025). Autonomous power supply system for consumers. Machinery & Energetics, 16(1), 9–20. https://doi.org/10.31548/machinery2025.01.009

Evrard, A.-S., & Ecotière, D. (2024). Health effects of wind turbine noise: Fact or fiction? Reflex Science.

Oštrina, D., et al. (2023). Noise modeling in the context of the cumulative impact of two neighboring wind farms. Applied Sciences.

Oukara, A., et al. (2024). Multi-rotor wind turbines: A review. Extrica.

Donnelly, O., et al. (2024). Operation and maintenance cost comparison of offshore wind turbines. Wind Energy Science, 9.

ГОСТ Р 54418.2-2014 (МЭК 61400-2:2006). (2015). Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам. Стандартинформ. // GOST R 54418.2-2014 (MEK 61400-2:2006). (2015). Tekhnicheskie trebovaniya k malym vetroenergeticheskim ustanovkam [Technical requirements for small wind turbines]. Standartinform. (In Russ.)

Умнов, В. (2018). Энергоснабжение Арктики и удаленных регионов. Nordic Ecobusiness Centre. // Umnov, V. (2018). Energosnabzhenie Arktiki i udalennykh regionov [Energy supply of the Arctic and remote regions]. Nordic Ecobusiness Centre. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Түстікбаев Мақсат Бақытжанұлы – докторант, Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы.
Тустыкбаев Максат Бахытжанович – докторант, Сатпаев университет, Республика Казахстан, город Алматы
Tustykbayev Maxat Bakhytzhanovich – PhD student, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan.
e-mail: maqsat.tustykbayev@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9551-9295,

Абсадықов Бақыт Нәрікбайұлы – техника ғылымдарының докторы, профессор, Сәтбаев университеті, Алматы қ., Қазақстан
Абсадыков Бахыт Нарикбаевич – доктор технических наук, профессор, Сатпаев университет, г. Алматы, Казахстан
Absadykov Bakhyt Narikbayevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
e-mail: absadykov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7829-0958

Асқаров Ерлан Сейтқасымұлы – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы қ., Қазақстан
Аскаров Ерлан Сейткасымович – кандидат технических наук, асс. профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, г. Алматы, Казахстан
Askarov Erlan Seitkasymovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International Transport and Humanitarian University, Almaty, Republic of Kazakhstan.
e-mail: erlan57@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4487-4458

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_15
МРНТИ 36.16.43, 37.31.23, 28.23.25

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОИДА ГОРОДА АСТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

АСТАНА ҚАЛАСЫНЫҢ ЖЕРГІЛІКТІ ГЕОИД МОДЕЛІНІҢ ДӘЛДІГІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІН ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ АРТТЫРУ

IMPROVING THE ACCURACY OF THE LOCAL GEOID MODEL OF ASTANA CITY USING MACHINE LEARNING METHODS

А.С. Уразалиев [1], **Д.А.Шоганбекова** [1,2*], **М.С. Қожахметов** [1,3], **Н.Н. Жақсығұл** [1,2]
[1]Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан
[2]Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Казахстан
[3]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
*Автор-корреспондент: Шоганбекова Дания Асыгатовна, e-mail: d.shoganbekova@ionos.kz

Ключевые слова:
моделирование, модель геоида, LSMSA, преобразование Гельмерта, регрессоры машинного обучения, гауссовская процессная регрессия, регрессия опорных векторов.

АННОТАЦИЯ
Разработка высокоточной региональной модели геоида является важным этапом модернизации высотной основы Казахстана и повышения эффективности определения высот по данным ГНСС. В работе предложен гибридный подход к уточнению локальной модели геоида для района г. Астана, сочетающий базовое гравиметрическое решение LSMSA и статистическое моделирование остаточных поправок. Базовая поверхность геоида рассчитывается методом модификации формулы Стокса по методу наименьших квадратов с аддитивными поправками и проверяется контрольными пунктами ГНСС/Нивелирования. Для уменьшения расхождений с наблюдениями формируется корректирующая поверхность по остаткам с использованием 7-параметрического преобразования Гельмерта и регрессионных моделей машинного обучения (GPR, SVR, LSBoost). На независимой тестовой подвыборке для SVR получено снижение RMSE с 0,062 до 0,047 м, что соответствует уменьшению ошибки на 24%. Результаты показывают, что предложенная схема уменьшает разброс остаточных ошибок и улучшает согласование модели геоида с данными ГНСС/Нивелирования.

Түйінді сөздер:
модельдеу, геоид моделі, LSMSA, Гельмерт түрлендіруі, машиналық оқыту регрессорлары, гаусстық процестік

ТҮЙІНДЕМЕ
Жоғары дәлдікті өңірлік геоид моделін әзірлеу Қазақстанның биіктік негізін жаңғыртудың және ЖНСЖ деректері бойынша биіктікті анықтау тиімділігін арттырудың маңызды кезеңі болып табылады. Жұмыста Астана қаласы ауданы үшін жергілікті геоид моделін нақтылауға арналған, LSMSA гравиметриялық базалық

© 2026 **А.С. Уразалиев, Д.А. Шоганбекова, М.С. Қожахметов, Н.Н. Жақсығұл**
Данная работа распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

регрессия, тірек векторлар регрессиясы.

шешімін және қалдық түзетулерді статистикалық модельдеуді біріктіретін гибридті тәсіл ұсынылған. Геоидтың базалық беті аддитивті түзетулері бар Стокс формуласын ең кіші квадраттар әдісімен модификациялау арқылы есептеліп, ЖНСЖ /Нивелирлеу бақылау пункттері бойынша тексеріледі. Бақылаулармен айырмашылықтарды азайту үшін қалдықтар негізінде 7-параметрлі Гельмерт түрлендіруі және машиналық оқыту регрессиялық модельдері (GPR, SVR, LSBoost) қолданылып, түзету беті құрылады. Тәуелсіз тестік таңдамада SVR үшін RMSE 0.062-ден 0.047 м-ге дейін төмендеді, бұл қателіктің 24%-ға азаюына сәйкес келеді. Нәтижелер ұсынылған схеманың қалдық қателердің шашырауын азайтып, геоид моделінің ЖНСЖ /Нивелирлеу деректерімен сәйкестігін жақсартатынын көрсетеді.

Keywords:
modeling, geoid model, LSMSA, Helmert transformation, machine learning regressors, Gaussian process regression, support vector regression.

ABSTRACT

The development of a high-precision regional geoid model is an important step in the modernization of Kazakhstan's vertical reference framework and in improving the efficiency of height determination from GNSS data. This paper proposes a hybrid approach to refining the local geoid model for the Astana area by combining the LSMSA gravimetric base solution with statistical modeling of residual corrections. The base geoid surface is computed using the Least Squares Modification of Stokes' Formula with additive corrections and is validated against GNSS/levelling control points. To reduce discrepancies with observations, a correction surface is formed from residuals using a 7-parameter Helmert transformation and machine learning regression models (GPR, SVR, LSBoost). On the independent test subset, SVR reduced RMSE from 0.062 to 0.047 m, corresponding to a 24% decrease in error. The results show that the proposed scheme reduces the spread of residual errors and improves the agreement of the geoid model with GNSS/levelling data.

ВВЕДЕНИЕ

Создание точной модели геоида является одной из ключевых задач современной геодезии, поскольку она лежит в основе единой национальной высотной системы и согласованного определения высот по данным ГНСС. Для Казахстана это особенно актуально из-за больших размеров территории и контрастного рельефа — от Каспийской низменности до горных систем Тянь-Шаня и Алтая. В таких условиях глобальные модели геопотенциала (ГГМ), включая EGM2008 и XGM2019e, как правило, дают лишь усредненное описание гравитационного поля и не всегда обеспечивают требуемую точность для инженерно-геодезических приложений, что обусловливает необходимость разработки регионально адаптированных моделей (Shoganbekova et al., 2025). Традиционно при построении геоида используются данные нивелирования и ГНСС, однако такие наблюдения затратны и ограничены по плотности, а также могут содержать пропуски и неоднородности (Elshewy et al., 2024; Chen et al., 2022).

Высокоточные региональные решения рассматриваются как важная часть формирования государственной системы координат и высот и создают основу для перехода от трудоемкого геометрического нивелирования к ГНСС-технологиям, где ортометрическая высота определяется как разность эллипсоидальной высоты и высоты геоида.

Среди современных гравиметрических подходов широкое распространение получил метод модификации формулы Стокса по методу наименьших квадратов с аддитивными поправками (LSMSA, «метод KTH») (Abbak & Ustun, 2015; Işık et al., 2021), обеспечивающий

согласованное объединение аномалий силы тяжести, топографических поправок по ЦМР и данных ГГМ с учетом усечения и спектральных ошибок. Однако даже при физически корректной постановке нередко сохраняются остаточные расхождения с данными ГНСС/Нивелирования, обусловленные несогласованностями датумов, шумом измерений и локальными неоднородностями (Abdalla & Mogren, 2015). Для их уменьшения применяют параметрическое преобразование (например, по Гельмерту), но глобальные параметрические модели не всегда способны описать пространственно сложные систематические эффекты.

Прогресс в машинном обучении расширил возможности геодезического моделирования за счет гибких, основанных на данных, методов корректировки остаточных расхождений при вычислении геоида. Показано, что подходы на основе опорных векторов и нейросетевые архитектуры эффективно аппроксимируют высоты геоида по данным ГНСС/Нивелирования, а более поздние работы развили эти идеи, предложив регрессионные схемы повышенной сложности (включая ансамблевые и эвристические модели), которые нередко превосходят классические интерполяторы в локальных тестовых районах (Zaletnyik et al., 2008; Ghaffari-Razin & Hooshangi, 2024). Существенный интерес представляют ядровые методы, прежде всего гауссовская процессная регрессия (GPR), а также гибридные решения, где глобальные модели геопотенциала дополняются ML-моделированием остатков с учетом рельефа и характеристик окрестности (Konakoglu & Akar, 2021; Pham et al., 2025). В целом ML-подходы ценны способностью описывать нелинейные зависимости без жесткой параметризации, работать при нерегулярной пространственной выборке и часто снижать среднеквадратическую ошибку и разброс остатков по сравнению с IDW, кригингом и решениями, основанными только на ГГМ, особенно при ограниченной плотности опорных данных (Konakoglu & Akar, 2022; Liu et al., 2024). На практике чаще всего применяются SVR, GPR и усиление методом наименьших квадратов (LSBoost), при этом гиперпараметры обычно подбирают перебором по сетке или байесовской оптимизацией с k-кратной кросс-валидацией (Butt et al., 2021).

В настоящей работе методы машинного обучения рассматриваются не как замена гравиметрической модели, а как компактный корректирующий слой, дополняющий базовое LSMSA-решение. В качестве объекта исследования выбран район г. Астана, для которого построено базовое гравиметрическое решение LSMSA на основе доступных гравиметрических данных, глобальной модели XGM2019e_2159 и ЦМР FABDEM с разрешением 30 м. Далее остаточные расхождения с данными ГНСС/Нивелирования моделируются двумя классами подходов: 7-параметрическим преобразованием Гельмерта и регрессорами машинного обучения (GPR, SVR, LSBoost), что позволяет сравнить их по точности и устойчивости на независимой тестовой выборке. Такой подход обеспечивает целостную схему построения локальной модели геоида для Астаны, в которой физически обоснованная компонента задается LSMSA, а локальные систематические эффекты учитываются через моделирование остаточных поправок.

Территория исследования. На севере Казахстана, в пределах окрестностей города Астана, расположена исследуемая территория, ограниченная координатами 49,767°–52,5° с. ш. и 70,05°–72,783° в. д. (рисунок 1). В геоморфологическом отношении она приурочена к бассейну реки Ишим. Для данной местности характерны волнистые равнины, развитая речная сеть, незначительные высотные различия и повсеместное распространение четвертичных отложений. При таких природных условиях пространственная изменчивость гравитационного поля определяется главным образом неоднородностью плотности отложений, изменением мощности рыхлых пород, а также локальным развитием процессов эрозии и аккумуляции. По сравнению с горными территориями роль топографического фактора здесь существенно менее выражена (Reguzzoni et al., 2021).

Несмотря на то, что рассматриваемая территория относится к районам с низкой сейсмической активностью, для нее характерны медленные деформации земной коры, а также воздействие сезонной гидрологической нагрузки. Последняя связана с таянием снежного покрова, изменением влажности грунтов, колебанием уровней воды в бассейне реки Ишим и регулирующим влиянием водохранилищ. Совместное действие указанных факторов приводит к возникновению пространственно согласованных колебаний очень малой амплитуды как в гравитационном поле, так и в вертикальных смещениях земной поверхности (Hu et al., 2021).

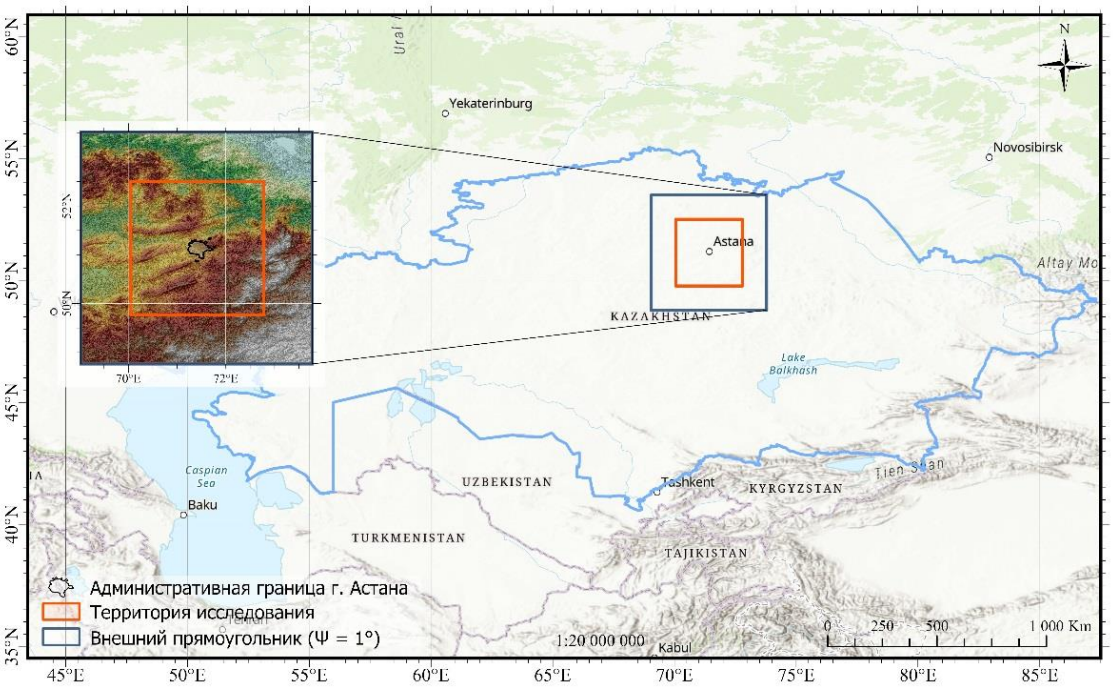


Рисунок 1. Расположение района исследования
Примечание – составлено авторами

С целью ослабления краевых эффектов вычисления проводились в пределах внутренней прямоугольной области, тогда как этапы подготовки и предварительной обработки исходных данных выполнялись в расширенной зоне, включавшей буфер шириной 1°. Применение такой схемы способствует повышению устойчивости вычислительных процедур и обеспечивает корректный учет топографических воздействий наряду с длинноволновой составляющей гравитационного поля (El Shouny et al., 2021).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гибридная модель геоида в данном исследовании построена на основе четырех взаимодополняющих наборов данных: наземных гравиметрических измерений, глобальной модели геопотенциала (ГГМ), цифровой модели рельефа (ЦМР) высокого разрешения и пунктов ГНСС/Нивелирования. В настоящем исследовании длинноволновая составляющая гравитационного поля представлена глобальной гравитационной моделью XGM2019e_2159, поскольку это одна из наиболее актуальных комбинированных моделей, интегрирующих спутниковые данные (GRACE, GOCE) и наземные гравиметрические данные [Liang et al., 2020; Zingerle et al., 2020]. Топографическая информация и поправки за рельеф получены на основе набора FABDEM с разрешением 30 м, обеспечивающего улучшенное представление высот поверхности земли (Li et al., 2022). Однако основными

источниками информации являются гравиметрические данные – сформированные на основе оцифрованных исторических съемок, проверенные современными наземными измерениями и согласованные с глобальными моделями – а также данные ГНСС/Нивелирования, которые используются как для AI-поддерживаемой корректировки геоида, так и для независимой валидации модели геоида (Shoganbekova et al., 2025a; Shoganbekova et al., 2025b).

Данные ГНСС/Нивелирования. Для независимой валидации локальной модели геоида использована сеть из 70 пунктов ГНСС/Нивелирования в пределах территории исследования. Их пространственное распределение приведено на рисунке 2. Набор сформирован в рамках проекта по развитию Национальной инфраструктуры пространственных данных («Геопортал открытых пространственных данных Республики Казахстан», 2026) и включен в официальную государственную систему координат QazTRF-23 («Государственное геодезическое обеспечение», 2026). Для каждого пункта доступны нормальные высоты в системе БСВ-77 и эллипсоидальные высоты, полученные по результатам ГНСС-наблюдений.

По классу точности в выборке представлены 5 пунктов 1-го класса, 22 пункта 2-го класса и 43 пункта 3-го класса. Нормальные высоты в сети имеют следующие статистические параметры: min 220,5 м, mean 392,8 м, max 609,4 м.

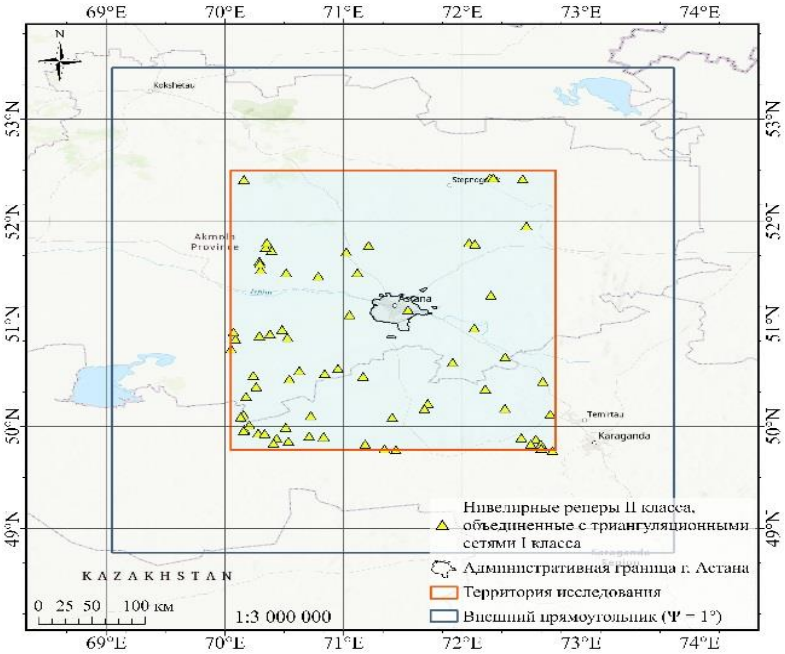


Рисунок 2. Пространственное распределение пунктов ГНСС/Нивелирования национальной нивелирной сети

Примечание – составлено авторами

Методы локального моделирования геоида. В работе используется комбинированная методика, в которой метод модификации формулы Стокса по методу наименьших квадратов с аддитивными поправками (LSMSA, «метод KTH») дополняется инструментами машинного обучения для повышения точности локальной модели геоида. Общий алгоритм построения разделен на три ключевых этапа (рисунок 3).

На *первом этапе* формируется базовая гравиметрическая поверхность геоида по схеме LSMSA (Sjöberg, 2003). Данный подход обеспечивает строгую постановку задачи и позволяет согласованно объединять разнородные источники информации – наземные

аномалии силы тяжести, глобальные модели геопотенциала (ГГМ), цифровые модели рельефа и данные ГНСС/Нивелирования – в единую региональную модель.

В рамках LSMSA параметры модификации ядра Стокса оптимизируются методом наименьших квадратов, что направлено на минимизацию среднеквадратической ошибки вычисленных значений высоты геоида (Sjöberg & Bagherbandi, 2017). При этом учитываются:

- ошибки усечения и спектральные составляющие погрешностей аномалий силы тяжести;
- регуляризация плохо обусловленной системы для гармоник высоких степеней;
- аддитивные поправки, связанные с влиянием рельефа, атмосферы, эллипсоидальных эффектов и операцией продолжения вниз.

Итогом первого этапа является гравиметрическая модель N_{LSMSA}, используемая в дальнейшем как базовое решение для последующего уточнения.

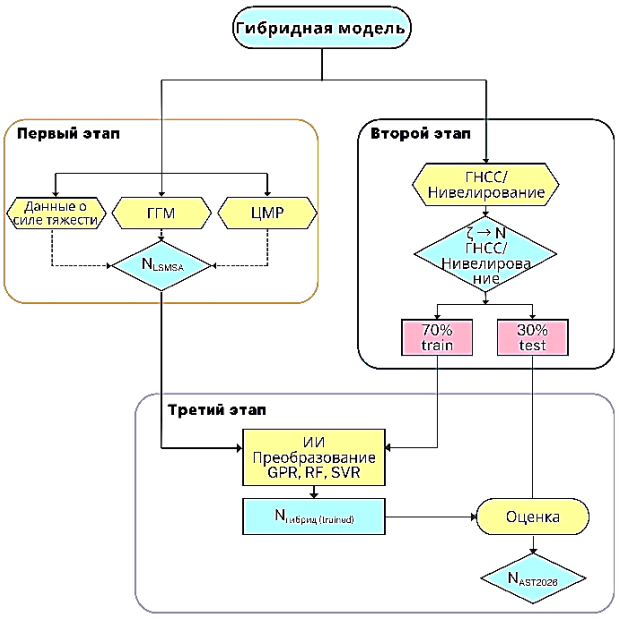


Рисунок 3. Процесс построения гибридной модели геоида
Примечание – адаптировано по (Urazaliyev et al., 2025)

На *втором этапе* значения $N_{GNSS/Lev}$ разбиваются на обучающую и тестовую подвыборки в пропорции 70 % и 30 % соответственно для последующего сопоставления 7-параметрического преобразования Гельмерта и AI-регрессоров. Разбиение 70/30 в формате hold-out является распространенной практикой для малых и умеренных наборов данных ГНСС/Нивелирования и соответствует подходам, применяемым в ряде современных работ по моделированию геоида (Elshewy et al., 2024; Konakoglu & Akar, 2021; Pham et al., 2025).

Третий этап методики включает построение корректирующей поверхности по точечным остаткам между значениями высоты геоида, полученными по данным ГНСС/Нивелирования, и гравиметрическим базовым решением, после чего данная поправка накладывается на поверхность LSMSA для формирования итоговой гибридной модели. В традиционной постановке согласование выполняют с использованием преобразования Гельмерта (3, 5 или 7-параметрического), позволяющего описать систематические расхождения через сдвиги, вращения и масштабные искажения. Однако в условиях различий высотных датумов или наличия топографических несогласованностей преобразование по Гельмерту может приводить к сохранению систематических ошибок.

Поэтому для более гибкого и точного описания остаточного поля предлагается применять AI-регрессию, аппроксимирующую разность между значениями ГНСС/Нивелирования и моделью LSMSA (Urazaliyev et al., 2025).

Введем вектор признаков $\chi = [E, N, N_{LSMSA}]$, включающий локальные координаты восток–север (в километрах) и базовое значение высоты геоида LSMSA, интерполированное в положение пункта (в метрах). Для каждого контрольного пункта вычисляются точечные остатки в виде

$$y(\chi) = \Delta N(\chi) = N_{GNSS/Lev}(\chi) - N_{LSMSA}(\chi), \tag{1}$$

далее обучается регрессор $\hat{f}(\chi)$, построенный по данным, так что $\hat{f}(\chi) \approx \Delta N(\chi)$. После этого итоговую гибридную модель геоида формируют путем наложения соответствующего корректирующего поля на базовую поверхность,

$$N_{hyb}(\chi) = N_{LSMSA}(\chi) + f(\chi). \tag{2}$$

Для аппроксимации ΔN в пределах района исследования применяются три взаимодополняющих регрессионных подхода: гауссовская процессная регрессия (GPR), усиление методом наименьших квадратов (LSBoost) и регрессия опорных векторов (SVR). Модели обучаются на 70% набора данных ГНСС/Нивелирования и оцениваются на оставшихся 30% в рамках hold-out проверки.

Модель GPR реализована с использованием ядра с автоматическим определением релевантности (ARD) на основе квадратично-экспоненциальной ковариационной функции (GPR, ARD-ядро). В этой постановке на скрытое поле $f(\cdot)$ задается априорное распределение гауссовского процесса при независимом и одинаково распределенном гауссовом шуме наблюдений,

$$f(\chi) \sim \mathcal{GP}\left(0, k_\theta(\chi, \chi')\right), \qquad y_i = f(\chi_i) + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_n^2). \tag{3}$$

Для повышения адаптивности GPR применяется схема автоматического определения релевантности (ARD), при которой для признаков E, Nи N_{LSMSA} оцениваются раздельные масштабы длины. В вычислительной реализации в качестве основной ковариационной функции используется ядро Матерна $\nu = 3/2$; при необходимости допускается переход к ядру Матерна $\nu = 5/2$ или к квадратично-экспоненциальному ядру. Далее запишем:

$$r(\chi, \chi') = \sqrt{\sum_j \frac{(x_j - x'_j)^2}{l_j^2}} \tag{4}$$

Ядро имеет вид:

$$k_{Matèrn-3/2} = \sigma_f^2\left(1 + \sqrt{3}r\right)e^{-\sqrt{3}r}, \; k_{SE} = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{1}{2}\sum_j \frac{(x_j - x'_j)^2}{l_j^2}\right). \tag{5}$$

При заданных обучающих входах X и целевых значениях y апостериорный прогноз в точке x^*характеризуется математическим ожиданием и дисперсией,

$$\mu_*(x_*) = k_*^T(K + \sigma_n^2 I)^{-1} y, \; \sigma_*^2(x_*) = k_{**} - k_*^T(K + \sigma_n^2 I)^{-1} k_*, \tag{6}$$

при этом гиперпараметры $\theta = \{\sigma_f, \{l_j\}, \sigma_n\}$ определяются посредством максимизации логарифма предельного правдоподобия. Разнородность единиц измерения входных переменных (E, N в км; N_{LSMSA} в м) учитывается за счет z-стандартизации и механизма ARD.

Регрессия опорных векторов (SVR, RBF-ядро). В модели SVR подбирается функция с малой нормой в пространстве RKHS при условии, что отклонения (остатки) остаются внутри ε - нечувствительной зоны:

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*} \frac{1}{2}\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{n}(\xi_i + \xi_i^*) \;\; s.t. \; \begin{cases} y_i - f(\chi_i) \le \varepsilon + \xi_i, \\ f(\chi_i) - y_i \le \xi_i^*, \\ \xi_i, \xi_i^* \ge 0. \end{cases} \tag{7}$$

Согласно теореме о представлении, искомая функция в SVR может быть записана в виде линейной комбинации ядерных функций по обучающим точкам:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} (a_i - a_i^*) k(\chi_i, \chi) + b, \tag{8}$$

где в данной работе используется RBF-ядро

$$k(\chi, \chi') = \exp\left(-\frac{\|\chi - \chi'\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{9}$$

Параметры C, ε и σ (KernelScale) задают компромисс между гладкостью аппроксимации и устойчивостью к шуму. Аналогично постановке для GPR входные переменные (E, N, N_{LSMSA}) используются в исходных единицах (координаты – в км, N_{LSMSA} – в м) и перед обучением приводятся к стандартизованному виду.

Усиление методом наименьших квадратов (LSBoost). Метод LSBoost строит аддитивную модель как ансамбль регрессионных деревьев, последовательно уменьшая квадратичную функцию потерь. В качестве начального приближения берется константная модель, минимизирующая сумму квадратов отклонений:

$$f_0(\chi) = \underset{c}{arg\,\min} \sum_i (y_i - c)^2 = \overline{y} \tag{10}$$

Далее для m=1,…,M, $r_{im} = y_i - f_{m-1}(\chi_i)$, по которым обучается очередное дерево h_m, после чего выполняется обновление

$$h_m \leftarrow tree\ fit\ to\{(\chi_i)\}, r_{im})\},\ f_m(\chi) = f_{m-1}(\chi) + \nu h_m(\chi),\ \nu \in (0,1] \tag{11}$$

Регуляризация задается числом итераций M, коэффициентом обучения ν и параметрами сложности деревьев (например, минимальным размером листа). В результате формируется гибкая кусочно-гладкая аппроксимация $\Delta N(E, N, N_{LSMSA})$, дополняющая более гладкие ядровые модели GPR и SVR.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 4 представлены этапы формирования высоты геоида методом LSMSA, который состоит из вычисления приближенных высот, аддитивных поправок и итоговой высоты геоида. Показанное распределение характеризует региональную структуру поверхности геоида, восстановленную по данным наземной гравиметрии с учетом длинноволновой составляющей, заданной моделью XGM2019e_2159.

В таблице 1 приведены статистические характеристики аддитивных поправок: топографической, поправки за аналитическое продолжение вниз, эллипсоидальной и атмосферной.

Таблица 1. Статистика примененных аддитивных поправок

Поправки	Min, м	Max, м	Mean, м	STD, м
Ntopo	-0,0500	-0,0029	-0,0169	0,0064
Ndws	-0,0060	0,0243	0,0064	0,0041
Nell	-0,0006	0,0000	-0,0003	0,0001
Natm	0,0002	0,0007	0,0004	0,0001
All	-0,0330	0,0051	-0,0104	0,0062
Примечание – составлено авторами				

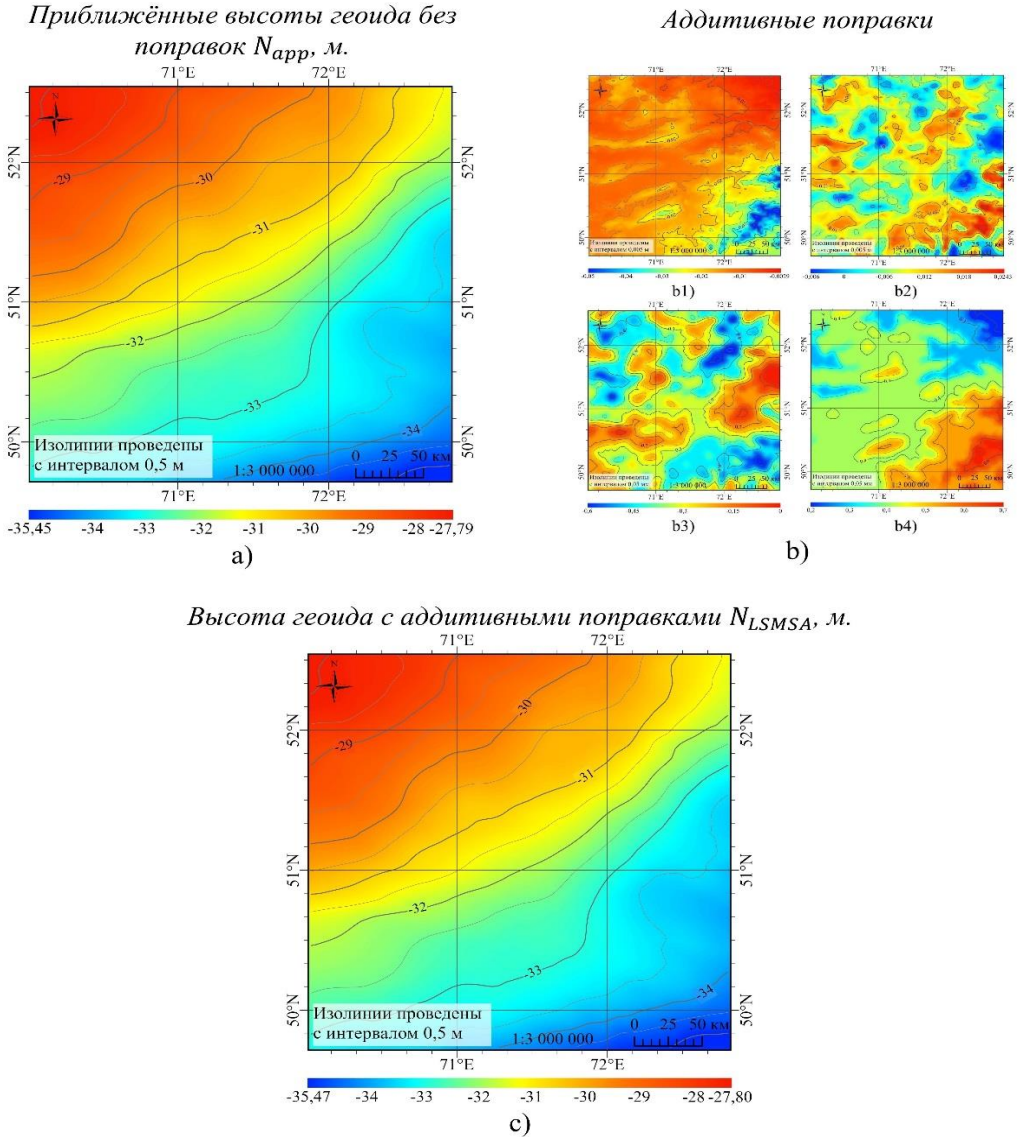


Рисунок 4. Формирование высоты геоида методом LSMSA:
a – Приближенные высоты геоида без поправок N_{app} (м); b – Аддитивные поправки: b1) Топографические поправки (м), b2) Поправки за аналитическое продолжение вниз (м), b3) Эллипсоидальные поправки (мм), b4) Атмосферные поправки (мм). c) Высота геоида с аддитивными поправками N_{LSMSA} (м).

Примечание – составлено авторами

Результаты расчета по методу LSMSA показывают, что высота геоида в пределах исследуемой территории изменяется от -35,477 м до -27,803 м; среднее значение составляет -31,723 м при стандартном отклонении 1,659 м.

Корректирующая поверхность с использованием ИИ. Были сформированы остатки между наблюдаемыми значениями высоты геоида $N_{GNSS/Lev}$ и значениями N_{LSMSA}, интерполированными в положения 70 контрольных пунктов (обучающая выборка – 50, тестовая – 20).

В таблице 2 приведены статистические характеристики распределения ошибок для исходного варианта (До) и для набора моделей корректировки (После) с раздельной оценкой по выборкам ALL/TRAIN/TEST.

Таблица 2. Статистика остаточных ошибок при корректировке геоида для выборок ALL/TRAIN/TEST, м

Метод	Разделение	Кол-во	Mean	Median	STD	RMSE	MAE	IQR	Min	Max
До										
-	All	70	-0,015	-0,005	0,054	0,056	0,042	0,071	-0,179	0,116
	Train	50	-0,011	-0,003	0,052	0,053	0,041	0,072	-0,170	0,116
	Test	20	-0,024	-0,010	0,059	0,062	0,043	0,065	-0,179	0,073
После										
Гель-мерт	All	70	0,001	0,004	0,048	0,048	0,034	0,046	-0,161	0,107
	Train	50	0,000	0,003	0,043	0,043	0,030	0,039	-0,161	0,107
	Test	20	0,002	0,009	0,060	0,058	0,046	0,087	-0,148	0,089
SVR (RBF)	All	70	0,000	0,002	0,041	0,041	0,033	0,068	-0,114	0,142
	Train	50	0,002	0,003	0,038	0,038	0,031	0,078	-0,051	0,142
	Test	20	-0,006	-0,001	0,048	0,047	0,037	0,057	-0,114	0,076
GPR (ARD)	All	70	-0,001	0,003	0,043	0,043	0,031	0,039	-0,140	0,100
	Train	50	0,000	0,002	0,041	0,040	0,029	0,039	-0,133	0,100
	Test	20	-0,004	0,006	0,050	0,049	0,035	0,047	-0,140	0,059
LSBoost	All	70	-0,001	0,000	0,028	0,028	0,014	0,006	-0,133	0,062
	Train	50	0,000	0,000	0,004	0,004	0,003	0,003	-0,011	0,013
	Test	20	-0,002	0,019	0,054	0,052	0,043	0,069	-0,133	0,062

Примечание – составлено авторами

В таблице 2 приведены сводные характеристики остатков по контрольным пунктам ГНСС/Нивелирования для базового решения LSMSA (*До*/-) и вариантов корректировки (*После*) с раздельной оценкой по ALL/TRAIN/TEST. Для исходного варианта сохраняется отрицательное смещение, а уровень ошибок на тестовой подвыборке остается выше, чем по всей выборке (RMSE: 0,062 м для TEST при 0,056 м для ALL), что указывает на необходимость дополнительного согласования гравиметрической поверхности с наземными наблюдениями.

7-Параметрическое преобразование Гельмерта ожидаемо приводит среднюю ошибку к значениям, близким к нулю, и уменьшает RMSE по всей выборке до 0,048 м. Однако на независимой тестовой выборке улучшение менее выражено (RMSE = 0,058 м), а сохраняющийся разброс ошибок показывает, что одной глобальной параметрической модели недостаточно для описания остаточного поля.

Более заметный эффект на TEST обеспечивают регрессоры машинного обучения. Для SVR (RBF) и GPR (ARD) RMSE на тестовых точках составляет 0,047–0,049 м при малом смещении и более компактном распределении ошибок, что отражает более гибкое описание пространственной структуры остатков по сравнению с преобразованием Гельмерта. Однако модель LSBoost показала признаки переобучения. При практически нулевой ошибке на обучающей (TRAIN) выборке (RMSE ≈ 0,004 м) на тестовых данных (TEST) качество ухудшается (RMSE ≈ 0,052 м). Это указывает на необходимость дополнительного контроля сложности модели, если рассматривать данный метод как основной способ корректировки.

Гибридная модель геоида (LSMSA + ИИ). На данном этапе была построена корректирующая поверхность по остаткам с применением регрессионных моделей машинного обучения. Это позволило добиться повышения согласованности между базовым гравиметрическим решением LSMSA и наземными наблюдениями ГНСС/Нивелирования. Как видно из таблицы 2, SVR с RBF-ядром показывает наиболее устойчивое качество на

независимой тестовой подвыборке. Это, в свою очередь, послужило обоснованием для выбора данного метода при формировании итоговой гибридной модели геоида.

Гибридная поверхность строится как суперпозиция базовой модели и корректирующего поля, вычисленного регрессором:

$$N_{AST2026} = N_{LSMSA} + f_{SVR}(\Delta X) \tag{12}$$

где $f_{SVR}(\Delta X)$ аппроксимирует остаточную поправку ΔN, а χ – вектор признаков, включающий локальные координаты восток–север и значение N_{LSMSA}, интерполированное в соответствующей точке. Далее модель f_{SVR} применяется ко всем узлам расчетной сетки, после чего полученное поле поправок добавляется к N_{LSMSA}. Тем самым сохраняется физически согласованная длинноволновая компонента, определяемая LSMSA.

Результаты пространственной реализации показаны на рисунке 5. На рисунке 5, a представлено корректирующее поле ΔN_{SVR}, отражающее пространственную структуру поправок, необходимых для согласования LSMSA с наблюдениями. На рисунке 5, b приведена итоговая поверхность высоты геоида $N_{LSMSA+SVR}$, рассчитанная на сетке с разрешением $2' \times 2'$. Визуально видно, что корректирующее поле имеет локальный характер и изменяется в пределах исследуемой области, тогда как общая форма поверхности геоида определяется базовым гравиметрическим решением.

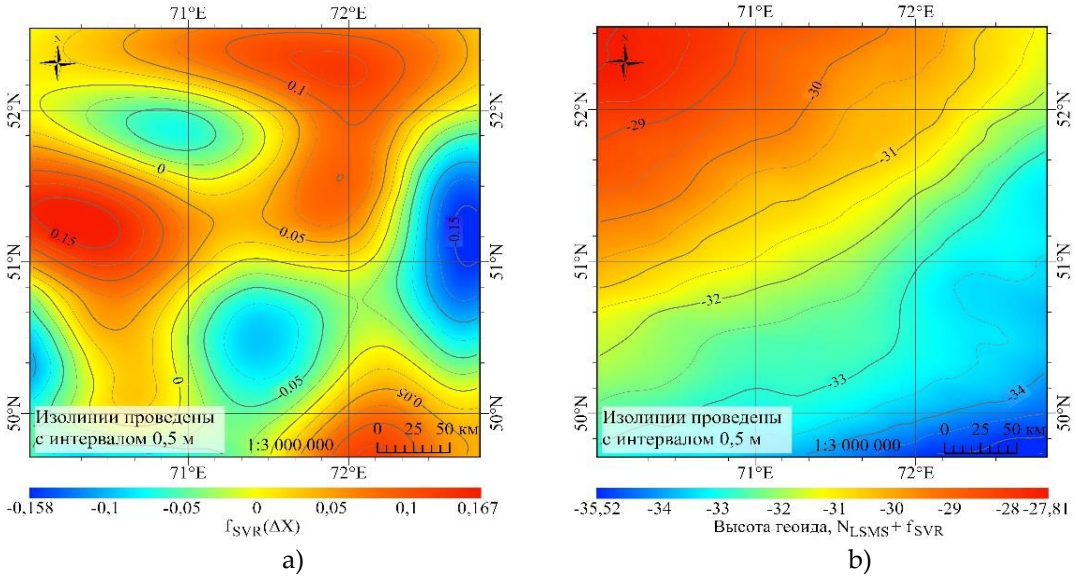
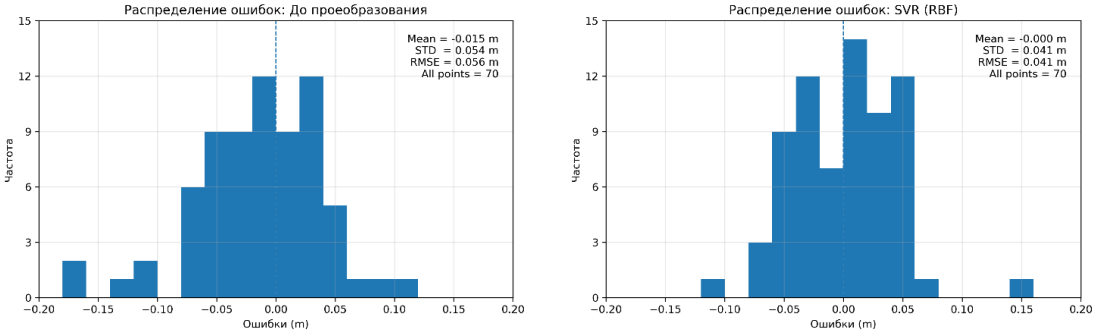


Рисунок 5. a – Корректирующее поле ΔN_{SVR} (м);
b – Итоговая поверхность высоты геоида $N_{LSMSA+SVR}$ (м).
Примечание – составлено авторами

На рисунке 6 представлено распределение ошибок до и после введения корректирующей поправки. Для исходного варианта (рисунок 6, a) характерно более выраженное смещение, тогда как после применения SVR-коррекции (рисунок 6, b) распределение становится ближе к нулевому центру. Это подтверждается снижением RMSE на независимой тестовой подвыборке по сравнению как с базовым решением LSMSA, так и с 7-параметрическим преобразованием Гельмерта (таблица 2). Полученные результаты показывают эффективность выбранной гибридной схемы при уточнении поверхности геоида на исследуемой территории.

Результаты расчетов показывают, что базовое гравиметрическое решение LSMSA обеспечивает физически согласованную поверхность геоида для района Астаны, однако без

дополнительного согласования с данными ГНСС/Нивелирования сохраняются остаточные систематические и случайные составляющие. При оценке до преобразования (Before, таблица 2) наблюдается устойчивое отрицательное смещение (Mean на TEST = -0,024 м), а уровень ошибок на независимых точках остается заметным (RMSE на TEST = 0,062 м). Это означает, что даже в условиях относительно спокойного рельефа локальные несогласованности между гравиметрическим решением и контрольными наблюдениями проявляются статистически значимо и требуют корректировки остаточного поля.



a b

Рисунок 6. Гистограммы распределения ошибок модели геоида до и после коррекции на основе SVR: a – до коррекции; b – после коррекции, м

Примечание – составлено авторами

7-параметрическое преобразование Гельмерта ожидаемо решает задачу глобального выравнивания уровней. Систематический сдвиг практически устраняется (Mean на TEST ≈ 0,002 м), а общая ошибка уменьшается (RMSE на ALL снижается с 0,056 до 0,048 м, то есть примерно на 14%). Однако на тестовой подвыборке эффект оказывается существенно слабее: RMSE снижается лишь с 0,062 до 0,058 м (около 6 %). Такая разница между ALL и TEST указывает, что параметрическая модель, эффективно снимая общий сдвиг, не полностью воспроизводит пространственно неоднородную структуру остатков, которая проявляется именно при проверке на независимых точках. Дополнительно это подтверждается тем, что на TEST разброс по STD практически не уменьшается (0,059 → 0,060 м).

В гибридной схеме методы машинного обучения используются не как замена LSMSA, а для моделирования остаточной поправки ΔN в зависимости от локального положения точки и значения N_{LSMSA}. При таком подходе физически согласованная основа сохраняется за базовым решением, тогда как регрессионная модель описывает локальные систематические особенности и пространственное распределение ошибок. По результатам оценки на независимой тестовой выборке для SVR (RBF) получено $RMSE = 0{,}047$ м, а для GPR (ARD) – 0,049 м. По отношению к исходному решению LSMSA наблюдается уменьшение RMSE примерно на 24% для SVR (0,062 → 0,047 м) и на 21% для GPR (0,062 → 0,049 м). По сравнению с 7-параметрическим преобразованием Гельмерта улучшение также сохраняется: около 19% для SVR (0,058 → 0,047 м) и 16% для GPR (0,058 → 0,049 м). Изменения затрагивают не только RMSE. Для SVR и GPR на тестовой подвыборке уменьшается и стандартное отклонение ошибок (STD), на 19% и 15% соответственно. Кроме того, значение среднего смещения снижается до сантиметрового уровня. Для GPR величина (MEAN) по сравнению с базовым решением уменьшается приблизительно на 83% (0,024 → 0,004 м), а для SVR – на 75% (0,024 → 0,006 м). Это указывает на то, что ML-коррекция лучше описывает локальную структуру остаточного поля, чем глобальная 7-параметрическая модель. Однако для LSBoost получены менее однозначные результаты. С одной стороны, по

совокупной выборке значение метрики остается низким (RMSE = 0,028 м), а на обучающей подвыборке ошибки практически отсутствует (RMSE ≈ 0,004 м). С другой стороны, на тестовой подвыборке составляет около 0,052 м, что хуже результатов SVR и GPR, при заметном расхождении между TRAIN и TEST. Такое соотношение обычно рассматривается как признак переобучения, при котором модель слишком точно воспроизводит обучающие данные, но хуже работает на независимых точках. Поэтому при данном объеме обучающей выборки для LSBoost необходим более детальный контроль сложности модели. Тогда как SVR и GPR показывают более устойчивые результаты при переносе на тестовые данные.

Таким образом, при сохранении физически обоснованной базы LSMSA в рамках выполненного эксперимента наилучшие результаты при сопоставлении с данными ГНСС/Нивелирования показали методы SVR (RBF) и GPR (ARD). Из них минимальное значение RMSE на независимой тестовой подвыборке получено для SVR при близких значениях смещения и разброса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе для района г. Астана была построена локальная модель геоида на основе гравиметрического решения LSMSA и последующей корректировки остаточного поля по контрольным пунктам ГНСС/Нивелирования. Базовое решение LSMSA обеспечивает физически обоснованное описание поверхности геоида, однако проверка на независимой тестовой подвыборке показала, что без дополнительной коррекции сохраняются как систематическое смещение, так и разброс ошибок. Для варианта Before/None на тестовой выборке получены RMSE = 0,062 м и Mean = –0,024 м, что указывает на необходимость локального уточнения модели.

Использование 7-параметрического преобразования Гельмерта позволило существенно уменьшить среднее смещение, однако снижение ошибки на независимых точках оказалось сравнительно небольшим. RMSE на TEST уменьшился лишь до 0,058 м, то есть примерно на 6%. Более высокий эффект был достигнут при моделировании остаточной поправки с помощью методов машинного обучения. Для моделей SVR (RBF) и GPR (ARD) значение RMSE на TEST составило 0,047–0,049 м, что соответствует уменьшению ошибки по сравнению с базовым решением на 21–24%. Одновременно сократились разброс ошибок и величина смещения, достигнув сантиметрового уровня.

Для LSBoost, напротив, полученные результаты оказались менее устойчивыми. При очень высокой точности на обучающей подвыборке качество на тестовых данных заметно снижается, что свидетельствует о переобучении в рамках рассматриваемой конфигурации и требует дополнительного ограничения сложности модели. В целом выполненные расчеты показывают, что гибридный подход, объединяющий LSMSA и коррекцию остаточного поля методами машинного обучения, позволяет сохранить физически обоснованную основу гравиметрического решения и одновременно повысить его соответствие данным ГНСС/Нивелирования. Среди рассмотренных вариантов наиболее устойчивый результат на независимой тестовой подвыборке показала модель SVR (RBF).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP26197867.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ: Оригинальные материалы, представленные в этом исследовании, включены в статью. С дополнительными вопросами можно обратиться к автору-корреспонденту.

БЛАГОДАРНОСТИ: Мы выражаем благодарность всем авторам статей, упомянутых в данном обзоре.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы не применяли инструменты искусственного интеллекта (ИИ) при подготовке данной научной статьи, включая помощь в написании и редактировании текста, проверку фактов и анализ данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Abbak, R. A., & Ustun, A. (2015). A software package for computing a regional gravimetric geoid model by the KTH method. Earth science informatics, 8(1), 255-265. https://doi.org/10.1007/s12145-014-0149-3

Abdalla, A., & Mogren, S. (2015). Implementation of a rigorous least-squares modification of Stokes' formula to compute a gravimetric geoid model over Saudi Arabia (SAGEO13). Canadian journal of earth sciences, 52(10), 823-832. https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0192

Butt, J., Wieser, A., Gojcic, Z., & Zhou, C. (2021). Machine learning and geodesy: A survey. Journal of Applied Geodesy, 15(2), 117-133. https://doi.org/10.1515/jag-2020-0043

Chen, F., Zhang, X., Guo, F., Zheng, J., Nan, Y., & Freeshah, M. (2022). TDS-1 GNSS reflectometry wind geophysical model function response to GPS block types. Geo-Spatial Information Science, 25(2), 312-324. https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1997076

El Shouny, A., Al-Karagy, E. M., Mohamed, H. F., & Dawod, G. M. (2018). Gis-based accuracy assessment of global geopotential models: A case study of Egypt. American Journal of Geographic Information System, 7(4), 118-124. https://doi.org/10.5923/j.ajgis.20180704.03

Elshewy, M. A., Thanh, P. T., Elsheshtawy, A. M., Refaat, M., & Freeshah, M. (2024). A novel approach for optimizing regional geoid modeling over rugged terrains based on global geopotential models and artificial intelligence algorithms. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 27(4), 656-668. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.09.002

Ghaffari-Razin, S. R., & Hooshangi, N. (2024). Efficiency of machine learning models in estimation of local geoid height with GPS/Leveling measurements. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 33(130), 99-117.

Hu, Z., Zhang, Z., Sang, Y. F., Qian, J., Feng, W., Chen, X., & Zhou, Q. (2021). Temporal and spatial variations in the terrestrial water storage across Central Asia based on multiple satellite datasets and global hydrological models. Journal of Hydrology, 596, 126013. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126013

Information system "State geodetic support" (2025). [cited March 5, 2026]. https://ggo.gov.kz/geoportal (In Russ.).

Işık, M. S., Erol, B., Erol, S., & Sakil, F. F. (2021). High-resolution geoid modeling using least squares modification of Stokes and Hotine formulas in Colorado. Journal of geodesy, 95(5), 49. https://doi.org/10.1007/s00190-021-01501-z

Konakoglu, B., & Akar, A. (2021). GEOID UNDULATION PREDICTION USING GAUSSIAN PROCESSES REGRESSION: A CASE STUDY IN A LOCAL REGION IN TURKEY. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 18(1). https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0001

Konakoglu, B., & Akar, A. (2022). Prediction of geoid undulation using approaches based on GMDH, M5 model tree, MARS, GPR, and IDP. Acta Geodaetica et Geophysica, 57(2), 293-315. https://doi.org/10.1007/s40328-022-00378-4

Li, H., Zhao, J., Yan, B., Yue, L., & Wang, L. (2022). Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data. International Journal of Digital Earth, 15(1), 1149-1168. https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2094002

Liang, W., Li, J., Xu, X., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A high-resolution Earth's gravity field model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008. Engineering, 6(8), 860-878. https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.008

Liu, Y., Zhang, Y., Pang, Q., Liu, S., Li, S., Shi, X., ... & Wu, Y. (2024). Gravity predictions in data-missing areas using machine learning methods. Remote Sensing, 16(22), 4173. https://doi.org/10.3390/rs16224173

Open geospatial data of Republic of Kazakhstan (2025). [cited March 5, 2026]. https://map.gov.kz/ (In Russ.).

Pham, H. T., Awange, J., Claessens, S., & Kuhn, M. (2025). Local hybrid geoid/quasigeoid development using machine learning with consideration of neighbour spatial characteristics. Survey Review, 1-33. https://doi.org/10.1080/00396265.2025.2543647

Reguzzoni, M., Carrion, D., De Gaetani, C. I., Albertella, A., Rossi, L., Sona, G., ... & Sansó, F. (2021). Open access to regional geoid models: the International Service for the Geoid. Earth system science data, 13(4), 1653-1666. https://doi.org/10.5194/essd-13-1653-2021

Shoganbekova, D., Urazaliyev, A., Nurakynov, S., Kozhakhmetov, M., Zhaksygul, N., & Sermiagin, R. (2025a). Combination of Soviet-Era Surface Gravity and Modern Satellite Data for Geoid Model Computation: A Case Study for Kazakhstan. Computation, 13(11), 260. https://doi.org/10.3390/computation13110260

Shoganbekova, D., Urazaliyev, A., Sermiagin, R., Nurakynov, S., Kozhakhmetov, M., Zhaksygul, N., & Islyamova, A. (2025b). Evaluation of a Soviet-Era Gravimetric Survey Using Absolute Gravity Measurements and Global Gravity Models: Toward the First National Geoid of Kazakhstan. Geosciences, 15(10), 404. https://doi.org/10.3390/geosciences15100404

Sjöberg, L. E. (2003). A general model for modifying Stokes' formula and its least-squares solution. Journal of geodesy, 77(7), 459-464. https://doi.org/10.1007/s00190-003-0346-1

Sjöberg, L. E., & Bagherbandi, M. (2017). Gravity inversion and integration. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

Urazaliyev, A., Shoganbekova, D., Nurakynov, S., Kozhakhmetov, M., Zhaksygul, N., & Sermiagin, R. (2025). Hybrid Geoid Modelling with AI Enhancements: A Case Study for Almaty, Kazakhstan. Algorithms, 18(12), 737. https://doi.org/10.3390/a18120737

Zaletnyik, P., Völgyesi, L., & Paláncz, B. (2008). Modelling local GPS/levelling geoid undulations using Support Vector Machines. Periodica polytechnica civil engineering, 52(1), 39-43. https://doi.org/10.3311/pp.ci.2008-1.06

Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e: P. Zingerle et al. Journal of geodesy, 94(7), 66. https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Уразалиев Асет Сейсенбекович – «Геодезия» мамандығы бойынша философия докторы (PhD), «Ионосфера институты» ЖШС-нің Спутниктік және геодинамикалық зерттеулер зертханасының меңгерушісі

Уразалиев Асет Сейсенбекович – доктор философии (PhD) по специальности «Геодезия», заведующий лабораторией спутниковых и геодинамических исследований ТОО «Институт ионосферы»

Urazaliyev Asset Seisenbekovich – Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty "Geodesy", Head of the Laboratory of Satellite and Geodynamic Research at LLP "Institute of Ionosphere",
e-mail: a.urazaliyev@ionos.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7444-2897

Шоганбекова Дания Асыгатовна – «Геодезия» мамандығы бойынша философия докторы (PhD), «Ионосфера институты» ЖШС-нің бас ғылыми қызметкері, Халықаралық білім беру корпорациясының қауымдастырылған профессоры
Шоганбекова Дания Асыгатовна – доктор философии (PhD) по специальности «Геодезия», главный научный сотрудник ТОО «Институт ионосферы», ассоциированный профессор Международной образовательной корпорации
Shoganbekova Daniya Assygatovna – Doctor of Philosophy (PhD) in Geodesy, Chief Researcher at LLP "Institute of Ionosphere, Associate Professor at the International Educational Corporation,
e-mail: d.shoganbekova@ionos.kz,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6825-4774

Қожахметов Мағжан Серікжанұлы – «Ионосфера институты» ЖШС-нің ғылыми қызметкері, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің «Геокеңістіктік цифрлық инженерия» мамандығы бойынша PhD докторанты
Қожахметов Мағжан Серікжанұлы – научный сотрудник ТОО «Институт ионосферы», PhD-докторант по специальности «Геопространственная цифровая инженерия» Казахского Национального Исследовательского Технического университета им. К.И. Сатпаева
Kozhakhmetov Magzhan **Serikzhanuly** – researcher at LLP "Institute of Ionosphere", PhD doctoral student in Geospatial Digital Engineering at the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev,
e-mail: m.kozhakhmetov@ionos.kz,
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-9433-8674

Жақсығұл Найля Нұрланқызы – «Ионосфера институты» ЖШС-нің ғылыми қызметкері, Халықаралық білім беру корпорациясының «Геодезия» мамандығы бойынша PhD докторанты
Жақсығұл Найля Нұрланқызы – научный сотрудник ТОО «Институт ионосферы», PhD-докторант по специальности «Геодезия» Международной образовательной корпорации
Zhaksygul Nailya Nurlankyzy – researcher at LLP "Institute of Ionosphere", PhD doctoral student in Geodesy at the International Educational Corporation,
e-mail: n.zhaksygul@ionos.kz,
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3597-5056

https://doi.org/10.51885/3134-8009_JES_2026_2_16
ХҒТАР 55.01.11

ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ ҮШІН АДДИТИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАР НЕГІЗІНДЕГІ ЖАҢА КОНСТРУКЦИЯЛЫҚ ТӘСІЛДЕРГЕ ШОЛУ

ОБЗОР НОВЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ОСНОВАННЫХ НА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

AN OVERVIEW OF NEW APPROACHES TO THE DESIGN OF ELECTRIC MACHINES BASED ON ADDITIVE TECHNOLOGIES

А.Б. Усеров[1], **Д.С. Мырзалиев**[1], **В.Н. Печерский**[1], **О.Б. Сейдуллаева**[1*], **Н.Н. Рахымтай**[1]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан
*Жауапты автор: Сейдуллаева Орынкул Бахытқызы, e-mail: orynkul_s@mail.ru

Түйінді сөздер:
аддитивті технологиялар, аддитивті өндіріс, 3D басып шығару, электр машиналары, магниттік тізбек, ротор, энергия тиімділігі

ТҮЙІНДЕМЕ
Бұл мақала электр машиналары конструкцияларында аддитивті технологияларды қолданудың инженерлік және технологиялық мүмкіндіктерін зерттеуге арналған. Зерттеу тақырыбының өзектілігі электр машиналары өндірісінде заманауи аддитивті технологияларды пайдалану арқылы материал шығынын азайту, ішкі салқындату арналары бар күрделі конструкцияларды дайындау және технологиялық икемділікті арттыру қажеттілігімен түсіндіріледі. Жұмыстың мақсаты – электр машиналары конструкцияларында қолданылатын аддитивті өндіріс технологияларын салыстырмалы инженерлік тұрғыдан талдау және CAD/CAE негізіндегі сандық модельдеу арқылы олардың механикалық сенімділігін бағалау болып табылады. Зерттеу барысында LPBF, микроэкструзия және cold spray технологияларының өндірістік дәлдігі, бет сапасы, материалдық шектеулері және технологиялық тиімділігі салыстырмалы түрде талданды. SolidWorks CAD ортасында ротордың параметрлік үшөлшемді моделі құрылып, SolidWorks Simulation бағдарламасында оның кернеулік-деформациялық күйіне инженерлік талдау жүргізілді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы электр машиналары роторының аддитивті өндіріс жағдайындағы механикалық сенімділігіне CAD/CAE негізіндегі авторлық инженерлік талдау жүргізумен негізделеді. Алынған нәтижелер аддитивті технологияларды қолдану арқылы электр машиналарының массасын азайтуға, күрделі геометриялық құрылымдарды қалыптастыруға және энергия тиімділігін арттыруға мүмкіндік бар екенін көрсетті.

Ключевые слова:
аддитивные технологии, аддитивное производство,

АННОТАЦИЯ
Данная статья посвящена исследованию инженерных и технологических возможностей применения аддитивных технологий в конструкциях электрических машин. Актуальность темы исследова-

© 2026 **А.Б. Усеров, Д.С. Мырзалиев, В.Н. Печерский, О.Б. Сейдуллаева, Н.Н. Рахымтай**
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3D-печать, электрические машины, магнитная цепь, ротор, энергоэффективность

ния обусловлена необходимостью снижения расхода материалов, создания конструкций сложной геометрии с внутренними каналами охлаждения, повышения технологической гибкости при производстве электрических машин с использованием современных аддитивных технологий. Целью работы является сравнительный инженерный анализ аддитивных производственных технологий, применяемых в конструкциях электрических машин, оценка их механической надежности с использованием численного моделирования на основе CAD/CAE-систем. В ходе исследования проведен сравнительный анализ технологий LPBF, микроэкструзии и cold spray по таким параметрам, производственная точность, качество поверхности, материальные ограничения и технологическая эффективность. В среде SolidWorks CAD была создана параметрическая трехмерная модель ротора, в программе SolidWorks Simulation выполнен инженерный анализ его напряженно-деформированного состояния. Научная новизна исследования заключается в проведении авторского инженерного анализа механической надежности ротора электрической машины в условиях аддитивного производства с использованием CAD/CAE-моделирования. Полученные результаты показали, что применение аддитивных технологий позволяет снизить массу электрических машин, формировать конструкции сложной геометрии и повысить их энергетическую эффективность.

keywords:
additive technologies, additive manufacturing, 3D printing, electric machines, magnetic circuit, rotor, energy efficiency

ABSTRACT

This paper investigates the engineering and technological potential of additive manufacturing technologies in electric machine structures. The relevance of the study is determined by the need to reduce material consumption, manufacture complex geometries with internal cooling channels, and improve production flexibility in the design and manufacturing of electric machines. The aim of the study is to perform a comparative engineering analysis of additive manufacturing technologies used in electric machine structures and to evaluate their mechanical reliability through CAD/CAE-based numerical simulation. The study compares LPBF, microextrusion, and cold spray technologies in terms of manufacturing accuracy, surface quality, material limitations, and technological efficiency. A parametric three-dimensional rotor model was developed in the SolidWorks CAD environment, and its stress–strain state under centrifugal loading was analyzed using SolidWorks Simulation. The scientific novelty of the research lies in the original CAD/CAE-based engineering assessment of the mechanical reliability of an electric machine rotor designed for additive manufacturing. The simulation results showed that the maximum von Mises stress was 1.189×10^{7} Pa, the maximum displacement was 9.748×10^{-4} mm, and the calculated safety factor reached 52.2, indicating a high level of structural reliability. The obtained results demonstrate that additive manufacturing technologies provide opportunities to reduce rotor mass, create complex geometries, and improve the energy efficiency of electric machines.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда әлемдік өнеркәсіп қарқынды түрде цифрландыру және интеллектуалдандыру үдерісінен өтуде. Бұл өзгерістер «Индустрия 4.0» тұжырымдамасымен сипатталып, өндірістік жүйелерге цифрлық технологияларды, автоматтандыру құралдарын және жаңа өндірістік тәсілдерді кеңінен енгізуді көздейді. Аталған үдерістің маңызды құрамдас бөліктерінің бірі – аддитивті технологиялар болып табылады. Аддитивті өндіріс дәстүрлі

субтрактивті әдістерге балама ретінде материалды қабат-қабат қосу арқылы бұйым жасауға мүмкіндік береді және өндірістік процестердің икемділігін айтарлықтай арттырады.

Электр машиналары қазіргі заманғы энергетика, көлік, өнеркәсіптік автоматтандыру және жаңартылатын энергия көздері салаларында кеңінен қолданылады. Осыған байланысты олардың энергия тиімділігін арттыру, массасын азайту, сенімділігін жоғарылату және жаңа конструкциялық шешімдерді енгізу өзекті ғылыми-техникалық мәселе болып табылады.

Әдеби деректерді талдау көрсеткендей, аддитивті технологияларды қолдану электр машиналарының дәстүрлі конструкцияларымен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарға ие. Атап айтқанда, күрделі ішкі каналдары бар салқындату жүйелерін қалыптастыру, магниттік ағындарды тиімді басқаруға мүмкіндік беретін геометриялық пішіндерді жасау мүмкіндігі бар. Алайда, аддитивті өндірістің анизотропиясы, материал қасиеттерінің біркелкі болмауы және өндіріс құны сияқты мәселелер әлі де өзекті болып отыр.

Осыған байланысты аддитивті технологиялардың электр машиналары конструкцияларында қолданылуын кешенді түрде талдау, олардың артықшылықтары мен шектеулерін анықтау ғылыми және практикалық тұрғыдан маңызды болып табылады. Бұл мақалада соңғы жылдары жарияланған ғылыми еңбектер негізінде электр машиналарының әртүрлі типтерінде аддитивті өндіріс әдістерін қолданудың негізгі бағыттары қарастырылады.

Зерттеудің мақсаты – электр машиналарын жобалау мен өндіру саласында аддитивті технологияларды қолдану бойынша заманауи ғылыми жетістіктерге жүйелі шолу жасау және олардың тиімділігін бағалау. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды:

– аддитивті технологиялардың электр машиналары конструкцияларында қолданылу бағыттарын талдау;

– әртүрлі зерттеулерде ұсынылған техникалық шешімдерді салыстыру;

– аддитивті өндірістің артықшылықтары мен шектеулерін анықтау;

– алынған нәтижелердің ғылыми және практикалық маңыздылығын бағалау.

Зерттеу нысаны ретінде электр машиналарының конструкциялық элементтері, ал зерттеу пәні ретінде аддитивті технологияларды қолдану арқылы оларды жетілдіру тәсілдері қарастырылады. Мақала құрылымы зерттеу логикасына сәйкес құрастырылып, келесі бөлімдерде қолданылған материалдар мен әдістер, алынған нәтижелер және олардың талқылауы ұсынылады (Industrie 4.0 Working Group, 2016).

«Төртінші өнеркәсіптік революция» кітабының кіріспесінде К. Шваб «ең жаңа технологияларды дамыту және енгізу белгісіздікпен байланысты екенін және осы өнеркәсіптік революциясына байланысты өзгерістердің болашақта қалай дамитыны туралы әлі білмейтінімізді білдіреді» деп жазады (Шваб К., 2016). Бұл жағдай «индустриялық революция 4.0 Глоб жаһандық трендінің барлық қатысушыларына – әртүрлі елдердің үкіметтеріне, бизнеске, ғылыми қоғамдастыққа және жұртшылыққа үлкен жауапкершілік жүктейді».

Біздің басты мақсатымыз – адативті өндіріс туралы ағымдағы білімді (және технологиялық тенденцияларды) жіктеу және оны пайдаланудың ықтимал мүмкіндіктерін анықтау. Төртінші өнеркәсіптік революция, атап айтқанда 4.0 индустриясы – бұл жақында пайда болған интеллектуалды автоматтандыру қозғалысы. Жаңа дәуірде жаңа ақпараттық технологияларды интеграциялау контекстінде заманауи өндірістік дағдыларды пайдалану экономикалық бәсекеге қабілеттілікте маңызды рөл атқарады.

Материалтану – адативті өндіріс технологияларының дамуын түсінудің кілті. Осы саладағы зерттеушілер 3D басып шығаруға жарамды жаңа материалдарға үлкен қызығушылық танытады. АӨ үшін көптеген пластикалық / полимерлі компоненттер бар (Singh S., 2017), кейбір нақты материалдар өнеркәсіптің қосымша назарын аударады.

Бұрынғы зерттеулерде негізінен магниттік және технологиялық қасиеттер зерттелсе, бұл жұмыста ротор конструкциясының механикалық сенімділігі CAD/CAE негізінде кешенді бағаланды. Ротор конструкциясы үшін SolidWorks Simulation ортасында centrifugal loading жағдайындағы кернеулік-деформациялық күй бағаланды.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Осы зерттеу жұмысы электр машиналары конструкцияларында аддитивті технологияларды қолданудың инженерлік және технологиялық ерекшеліктерін талдауға бағытталды.

Әдеби шолу

Жақсы механикалық сипаттамаларына байланысты металдар машина жасаудағы ең көп таралған материалдар болып табылады. Нәтижесінде, 3D басып шығару индустриясы дәстүрлі түрде жасалған аналогтарын алмастыра алатын металл бөлшектерін жасаудың жаңа шешімдерін іздейді. 3D басып шығару технологиясындағы жаңа әзірлемелер белсенді зерттеу саласына көшуге тырысады: аддитивті металл өндірісі (АМӨ). Жақында көптеген металл компоненттерін алюминий, титан, тот баспайтын болат және т. б. процестегі негізгі компоненттер ретінде (Herzog D., Seyda V., және Wycisk E.et al, 2016)). Коммерциялық 3D металл принтерлерінің көпшілігі металл ұнтақтарын пайдаланады, ал басқа қолайлы материал қоспалары да АМӨ үшін мұқият зерттелген (Korner C., 2016). Сонымен қатар, АӨ-дан алынған микроқұрылым созылу/шаршау әрекеті сияқты бөлшектердің механикалық қасиеттеріне үлкен әсер етеді. Осылайша, микроқұрылымға, фазалық құрамға, термиялық өңдеуге қатысты мәселелер соңғы уақытта АӨ зерттеушілер қауымдастығының назарын аударды (Grigoriev A., Polozov I., және Sufiiarov V. et al, 2017).

Мысалы, автор (Korner C., 2016) лазерге негізделген АМӨ процесі арқылы жасалған компоненттердің кейбір механикалық қасиеттерін зерттеп, крекинг механизмін көрсетті. Екінші жағынан, әзірлеуге әлі көп нәрсе бар, өйткені өндірілген бөлшектер әлі саланың үмітін ақтай алмады. Шешілуі керек кейбір мәселелерге қолайлы шығындар, өндіріс жылдамдығы, созылу/шаршау өнімділігі, қаттылық, бетінің сапасы және біркелкі микроқұрылым жатады. Жаңа дәуірде, егер ол материалтану мен АМӨ процестерін жетілдіру арқылы бар кедергілерді еңсерсе, 4.0 индустриясын іске асырудың негізгі бағыты болуы мүмкін (Rayna T., 2015, Striukova L. Gao W., және Zhang Y. et al 2015).

Аддитивті технологиялар үшін материалдардың, өнімдердің, жүйелердің және қызметтердің кең ауқымы үшін техникалық стандарттарды әзірлеуге арналған американдық ASTM International (American Society for testing and materials) ұйымы екі негізгі терминді ұсынады – additive Fabrication (AF), Additive Manufacturing(AM), сондай-ақ лег заңдыино синонимдер – additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing және Freeform fabrication, олар орыс тіліндегі нұсқада «аддитивті технологиялар» (АТ), «аддитивті өндіріс» (АӨ), сондай-ақ қабатты синтез технологиялары деп дұрыс аударылуы мүмкін.

Қоспа өндіру әдістері материалдарды дұрыс басқара отырып, әртүрлі күрделі пішіндер мен құрылымдарды жасай алады, бұл қалдықтардың азаюына және дәстүрлі өндіріске қарағанда әртүрлі басқа артықшылықтарға әкеледі, бұл оларды барған сайын танымал етеді (Spoerk M., Savandaiah C. және Arbeiter F. et al 2019, Ngo T.D., Kashani A., және Imbalzano G. et al 2018).

Қазіргі таңда аддитивті технологиялар (АТ) электр машиналарының құрылымдарын жетілдірудің маңызды бағыттарының біріне айналды. Оларды пайдалану дәстүрлі өндіріс әдістерімен қол жеткізу мүмкін болмаған жаңа инновациялық шешімдерді іске асыруға және қолданыстағы конструкцияларды тиімдірек етуге жол ашады. АТ көмегімен күрделі пішінді бөлшектерді жасауға мүмкіндік туды. Бұдан бөлек, технологиялық

операциялардың санын қысқарту есебінен өндірістің еңбек шығыны азаяды. Бұл әдістің тағы бір маңызды артықшылығы – дерлік қалдықсыз орындалуы. Мұндай ерекшеліктер аддитивті өндірістің қарқынды дамуына ықпал етуде.

Зерттеу барысында ғылыми әдебиеттерге салыстырмалы шолу жүргізумен қатар, CAD/CAE негізіндегі авторлық инженерлік модельдеу орындалды (Myrzaliyev D.S., Cieslik J. & Seidullayeva O.B., 2025).

Зерттеудің ақпараттық базасы ретінде 2014–2024 жылдар аралығында жарияланған ғылыми мақалалар, халықаралық конференция материалдары және жетекші ғылыми журналдардағы еңбектер пайдаланылды. Әдеби дереккөздерді іріктеу барысында IEEE, Elsevier, Springer, MDPI және басқа да рецензияланатын ғылыми басылымдарда жарияланған жұмыстарға басымдық берілді.

Ақпаратты іздеу additive manufacturing, electric machines, LPBF, cold spray, microextrusion, additively manufactured rotors, CAD/CAE analysis сияқты кілт сөздер арқылы жүргізілді.

Дереккөздерді іріктеу кезінде келесі критерийлер ескерілді:

- зерттеу жұмысының ғылыми рецензияланған басылымда жариялануы;
- электр машиналарының нақты конструкциялық элементтерінің қарастырылуы;
- аддитивті технологияларды инженерлік немесе өндірістік тұрғыдан бағалау;
- механикалық, термиялық немесе магниттік сипаттамалардың талдануы;
- есептік модельдеу немесе тәжірибелік нәтижелердің келтірілуі.

Таңдап алынған ғылыми жұмыстар негізінде электр машиналары конструкцияларында қолданылатын негізгі аддитивті технологияларға салыстырмалы инженерлік талдау жүргізілді.

Қолданылған аддитивті технологиялар

Зерттеу барысында электр машиналары өндірісінде кеңінен қолданылатын келесі аддитивті технологиялар қарастырылды:

– лазерлік ұнтақ қабатын балқыту (LPBF);
– микроэкструзия;
– cold spray технологиясы;
– көп саптамалы 3D-басып шығару.

Әрбір технология үшін өндірістік дәлдік, бет сапасы, материалдық шектеулер, магниттік қасиеттердің өзгеруі, технологиялық деформациялар және өндірістік тиімділік параметрлері салыстырмалы түрде бағаланды.

Талдау барысында LPBF технологиясының геометрияларды жоғары дәлдікпен қалыптастыруда тиімді екені анықталды. Сонымен қатар бұл технологияда қалдық кернеулер мен термиялық деформациялардың пайда болу ықтималдығы байқалды.

Микроэкструзия технологиясы өндірістік шығындардың төмендігімен ерекшеленгенімен, оның геометриялық дәлдігі мен механикалық қасиеттері салыстырмалы түрде төмен екені анықталды.

Cold spray технологиясында материалдың электрөткізгіштік қасиеттері жақсы сақталғанымен, қабатаралық адгезия мәселелері байқалатыны анықталды.

Механикалық талдау нәтижелері бойынша ротор конструкциясындағы кернеу концентрациясының негізгі аймақтары анықталды.

Осылайша жүргізілген инженерлік модельдеу мен салыстырмалы технологиялық талдау электр машиналары конструкцияларында аддитивті өндірісті қолданудың тиімділігін кешенді бағалауға мүмкіндік берді (Zawadzki P., Żywicki K., 2016).

Магниттік материал қабаттарының арасына оқшаулағыш қабат енгізілген. Зерттеу барысында басып шығарудың екі әдісі қарастырылды: микроэкструзия және LPBF (Laser Powder Bed Fusion) технологиясы.

Аталған әдістер арқылы дайындалған өзектердің магниттік сипаттамалары 0,5 мм қалыңдықтағы M270-50A маркалы электротехникалық болат өзегімен салыстырылды. Нәтижелер көрсеткендей, LPBF әдісімен жасалған үлгінің BH циклі ең үлкен ауданды иеленсе, ал M270-50A болатында бұл көрсеткіш ең төменгі мәнге ие болды. Дегенмен, 50 Гц жиілікте нақты шығындарды талдау кезінде ең үлкен шығын LPBF үлгісінде байқалды, ал ең төменгі шығын M270-50A болат өзегінде тіркелді. Бұл мәліметтер микроэкструзия әдісінің магнитөткізгіш дайындауда LPBF технологиясына қарағанда тиімдірек екенін айғақтайды.

1-кесте. Аддитивті технологияларды салыстыру

Көрсеткіш	LPBF	Микроэкструзия	Cold Spray
Өндірістік дәлдік	Жоғары (±0.05 мм)	Орташа	Орташа
Бет сапасы	Жоғары	Төменірек	Қосымша өңдеу қажет
Материалдар	Fe-Si, Al, Ti	Полимер-композит	Cu, Al, магниттік қорытпалар
Магниттік қасиеттер	Жақсы, бірақ қалдық кернеу әсер етеді	Төмен шығындар	Жақсы өткізгіштік
Технологиялық шектеу	Қалдық кернеу, қымбат жабдық	Төмен беріктік	Қабат адгезиясы
Өндіріс құны	Жоғары	Төмен	Орташа
Электр машиналарында қолданылуы	Магнитөткізгіштер	Прототиптер	Роторлар, катушкалар
Артықшылығы	Күрделі геометрия	Арзан өндіріс	Жоғары өткізгіштік
Кемшілігі	Анизотропия	Төмен дәлдік	Беттік кедір-бұдырлық
Ескерту – авторлар құрастырған			

Басқа бір зерттеуде осьтік ағынды синхронды электр қозғалтқышының статор магнитөткізгіші аддитивті әдістер арқылы жасалды. Мұнда 6,5 % кремний қосылған металл ұнтақ қолданылып, статор Гильберт құрылымы негізінде қалыптастырылды. Эксперимент нәтижелері мұндай магнитөткізгіштің дәстүрлі тәсілдермен өндірілген үлгілерге қарағанда құйынды ток шығындарын едәуір азайтатынын көрсетті (Grigoriev A., Polozov I. және Sufiiarov V. et al, 2017).

Механикалық талдау нәтижелері бойынша ротор конструкциясындағы кернеу концентрациясының негізгі аймақтары анықталды және конструкцияның беріктік қоры бағаланды.

Жүргізілген тәжірибелердің нәтижелері көрсеткендей, ұсынылған ротор конструкциясындағы тұрақты магниттердің (ТМ) температурасы дәстүрлі шешімдерге қарағанда қарқынды салқындатудың арқасында айтарлықтай төмен деңгейде болады (Sethuraman L., Vijayakumar G., 2022).

Зерттеулердің бірінде авторлар аддитивті технология негізінде жасалған, тұрақты магниттердің ішкі орналасуына ие қабырғасыз ротордың жаңа түрін ұсынып, оны дәстүрлі ротор құрылымымен салыстырды. Ротордың механикалық беріктігін қамтамасыз ету үшін әдетте полюстік жиектер қолданылады, алайда олар шашырау ағындарын туындатып, электр қозғалтқышының тиімділігін төмендетеді. Ұсынылған жаңа конструкцияда тұрақты магниттер қабырғасыз роторда орналасып, олардың беріктігін магниттік емес пластина қамтамасыз етеді (Selema A., Van Den Abbeele J. және Ibrahim M.N., Sergeant P., 2023).

Жұмыста ротордың дәстүрлі құрылымына негізделген қозғалтқыш параметрлері мен аддитивті технологиялар арқылы жасалған қозғалтқыш сипаттамалары салыстырмалы түрде берілген (Selema A., Beretta M., және Van Coppenolle M., et al 2023).

Бұл тәсіл аддитивті өндіріс технологияларын қолдануға негізделген және автоматтандырылған геометриялық жобалауда жиі пайдаланылатын Безье қисықтарына сүйенеді. Оңтайландырудың басты мақсаты – электр болатының массасын барынша азайта отырып, жоғары айналу моментін қамтамасыз ету болды.

Әдеби шолу нәтижелері

1. Электр машиналары аддитивті технологиялар арқылы дайындау нәтижелері

Жүргізілген әдеби талдау нәтижелері көрсеткендей, электр машиналарының катушкаларын аддитивті технологиялар көмегімен дайындау соңғы жылдары белсенді зерттеліп жатқан бағыттардың бірі болып табылады. Әсіресе клапанды реактивті қозғалтқыштар мен жоғары қуат тығыздығына ие электр машиналарында бұл тәсілдің тиімділігі айқын байқалады. Бірқатар ғылыми еңбектерде 3D басып шығару арқылы жасалған катушкалардың дәстүрлі мыс катушкаларымен салыстырғандағы артықшылықтары жан-жақты қарастырылған.

2. Магниттік тізбектерді аддитивті өндіріс әдістерімен қалыптастыру

Электр машиналарының тиімділігіне айтарлықтай әсер ететін негізгі элементтердің бірі – магниттік тізбек болып табылады. Соңғы зерттеулер аддитивті технологиялардың магнитөткізгіш элементтерді дайындауда кең мүмкіндіктер ұсынатынын дәлелдейді. Әсіресе осьтік ағынды синхронды электр қозғалтқыштарының статор магнитөткізгіштерін аддитивті тәсілмен жасауға арналған жұмыстарда айтарлықтай нәтижелер алынған.

3. Ротор конструкцияларын оңтайландырудағы аддитивті технологиялардың рөлі

Аддитивті технологияларды қолданудың келесі маңызды бағыты – ротор конструкцияларын жетілдіру болып табылады. Әсіресе тұрақты магнитті синхронды қозғалтқыштардың роторларын дайындауда бұл тәсілдің артықшылықтары айқын байқалады. Бірқатар зерттеулерде аддитивті өндіріс арқылы жасалған жеңілдетілген ротор конструкциялары ұсынылған.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, роторды білікпен бірге біртұтас құрылым ретінде дайындау оның механикалық беріктігін арттырумен қатар, салқындату тиімділігін де жақсартады. Ауамен немесе сұйықтықпен салқындатылатын ішкі арналарды қалыптастыру мүмкіндігі тұрақты магниттердің жұмыс температурасының төмендеуіне ықпал етеді. Бұл фактор электр машиналарының сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттыруда маңызды рөл атқарады.

4. Жел энергетикасына арналған синхронды машиналардағы аддитивті шешімдер

Жаңартылатын энергия көздерінің, әсіресе жел энергетикасының қарқынды дамуы жоғары қуатты, сенімді және массасы аз электр генераторларын әзірлеу қажеттілігін арттыруда. Бұл салада аддитивті технологияларды қолдану ерекше қызығушылық тудырады, себебі жел генераторларына арналған синхронды машиналар ірі габаритті және күрделі магниттік жүйелерге ие.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, аддитивті тәсілмен оңтайландырылған магниттік жүйелер электр болатының жалпы массасын айтарлықтай азайтуға жағдай жасайды. Кейбір жұмыстарда статор мен ротордың магниттік контурларын қайта пішіндеу арқылы болат массасын ондаған тоннаға дейін қысқарту мүмкін болған. Бұл көрсеткіш ірі қуатты жел генераторлары үшін экономикалық және технологиялық тұрғыдан аса маңызды болып табылады.

5. Аддитивті және дәстүрлі өндіріс әдістерінің салыстырмалы талдауы

Жүргізілген талдау барысында аддитивті технологиялар арқылы жасалған электр машиналары элементтерінің дәстүрлі өндіріс әдістерімен дайындалған аналогтарымен

салыстырмалы бағалауы жүргізілді. Салыстыру бірнеше негізгі көрсеткіштер бойынша жүзеге асырылды, олардың қатарына масса, энергия тиімділігі, магниттік шығындар және конструкциялық икемділік жатады.

Нәтижелер аддитивті әдістердің конструкциялық икемділік тұрғысынан айқын артықшылыққа ие екенін көрсетті. Күрделі ішкі құрылымдары бар салқындату арналары, арнайы пішінделген катушкалар және магниттік тізбектер дәстүрлі әдістермен салыстырғанда аддитивті өндіріс арқылы әлдеқайда оңай жүзеге асырылады. Бұл электр машиналарының жылулық режимін жақсартып, олардың жұмыс тұрақтылығын арттырады.

6. Зерттеудің ғылыми маңыздылығы электр машиналары конструкцияларында қолданылатын аддитивті технологиялардың артықшылықтары мен технологиялық шектеулерін жүйелі инженерлік тұрғыдан салыстырумен сипатталады. Жұмыс барысында әртүрлі аддитивті өндіріс әдістерінің электр машиналары элементтеріне әсері құрылымдық, магниттік және жылулық аспектілер бойынша талданды.

Алынған нәтижелердің сенімділігі қарастырылған дереккөздердің беделді ғылыми журналдарда жариялануымен және олардың эксперименттік немесе есептік әдістерге негізделуімен қамтамасыз етіледі. Сонымен қатар, әртүрлі авторлар ұсынған нәтижелердің өзара салыстырылуы жалпы үрдістер мен қайталанатын заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік берді

Аддитивті өндірістегі технологиялық шектеулер

Аддитивті өндіріс технологияларын электр машиналары элементтерін дайындауда қолдану кезінде бірқатар өндірістік-технологиялық шектеулер байқалады. Әсіресе LPBF технологиясында жоғары температуралық градиенттердің әсерінен қалдық кернеулер мен локальды деформациялар пайда болуы мүмкін. Бұл факторлар магнитөткізгіштердің геометриялық дәлдігіне және магниттік қасиеттерінің тұрақтылығына әсер етеді.

Қабаттап қалыптастыру процесі нәтижесінде материал құрылымында анизотропия құбылысы байқалады. Мұндай құрылым электр машиналарының ұзақмерзімді сенімділігіне, шаршау беріктігіне және діріл тұрақтылығына теріс ықпал етуі мүмкін.

Беттік кедір-бұдырлықтың жоғары болуы электр машиналарының ауа саңылауы аймағында қосымша шығындардың пайда болуына әкеледі. Осыған байланысты аддитивті өндірістен кейін механикалық өңдеу және термиялық тұрақтандыру операцияларын қолдану қажеттілігі туындайды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

CAD/CAE және SolidWorks Simulation негізіндегі инженерлік талдау

Есептеулер электр машиналары элементтерін аддитивті технологиялар арқылы дайындау кезінде пайда болатын механикалық жүктемелердің әсерін бағалауға бағытталды.

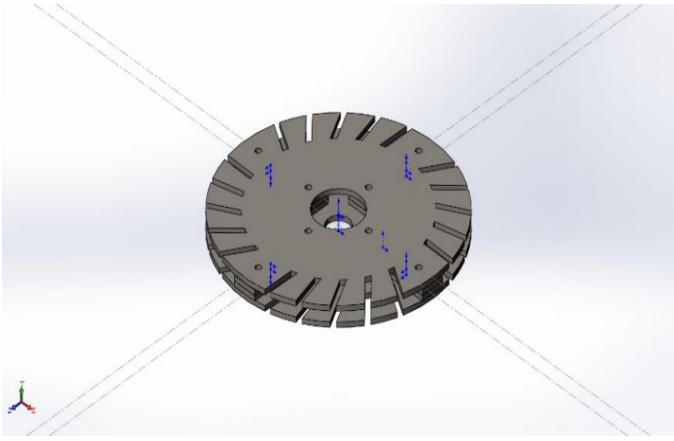
Ротор конструкциясының механикалық күйін бағалау барысында айналу әсерінен пайда болатын орталықтан тепкіш жүктемелер ескерілді. Сандық талдау SolidWorks Simulation ортасында жүргізілді.

Зерттеу барысында электр машинасының ротор конструкциясына авторлық инженерлік модельдеу жүргізілді. Ротордың параметрлік үшөлшемді моделі SolidWorks CAD ортасында құрылды (Мырзалиев Д.С., Цеслик Яцек & Сейдуллаева О.Б., Усеров А.Б, 2025).

Модель құрамына:

- орталық бекіту аймағы;
- радиалды орналасқан қалақшалар;
- массаны азайтатын геометриялық ойықтар енгізілді.

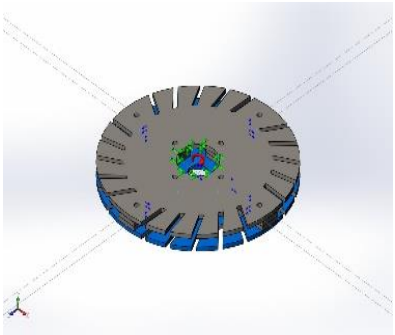
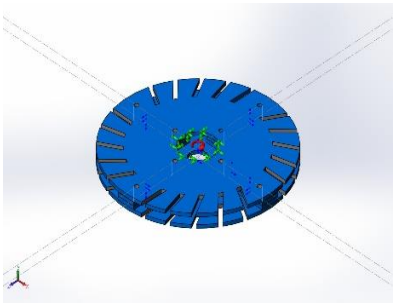
Ротор материалы ретінде легирленген болат (Alloy Steel) қабылданды.

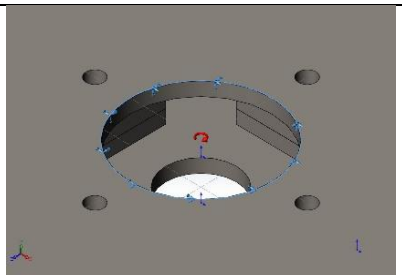
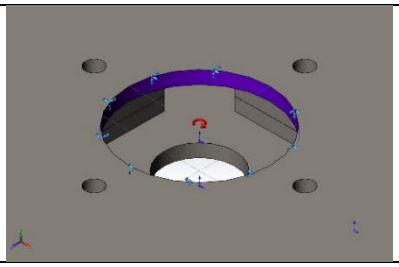


1-сурет. Ротордың параметрлік үшөлшемді моделі
Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Есептік модельде ротордың орталық аймағына Fixed Geometry шекаралық шарты берілді. Алынған нәтижелерді өңдеу барысында салыстырмалы талдау, инженерлік интерпретация және құрылымдық бағалау әдістері қолданылды.

2-кесте. SolidWorks Simulation ортасында сандық инженерлік талдау

Ротордың 3D моделі	Сипаттамалар
1	2
	Масса: 0,366371 кг Көлемі: 4,75806 × 10^{-5} м³ Тығыздығы: 7700 кг/м³ Салмағы: 3,59043 Н
	Ротор материалы ретінде легирленген болат (Alloy Steel) қабылданды. Материалдың аққыштық шегі $\sigma_y = 6{,}204 \cdot 10^8\ H/м^2$ Материал атауы: легирленген болат (Alloy Steel) (SS) Модель түрі: Сызықты серпімді изотропты модель Қолданылған беріктік критерийі: Максималды von Mises кернеуі Аққыштық шегі: 6,20422×10^8 Н/м² Созылу беріктігі: 7,23826×10^8 Н/м² Серпімділік модулі: 2,1×10^{11} Н/м² Пуассон коэффициенті: 0,28 Тығыздығы: 7700 кг/м³ Ығысу модулі: 7,9×10^{10} Н/м² Жылулық ұлғаю коэффициенті: 1,3×10^{-5} К

	Жүктемелер және шекаралық шарттар
	Есептік модельде ротордың айналу әсерін модельдеу үшін орталықтан тепкіш жүктеме (Centrifugal Load) қолданылды. Жүктеме ротордың Face<1> бетіне берілді. Айналу параметрлері: бұрыштық жылдамдық - 3000 айн/мин ; бұрыштық үдеу - 0
Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған	

Ротордың айналу жылдамдығы бұрыштық жылдамдық арқылы анықталды:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, [\text{рад/с}]$$

мұндағы: ω - бұрыштық жылдамдық, рад/с; n - айналу жиілігі, 3000 айн/мин

Зерттеу барысында:

$$\omega = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 3000}{60} = 314{,}16 \text{ рад/с}$$

Ротордың механикалық беріктігін бағалау үшін von Mises критерийі қолданылды:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}, [H/\text{м}^2]$$

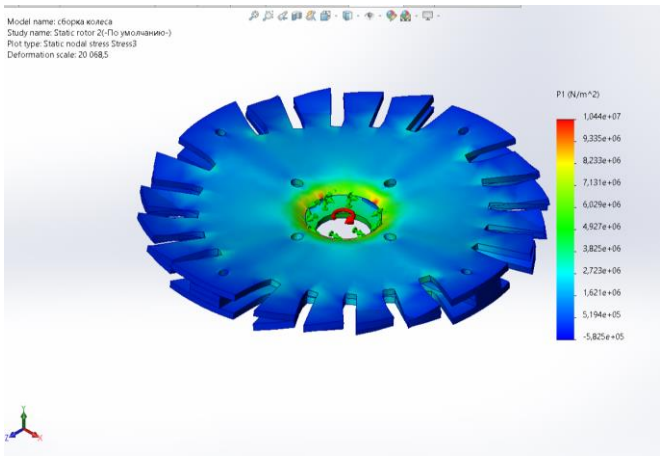
мұндағы: σ_{vm} - эквивалентті кернеу;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - бас кернеулер.

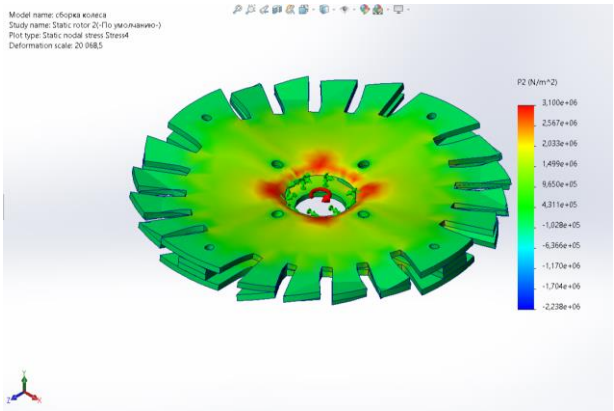
Сандық модельдеу нәтижесінде бірінші $\sigma_1 = 1{,}044 \cdot 10^7$, екінші $\sigma_2 = 3{,}100 \cdot 10^6$ және үшінші $\sigma_3 = 1{,}110 \cdot 10^6$ бас кернеулер мәндерін көрсетті.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(1{,}044 \cdot 10^7 - 3{,}100 \cdot 10^6)^2 + (3{,}100 \cdot 10^6 - 1{,}110 \cdot 10^6)^2 + (1{,}110 \cdot 10^6 - 1{,}044 \cdot 10^7)^2}{2}}$$

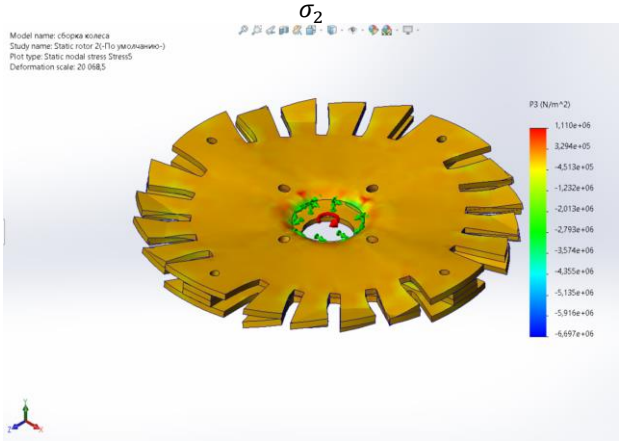
$$= 1{,}184 \cdot 10^7 H/\text{м}^2$$



σ_1



σ_2



σ_3

2-сурет. Сандық модельдеу нәтижелері

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Осы мәндерді von Mises критерийі бойынша өңдеу нәтижесінде эквивалентті кернеу шамамен $1{,}184 \cdot 10^7 Н/м^2$ құрады. SolidWorks Simulation бағдарламасында алынған максималды эквивалентті кернеу $1{,}189\ 10^7\ Н/м^2$ болды.

Сандық есептеу нәтижесінде: $\sigma_{vm} = 1{,}189\ 10^7\ Н/м^2$ мәні алынды.

Қауіпсіздік коэффициентін анықтау

Ротор конструкциясының беріктік қоры қауіпсіздік коэффициенті арқылы бағаланды:

$$n_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

мұндағы: n_s - қауіпсіздік коэффициенті; σ_y - материалдың аққыштық шегі; σ_{max} - максималды эквивалентті кернеу.

Материал үшін: $\sigma_y = 6{,}204\ \cdot 10^8\ Н/м^2$; $\sigma_{max} = 1{,}189\ \cdot 10^7\ Н/м^2$ есептеу нәтижесінде:

$$n_s = \frac{6{,}204\ \cdot 10^8}{1{,}189\ \cdot 10^7} = 52{,}17 \approx 52{,}2$$

Алынған нәтиже ротор конструкциясының беріктік қорының жоғары екенін көрсетті.

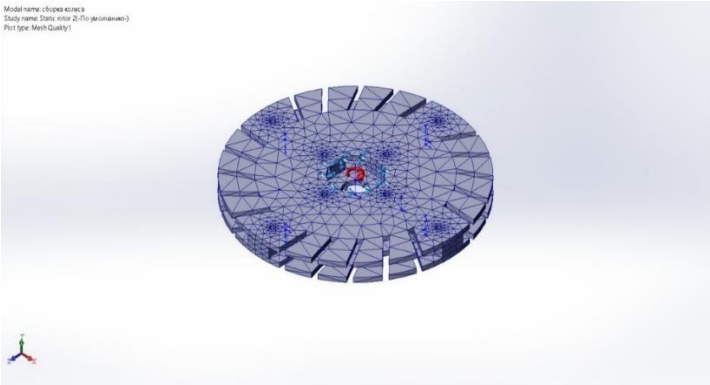
Бұл мән ротор конструкциясының жоғары қаттылыққа ие екенін және эксплуатациялық режим кезінде геометриялық тұрақтылық сақталатынын көрсетті.

Ротордың үшөлшемді CAD моделі негізінде centrifugal force жүктемесі әсеріндегі статикалық талдау орындалды (Н.Н. Рахымтай, Д.С. Мырзалиев, К.К. Сейтказенова & Н.А. Кадиров, О.Б. Сейдуллаева, 2025). Есептеу барысында ротордың орталық аймағына fixed support шекаралық шарты беріліп, модельге 3000 айн/мин айналу жылдамдығына сәйкес келетін айналу жүктемесі енгізілді.

Сандық модельде blended curvature-based mesh пайдаланылды. Торлық модель құрамында 27532 түйін және 13470 соңғы элемент болды.

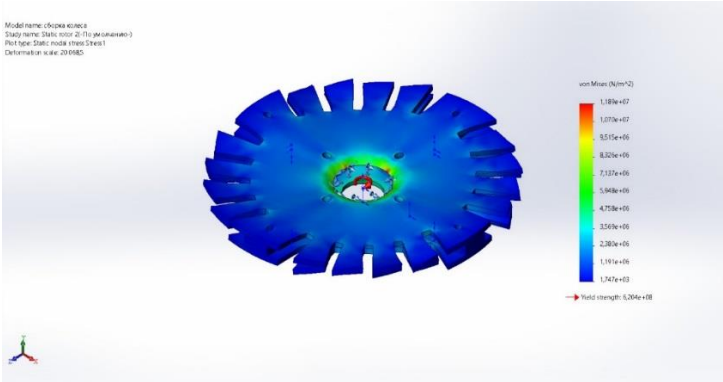
3-кесте. Торлық модельдің негізгі параметрлері

Параметрлер	Мәні
Жалпы түйіндер саны	27532
Жалпы соңғы элементтер саны	13470
Максималды Aspect Ratio	10,492
Aspect Ratio < 3 болатын элементтердің үлесі:	87
Aspect Ratio > 10 болатын элементтердің үлесі:	0,0297
Деформацияланған элементтер	0
Ескерту – авторлар құрастырған	



3-сурет. Ротордың торлық моделі
Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Алынған торлық модель сапасы инженерлік есептеулер жүргізу үшін жеткілікті деңгейде екені анықталды. Элементтердің басым бөлігінің aspect ratio көрсеткіші 3-тен төмен болғандықтан, есептеу нәтижелерінің дәлдігі мен тұрақтылығы қамтамасыз етілді.



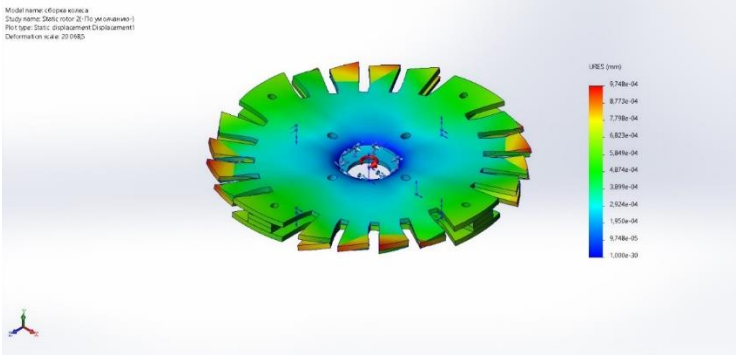
4-сурет. Von Mises бойынша эквивалентті кернеу
Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Есептеу нәтижелері бойынша ротордағы максималды эквивалентті von Mises кернеуі $\sigma_{max} = 1{,}189 \cdot 10^7\ Н/м^2$ мәнін көрсетті. Кернеулердің ең жоғары концентрациясы орталық бекіту аймағында және қалақша ойықтарының түбінде байқалды.

Ротордың толық деформациясының максималды мәні $\delta_{max} = 9{,}748 \cdot 10^{-4}$мм болды. Бұл алынған деформация мәндерінің өте төмен екенін және конструкцияның жеткілікті қаттылыққа ие екенін көрсетті.

Аддитивті технологиялардың инженерлік тиімділігін бағалау

Жүргізілген инженерлік талдау аддитивті өндіріс технологиялары күрделі ротор конструкцияларын дайындау кезінде бірқатар артықшылықтар беретінін көрсетті.

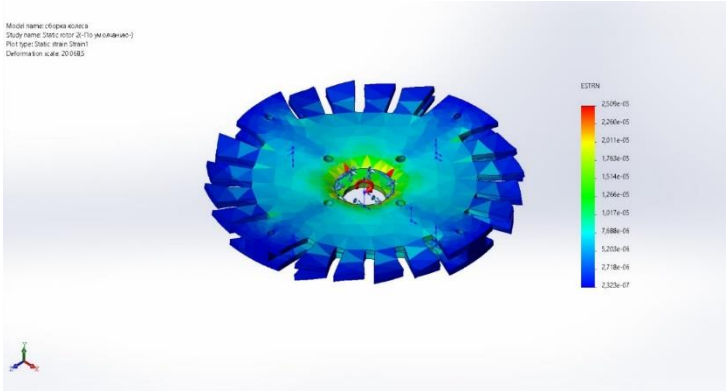


5-сурет. Толық деформация

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Атап айтқанда:

– күрделі геометрияларды дайындау мүмкіндігі;
– конструкция массасын төмендету;
– ішкі салқындату арналарының енгізілуі;
– материал шығынын азайту;
– параметрлік геометрияны оңтайландыру мүмкіндігі.



6-сурет. Эквивалентті деформация

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Сонымен қатар инженерлік талдау барысында аддитивті өндірістің кейбір технологиялық шектеулері анықталды:

– геометриялық ойықтар аймағында кернеу концентрациясының пайда болуы;
– материал анизотропиясының ықтимал әсері;
– қалдық кернеулердің қалыптасу қаупі;
– беттік кедір-бұдырлықтың жоғары болуы;
– кейінгі механикалық өңдеу қажеттілігі.

Алынған нәтижелер бойынша есептелген кернеулер материалдың рұқсат етілетін шектерінен айтарлықтай төмен болғандықтан, зерттелген ротор конструкциясы 3000 айн/мин айналу жылдамдығы кезінде сенімді жұмыс істей алады деген қорытынды жасалды.

Салыстырмалы инженерлік талдау

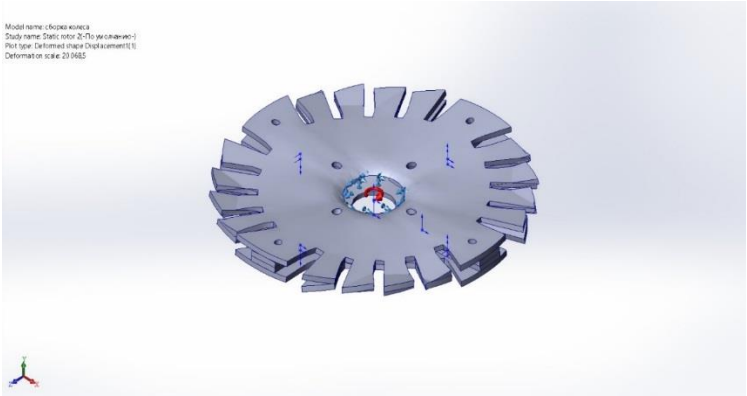
Аддитивті өндіріс технологияларын салыстыру барысында LPBF технологиясының жоғары геометриялық дәлдік пен күрделі конфигурацияларды дайындауда тиімді екені анықталды. Алайда бұл технологияда жоғары температуралық градиенттердің әсерінен қалдық кернеулердің қалыптасу қаупі байқалады.

Cold Spray технологиясында материал құрылымының термиялық бұзылуы азаяды, бірақ қабатаралық адгезия мәселелері туындауы мүмкін.

Микроэкструзия технологиясы прототиптік элементтерді жылдам дайындауға мүмкіндік береді, алайда оның механикалық беріктігі мен геометриялық дәлдігі салыстырмалы түрде төмен.

Жүргізілген салыстырмалы инженерлік талдау нәтижесінде электр машиналарының жоғары жүктемелі ротор элементтері үшін LPBF технологиясы неғұрлым перспективалы екені анықталды.

Жүргізілген stress analysis нәтижелері ротор конструкциясының кейбір аймақтарында локальды кернеу концентрацияларының пайда болатынын көрсетті.



7-сурет. Деформацияланған күй

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Мұндай тәсілдер ротордың массасын төмендетіп, оның динамикалық және термиялық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Дәстүрлі және аддитивті ротор конструкцияларын салыстыру

Жүргізілген әдеби талдау мен инженерлік модельдеу нәтижелерін ескере отырып, дәстүрлі өндіріс әдістерімен дайындалған ротор мен аддитивті технологиялар арқылы жасалған ротор конструкцияларының негізгі сипаттамалары салыстырылды (4-кесте).

4-кесте. Дәстүрлі және аддитивті ротор конструкцияларын салыстыру

Көрсеткіш	Дәстүрлі ротор	Аддитивті ротор
Геометриялық күрделілік	Төмен	Жоғары
Ішкі салқындату арналары	Шектеулі	Мүмкін
Материал шығыны	Жоғары	Төмен
Өндіріс икемділігі	Орташа	Жоғары
Жекелеген бөлшектер саны	Көп	Аз
Топологияны оңтайландыру	Қиын	Қолайлы
Ескерту – авторлар құрастырған		

Кестеден көрініп тұрғандай, аддитивті технологиялар роторларды дайындауға, ішкі салқындату арналары бар құрылымдарды қалыптастыруға және материал шығынын азайтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар аддитивті өндіріс топологиялық оңтайландыруды тиімді жүзеге асыруға жағдай жасап, электр машиналарының массалық-габариттік көрсеткіштерін жақсартуға мүмкіндік береді.

Нәтижелердің сенімділігін бағалау

Алынған нәтижелер әдебиеттерде келтірілген ұқсас ротор конструкциялары үшін жүргізілген есептік зерттеулермен сапалық тұрғыдан сәйкес келеді. Максималды кернеулер негізінен бекіту аймақтарында шоғырланғаны анықталды, бұл айналмалы бөлшектердің жұмыс ерекшеліктеріне сәйкес келеді.

Сонымен қатар алынған максималды эквивалентті кернеу 11,89 МПа мәні Alloy Steel материалының аққыштық шегінен (620,4 МПа) бірнеше есе төмен. Қауіпсіздік коэффициентінің 52,2 мәніне тең болуы ротор конструкциясының жеткілікті беріктік қорына ие екенін көрсетеді. Сондықтан жүргізілген модельдеу нәтижелері механика теориясына сәйкес келеді және конструкцияның сенімді жұмыс істеу мүмкіндігін растайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Аддитивті технология дәстүрлі өндіріс әдістеріне қарағанда конструкциялық икемділікті арттырады. Күрделі салқындату арналары, арнайы пішінделген катушкалар және магниттік өзектер оңай жасалады. Дегенмен, магниттік және механикалық қасиеттерде белгілі шектеулер бар, мысалы материалдардың анизотропиясы және микроқұрылым біркелкілігі. Гибридті өндіріс әдістерін қолдану перспективалы болып отыр.

Аддитивті технологиялар электр машиналарын жобалауда жаңа мүмкіндіктер ашады: бөлшектер жасау, салмақты азайту, энергия тиімділігін арттыру. Алдағы уақытта технологияларды жетілдіру жоғары тиімді электр машиналарын жасауға жол ашады.

Аддитивті технологиялардың қарқынды дамуы электр машиналарын жобалау үдерісін жаңа деңгейге көтеріп, олардың құрылымын оңтайландыруға тың мүмкіндіктер ашуда. Мұндай өндіріс тәсілдері дәстүрлі әдістер арқылы жүзеге асыруға қиын немесе мүлде мүмкін емес пішіндерге ие бөлшектер мен тораптарды дайындауға жағдай жасайды. Алдағы уақытта аддитивті технологияларды жетілдіру қазіргі заман талаптарына сай, тиімділігі жоғары электр машиналарын жасауға кеңінен жол ашады.

Зерттеу барысында электр машиналары конструкцияларында аддитивті технологияларды қолданудың инженерлік және технологиялық ерекшеліктері кешенді түрде талданды. Әдеби дереккөздерді жүйелеумен қатар, ротор конструкциясына CAD/CAE негізінде авторлық инженерлік есептеулер жүргізілді.

SolidWorks Simulation ортасында орындалған механикалық талдау нәтижесінде ротордың 3000 айн/мин айналу режиміндегі кернеулік-деформациялық күйі бағаланды.

Инженерлік талдау нәтижелері аддитивті өндіріс технологиялары арқылы:

- ротор массасын төмендетуге;
- ішкі салқындату арналарының тиімділігін арттыруға;
- материал шығынын азайтуға;
- электр машиналарының энергия тиімділігін жоғарылатуға
- мүмкіндік бар екенін көрсетті.

Сонымен қатар зерттеу барысында аддитивті өндірістің бірқатар технологиялық шектеулері анықталды:

- материал анизотропиясы;
- қалдық кернеулер;
- қабатаралық адгезия мәселелері;
- беттік кедір-бұдырлық;
- кейінгі механикалық өңдеу қажеттілігі.

Салыстырмалы талдау нәтижесінде LPBF технологиясының жоғары дәлдік пен күрделі геометрияларды қалыптастыруда тиімді екені анықталды. Ал микроэкструзия мен Cold Spray технологиялары белгілі бір өндірістік міндеттер үшін тиімді болғанымен, олардың механикалық және технологиялық шектеулері байқалады.

Жалпы алғанда, жүргізілген инженерлік есептеулер мен CAD/CAE модельдеу нәтижелері аддитивті технологиялардың электр машиналары конструкцияларын жетілдіруде жоғары перспективаға ие екенін көрсетті.

Практикалық тұрғыдан алынған нәтижелер электр қозғалтқыштарының және генераторлардың роторларын жобалау кезінде аддитивті технологияларды қолданудың тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Ұсынылған ротор конструкциясы электр қозғалтқыштары мен генераторларда қолданылуы мүмкін. Аддитивті технологияларды пайдалану масса мен материал шығынын азайтып, күрделі салқындату арналары бар конструкцияларды өндіруге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер аддитивті технологиялар арқылы өндірілетін жоғары жылдамдықты электр қозғалтқыштарының, жел генераторларының және энергия тиімді электр машиналарының роторларын жобалауда қолданылуы мүмкін.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: жоқ

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ: зерттеу таза техникалық сипатта болып, адам қатысушылары мен жануарларды қамтымағандықтан, бұл бөлім қолданылмайды

ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Қолданылмайды

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректерді тиісті сұраныс бойынша жауапты автордан алуға болады; балама түрде, жұмыс сандық модельдеу мен теориялық талдауға негізделгендіктен, жаңа эксперименттік деректер жиналмаған.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар әдістемелік қолдау мен пайдалы пікірлері үшін әріптестеріне, сондай-ақ мақаланың сапасын арттыруға септігін тигізген анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Бұл жұмыста деректерді талдау барысында OpenAI компаниясының ChatGPT (GPT-5) жасанды интеллект құралы пайдаланылды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Industrie 4.0 Working Group. (2013). Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. acatech. http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf

Шваб К. (2016). Четвертая промышленная революция. Эксмо. // Shvab, K. (2016). Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya [The Fourth Industrial Revolution]. Eksmo. (In Russ.)

Myrzaliyev, D. S., Cieslik, J., Seidullayeva, O. B., & Amanov, A. (2025). Analysis of the stress-strain state of gears by the finite element method in SolidWorks. Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Техникалық ғылымдар және технологиялар сериясы, 153(4), 152–167. https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-152-166 // Myrzaliyev, D. S., Cieslik, J., Seidullayeva, O. B., & Amanov, A. (2025). Analysis of the stress-strain state of gears by the finite element method in SolidWorks. L.N. Gumilev atyndaǵy Euraziia ulttyq universitetiniń khabarshysy. Tekhnikalyq ǵylymdar jáne tekhnologiialar seriiasy [Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series], 153(4), 152–167. https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-152-166 (In Eng.)

Мырзалиев Д.С., Цеслик Яцек, Сейдуллаева О.Б., & Усеров А.Б. (2025). Мойынтірек құрылымының статикалық жүктеме кезіндегі кернеу және деформация сипаттамалары. Вестник Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, 4, 97–105. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_4_97 // Myrzaliev, D. S., Tseslik, Yatsek, Seidullayeva, O. B., & Userov, A. B. (2025). Moyyntirek qurylymynyn statikalyq zhukteme

kezindegi kerneu zhane deformatsiya sipattamalary [Stress and deformation characteristics of bearing structure under static loading]. Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University], 4, 97–105. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_4_97 (In Kazakh)

Zawadzki, P., & Żywicki, K. (2016). Smart product design and production control for effective mass customization in the Industry 4.0 concept. Management and Production Engineering Review, 7(3), 105–112.

Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. Journal of Manufacturing Processes, 25(1), 185–200. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. Acta Materialia, 117, 371–392. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019

Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting: A review. International Materials Reviews, 61(5), 361–377. https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289

Rayna, T., & Striukova, L. (2015). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. Technological Forecasting and Social Change, 102, 214–224. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design, 69, 65–89. http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001

Spoerk, M., Savandaiah, C., Arbeiter, F., Sapkota, J., & Holzer, C. (2019). Optimization of mechanical properties of glass-spheres-filled polypropylene composites for extrusion-based additive manufacturing. Polymer Composites, 40(2), 638–651. https://doi.org/10.1002/pc.24701

Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 143, 172–196. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

Carneiro, O. S., Silva, A. F., & Gomes, R. (2015). Fused deposition modeling with polypropylene. Materials & Design, 83.

Grigoriev, A., Polozov, I., Sufiiarov, V., & Popovich, A. (2017). In-situ synthesis of Ti2AlNb-based intermetallic alloy by selective laser melting. Journal of Alloys and Compounds, 704, 434–442.

Selema, A., Van Den Abbeele, J., Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2023). Novel 3D printed coils for high power density electrical machine and traction applications. In IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEMDC55163.2023.10239022

Singh, S., Payarou, T., Boby, M., Lamarre, J. M., Bernier, F., Ibrahim, M., & Pillay, P. (2023). Cold-spray additive manufacturing of a petal-shaped surface permanent magnet traction motor. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 9(3), 3636–3648. https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3233779

Ajamloo, A. M., Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2024). Design considerations of a new IPM rotor with efficient utilization of PMs enabled by additive manufacturing. IEEE Access, 12, 61036–61048. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394739

Sethuraman, L., & Vijayakumar, G. (2022). A new shape optimization approach for lightweighting electric machines inspired by additive manufacturing. In Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG) (pp. 1–7). IEEE. https://doi.org/10.1109/INTERMAG-39746.2022.9827714

Selema, A., Van Den Abbeele, J., Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2023). Innovative 3D printed coil and cooling designs for weight-sensitive energy-saving electrical machine. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 1–12. https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3322522

Selema, A., Beretta, M., Van Coppenolle, M., Tiismus, H., Kallaste, A., Ibrahim, M.N., Rombouts, M., Vleugels, J., Kestens, L. A. I., & Sergeant, P. (2023). Evaluation of 3D-printed magnetic materials for additively manufactured electrical machines. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 569, Article 170426. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170426

Рахымтай Н. Н., Мырзалиев Д. С., Сейтказенова К. К., Кадиров Н. А., & Сейдуллаева О. Б. (2025). Исследование температуры в зоне резания методом конечных элементов при токарной обработке. Вестник Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, 2, 61–70. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_2_61 // Rakhymtai, N. N., Myrzaliev, D. S., Seitkazenova, K. K., Kadirov, N. A., & Seidullayeva, O. B. (2025). Issledovanie temperatury v zone rezaniya metodom konechnykh elementov pri tokarnoy obrabotke [Study of temperature in the cutting zone by the finite element method during turning]. Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University], 2, 61–70. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_2_61 (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors

Усеров Алтынбек Батырбекұлы – «Машинажасау» ББББ бойынша докторант, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,
Усеров Алтынбек Батырбекович – докторант по ОП «Машиностроение», факультет «Механика и нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,
Usserov Altynbek – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M.Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent
e-mail: usserov.sirmecc@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1275-1290

Мырзалиев Дархан Сапарбайұлы – т.ғ.к., доцент, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,
Мырзалиев Дархан Сапарбаевич – к.т.н., доцент, факультет «Механика и нефтегазовое дело» НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,
Myrzaliyev Darkhan Saparbaevich – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent
e-mail: darkhan-m7@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4465-4140

Печерский Владимир Николаевич – т.ғ.д., профессор, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,
Печерский Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, факультет «Механика и нефтегазовое дело» НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,
Pecherskiy Vladimir Nicolaevich – doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: vn-pecherskiy@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6277-6827

Сейдуллаева Орынгүл Бахытқызы – хат-хабар авторы, «Машинажасау» ББББ бойынша докторант, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,
Сейдуллаева Орынгул Бахытовна – автор для корреспонденции, докторант по ОП «Машиностроение», факультет «Механика и нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,
Seidullayeva Oryngul Bakhytkyzy – corresponding author, Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M.Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, Kazakhstan,
e-mail: orynkul_s@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5006-0683

Рахымтай Нұрсая Нұрғалиқызы – ББББ бойынша докторант, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ. Қазақстан,
Рахымтай Нурсая Нургаликызы – докторант по ОП «Машиностроение», факультет «Механика и нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент Казахстан,
Rakhymtay Nursaya Nurgalikyzy – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M.Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent
e-mail: saya_rakhumtay@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-1973-3709

М А З М Ұ Н Ы

Аукенова Б.Қ., Айтказина А.К., Кабдуллина Д.С., Жексембинова Г.Б., Leśniewski T.T. Үйінді жұмыс жабдықтарын теориялық талдау және жетілдіру жолдары 5

Ашуров А.Е., Жумажанов Б.Р., Кулакаева А.Е., Зылғара А. Деорбитацияның атмосфералық кезеңінде ғарыш аппаратының динамикасын әртүрлі аэродинамикалық жағдайларда модельдеу 21

Гурьянов Г.А., Байгереев С.Р., Ликунов А.В., Дудкин М.В., Васильева О.Ю. Ұсақталатын материалға қарама-қарсы әсер ететін энергия кернеулі соққылы ұнтақтағыштарда жұқа ұнтақтау тиімділігін арттыру 37

Жетесова Г.С., Бейсембаев К.М., Нокина Ж.Н., Абдугалиева Г.Б., Оразбеков Д. Роботтық, маневерлік агрегаттардың операциясының тиімділігін зерттеу 52

Калиев Б.К., Бекмырза Ж.А., Бедыч Т.В., Ғабдысалық Р., Байгереев С.Р. Турбокомпрессорларды сынауға арналған стендінің конструкциясын жетілдіру арқылы помпаж құбылысын зерттеу 68

Камалбек Д.К., Ульев Л.М., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А. Үздіксіз жалғанған құбырлардың құбырлы қаптамасы бар құрылғыдағы жылу беру процесін модельдеу 80

Канапинов М.С., Бутаков Е.Б., Дуйсембаева Г.С., Измайлов Л.Н., Қизатов А.С., Даулетханов Е.Д. Плазмалық отынды активтендіру жағдайында Қаражыра кен орын көмірінің тұтануы мен кейінгі жануының термохимиялық үдерісін эксперименттік зерттеу 93

Қойшығарин А., Мукалиев Ж.К. Жерасты ядролық жарылыстарының эпицентрлік аймақтарында жер беті деформациясын геодезиялық әдістер арқылы мониторингтеу 106

Муздыбаев М.С., Абеджанова А.С., Бухнер П., Муздыбаева А.С., Мырзабекова Д.М. Қалалық көлік жүйесін талдауда эксперименттік және есептік әдістердің интеграциясы 117

Мұхаметбек Ж.М., Азаматов Б.Н., Қалиев Д.И., Комбаев К.К., Апбазов К.Е. Хирургиялық аспаптарға арналған 10Х17Н13М2 (AISI 316L аналогы) тот баспайтын болаттың беткі қабатының сапасына сымды электрэррозиялық өңдеу параметрлерінің әсері 132

Скаков М.К., Ақболатов Е.Ж., Қабдыкенова Е.М., Ғабдысалық Р. Жоғары температуралы қондырғылардың құбыр жүйелеріне арналған 12Х18Н10Т ЖӘНЕ AISI 316 әртүрлі аустениттік болаттарды дәнекерлеудің технологиялық ерекшеліктері 148

Смаилова Г.А., Удербаева А.Е., Бекбосынова Б.А., Кошанова Ш.К., Рысбекова А.А. Құю-прокаттау технологияларының қазіргі деңгейі және даму перспективалары 162

Тогузова М.М., Рахымбердина М.Е., А Капасов.К., Апшикур Б., Абдыгалиева А.К. Аэрофототүсіріс, лидар технологиялары мен жердегі лазерлік сканерлеудің үйлесімі негізінде геокеңістіктік деректерді алуға кешенді тәсілді қолдану 175

Түстікбаев М.Б., Абсадықов Б.Н., Асқаров Е.С. Автономды электрмен жабдықтау жүйелеріне арналған бироторлы жел энергетикалық қондырғысының тиімділігін талдау 189

Уразалиев А.С., Шоганбекова Д.А., Қожахметов М.С., Жақсығұл Н.Н. Астана қаласының жергілікті геоид моделінің дәлдігін машиналық оқыту әдістерін пайдалану арқылы арттыру 202

Усеров А.Б., Мырзалиев Д.С., Печерский В.Н., Сейдуллаева О.Б., Рахымтай Н.Н. Электр машиналары үшін аддитивті технологиялар негізіндегі жаңа конструкциялық тәсілдерге шолу 218

СОДЕРЖАНИЕ

Аукенова Б.Қ., Айтказина А.К., Кабдуллина Д.С., Жексембинова Г.Б., Leśniewski T.T. Теоретический анализ и пути совершенствования отвального рабочего оборудования 5

Ашуров А.Е., Жумажанов Б.Р., Кулакаева А.Е., Зылғара А. Моделирование поведения космического аппарата на атмосферном участке деорбитации в различных аэродинамических сценариях 21

Гурьянов Г.А., Байгереев С.Р., Ликунов А.В., Дудкин М.В., Васильева О.Ю. Повышение эффективности тонкого измельчения в энергонапряженных измельчителях ударного действия со встречным воздействием на измельчаемый материал 37

Жетесова Г.С., Бейсембаев К.М., Нокина Ж.Н., Абдуталиева Г.Б., Оразбеков Д. Исследование эффективности операций роботизированных, маневрирующих агрегатов 52

Калиев Б.К., Бекмырза Ж.А., Бедыч Т.В., Ғабдысалық Р., Байгереев С.Р. Исследование явления помпажа путем совершенствования конструкции стенда для испытания турбокомпрессоров 68

Камалбек Д.К., Ульев Л.М., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А. Моделирование процесса теплопередачи в аппарате с трубчатой насадкой из непрерывно соединенных труб 80

Канапинов М.С., Бутаков Е.Б., Дуйсембаева Г.С., Измайлов Л.Н., Қизатов А.С., Даулетханов Е.Д. Экспериментальное исследование термохимического процесса воспламенения и последующего горения угля месторождения Каражыра в условиях плазменной активации топлива 93

Койшыгарин А., Мукалиев Ж.К. Мониторинг деформаций поверхности в эпицентральных зонах подземных ядерных взрывов с использованием геодезических методов 106

Муздыбаев М.С., Абеджанова А.С., Бухнер П., Муздыбаева А.С., Мырзабекова Д.М. Интеграция экспериментальных и вычислительных методов при анализе городской транспортной системы 117

Мұхаметбек Ж.М., Азаматов Б.Н., Қалиев Д.И., Комбаев К.К., Апбазов К.Е. Влияние параметров проволочной электроэрозионной обработки на качество поверхностного слоя нержавеющей стали 10Х17Н13М2 (аналог AISI 316L) для хирургического инструмента 132

Скаков М.К., Ақболатов Е.Ж., Қабдыкенова Е.М., Ғабдысалық Р. Технологические особенности сварки разнородных аустенитных сталей 12Х18Н10Т и AISI 316 для трубопроводных систем высокотемпературных установок 148

Смаилова Г.А., Удербаева А.Е., Бекбосынова Б.А., Кошанова Ш.К., Рысбекова А.А. Литейно-прокатные технологии, состояние и перспективы развития 162

Тогузова М.М., Рахымбердина М.Е., А Капасов.К., Апшикур Б., Абдыгалиева А.К. Применение комплексного подхода к получению геопространственных данных на основе сочетания аэрофотосъемки, лидарных технологий и наземного лазерного сканирования 175

Тустыкбаев М.Б., Абсадыков Б.Н., Аскаров Е.С. Анализ эффективности биротерной ветроэнергетической установки для автономных систем электроснабжения 189

Уразалиев А.С., Шоганбекова Д.А., Қожахметов М.С., Жақсығұл Н.Н. Повышение точности локальной модели геоида города Астана с использованием методов машинного обучения 202

Усеров А.Б., Мырзалиев Д.С., Печерский В.Н., Сейдуллаева О.Б., Рахымтай Н.Н. Обзор новых подходов к проектированию электрических машин, основанных на аддитивных технологиях 218

CONTENT

Aukenova B., Aitkazina A., Kabdullina D., Zheksembinova G., Leśniewski T.T. Theoretical analysis and ways to improve blade working equipment 5

Ashurov A., Zhumazhanov B., Kulakayeva A., Zylgara A. Modeling the dynamics of a spacecraft during the atmospheric phase of deorbiting under various aerodynamic conditions 21

Guryanov G.A., Baigereyev S.R., Likunov A.V., Dudkin M.V., Vasilyeva O.Yu. Improving the efficiency of fine grinding in energy-intensive impact mills with counter-impact action on the material being ground 37

Zhetesova G.S., Beisembayev K.M., Nokina Zh.N., Abdugalieva G.B., Orazbekov D. Research on the efficiency of operations of robotized, maneuverable aggregates 52

Kaliyev B.K., Bekmyrza Zh.A., Bedych T.V., Gabdysalyk R., Baigereyev S.R. Study of the phenomenon of surge by improving the design of a turbocharger test rig 68

Kamalbek D.K., Ulyev L.M., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Abzhapbarov A.A. Modeling the heat transfer process in a device with a tubular packing of continuously connected pipes 80

Kanapinov M.S., Butakov E.B., Duysembaeva G.S., Izmailov L.N., Kizatov A.S., Dauletkhanov Ye.D. Experimental study of the thermochemical process of ignition and subsequent combustion of coal from the Karazhyra deposit under conditions of plasma fuel activation 93

Koishygarin A.T., Mukaliyev Zh.K. Surface deformation monitoring in epicentral zones of underground nuclear explosions using geodetic methods 106

Muzdybayev M.S., Abejanova A.S., Bouchner P., Muzdybaeva A.S., Myrzabekova D.M. Integration of experimental and computational approaches in urban transport system analysis 117

Mukhametbek Zh., Azamatov B.N., Kaliyev D., Kombayev K., Apbazov K. Influence of wire electrical discharge machining parameters on the surface layer quality of 10KH17N13M2 (AISI 316L analog) stainless steel for surgical instruments 132

Skakov M.K., Akbolatov E.Zh., Kabdykenova E.M., Gabdysalyk R. Technological features of welding dissimilar austenitic steels 12X18H10T and AISI 316 for pipeline systems of high-temperature installations 148

Smailova G.A., Uderbayeva A.E., Bekbossynova B.A., Koshanova Sh., Rysbekova A.A. Casting and rolling technologies, current status and development prospects 162

Toguzova M.M., Rakhymberdina M.Ye., Kapasov A.K., Apshikur B., Abdygalieva A.K. Application of an integrated approach to geospatial data acquisition based on a combination of aerial photography, lidar technologies and ground-based laser scanning 175

Tustykbayev M.B., Absadykov B.N., Askarov E.S. Analysis of the efficiency of a bi-rotor wind power installation for autonomous power supply systems 189

Urazaliyev A.S., Shoganbekova D.A., Kozhakhmetov M.S., Zhaksygul N.N. Improving the accuracy of the local geoid model of Astana city using machine learning methods 202

Usserov A., Myrzaliyev D.S., Pecherskiy V.N., Seidullayeva O.B., Rakhymtay N.N. An overview of new approaches to the design of electric machines based on additive technologies 218

EKTU Journal
of Engineering Sciences

Ғылыми журнал
2026 жылдан шыға бастады.
Қазақстан Республикасы мәдениет және ақпарат министрлігінде тіркеліп,
2025 ж. 16 қыркүйегінде № KZ93VPY00129402 куәлігі берілген.

EKTU Journal
of Engineering Sciences

Научный журнал
Издается с 2026 г.
Зарегистрирован Министерством культуры и информации
Республики Казахстан. Свидетельство № KZ93VPY00129402 от 16 сентября 2025 г.

EKTU Journal
of Engineering Sciences

Scientific journal
Published since 2026
Registered with the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan. Certificate No.
KZ93VPY00129402 dated September 16, 2025.

Редакторлар – Редакторы
О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова
Корректорлар – Корректоры
О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова
Руководитель редакционно-издательского центра О.Н. Николаенко
Editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova
Copy editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova
Head of the editorial and publishing center O. Nikolaenko

Материалдарды компьютерде терген және беттеген С.С. Мамыраздыкова
Набор, верстка, изготовление оригинал-макета С.С. Мамыраздыкова
Text Layout, lead out production of the original layout S. Mamyrazdykova

Басуға 30 маусым 2026 ж. қол қойылды.
Форматы 84×108/16. Офсет қағазы.
Көлемі: шартты баспа табағы 25,2, есептік баспа табағы 25,23.
Баспа нұсқасы. Таралымы 30 дана. № 142-2026 тапсырыс.
Бағасы келісім бойынша.

Подписано в печать 30 июня 2026 г.
Формат 84×108/16. Бумага офсетная.
Объем: усл. печ. л. 25,2, уч.-изд. л. 25,23.
Печатная версия. Тираж 30 экз. Заказ № 142-2026.
Цена договорная.

Signed to print on June 30, 2026.
Format 84´108/16. Offset paper.
Volume: conventional printing plate 25.2, estimated printing plate 25.23.
Printed version. Circulation 30 copies. Order No. 142-2026.
The price is negotiable.

Шығыс Қазақстан техникалық университеті. 070004, Өскемен қаласы, Протозанов көшесі, 69.
Восточно-Казахстанский технический университет. 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.
D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. 070004, Ust-Kamenogorsk, 69 Protozanov Street.