

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_6

XFTAP 622.276.52

МАУСЫМДЫҚ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ АУЫТҚУЛАРДЫ ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ҚАЗАҚСТАН КЕН ОРЫНДАРЫ ҮШІН БҰРАНДАЛЫ КОМПРЕССОРДЫҢ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІН ЖАСАУ

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВИНТОВОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЗАХСТАНА С УЧЁТОМ СЕЗОННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

CREATION OF A DIGITAL TWIN OF A SCREW COMPRESSOR FOR KAZAKHSTAN'S FIELDS, TAKING INTO ACCOUNT SEASONAL TEMPERATURE FLUCTUATIONS

Д.Ж. Басқанбаева ¹, К.К. Елемесов ¹, Д.М. Мырзабекова ^{2*}, Е.Б. Бегімбаев ¹

¹Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Автор-корреспондент: Мырзабекова Динара Мырзабекқызы, e-mail: DMyrzabekova@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:

сандық егіз, бұрандалы
компрессор, маусымдық
температураның
ауытқуы, мұнай-газ кен
орындары, энергия
тиімділігі,
математикалық
модельдеу.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада күрт континеттік климат жағдайында Қазақстан Республикасының мұнай-газ кен орындарында пайдаланылатын бұрандалы компрессордың сандық егізін әзірлеуге және сынақтан өткізуге бағытталған зерттеу жұмысы ұсынылған. Жұмыстың өзектілігі қоршаған ортаның маусымдық температуралық ауытқулардың компрессорлық жабдықтың термодинамикалық, энергетикалық және ресурстық көрсеткіштеріне елеулі әсер етуімен негізделді. Зерттеу шеңберінде автоматтандырылған басқару жүйелерінің мұрағаттық деректерін, нақты жылу техникалық зерттеулердің нәтижелерін және математикалық модель параметрлерін сәйкестендіруді қамтитын есептеу-эксперименттік база қалыптастырылды. Өзірленген сандық егіз жылу алмасуды, майларды бүркүді, ағып кетуді және механикалық шығындарды ескере отырып, нақты газды сығымдау процесінің термогазодинамикалық сипаттамасына негізделген. Сипаттамалық маусымдық режимдерде есептелген және нақты жұмыс параметрлерін салыстыру арқылы модельді тексеру жүргізілді. Қоршаған орта температурасының өнімділікке, қуат тұтынуға, айдау температурасына, меншікті қуатты тұтынуға және қондырғының жылу балансына әсерінің сандық тәуелділіктері алынды. Модельдеу нәтижелері климаттық фактордың жылдық қуат тұтынуына және компрессордың ресурстық көрсеткіштеріне интегралды әсерін бағалауға мүмкіндік береді. Маусымдық өзгерістерді ескеру компрессорлық қондырғылардың жұмыс режимдерін болжау дәлдігі мен энергия тиімділігін арттырудың міндетті шарты екендігі анықталды.



© 2026 Д.Ж. Басқанбаева, К.К. Елемесов, Д.М. Мырзабекова, Е.Б. Бегімбаев

Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы

(CC BY 4.0) бойынша таратылады.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Ключевые слова:

цифровой двойник,
винтовой компрессор,
сезонные температурные
колебания, нефтегазовые
месторождения,
энергоэффективность,
математическое
моделирование.

АННОТАЦИЯ

В статье представлено исследование, направленное на разработку и апробацию цифрового двойника винтового компрессора, эксплуатируемого на нефтегазовых месторождениях Республики Казахстан в условиях резко континентального климата. Актуальность работы обусловлена значительным влиянием сезонных температурных колебаний окружающей среды на термодинамические, энергетические и ресурсные характеристики компрессорного оборудования. В рамках исследования сформирована расчетно-экспериментальная база, включающая архивные данные автоматизированных систем управления, результаты натурных теплотехнических обследований и идентификацию параметров математической модели. Разработанный цифровой двойник основан на термогазодинамическом описании процесса сжатия реального газа с учетом теплообмена, маслопрывска, утечек и механических потерь. Выполнена верификация модели путем сопоставления расчетных и фактических параметров работы в характерных сезонных режимах. Получены количественные зависимости влияния температуры окружающей среды на производительность, потребляемую мощность, температуру нагнетания, удельное энергопотребление и тепловой баланс установки. Результаты моделирования позволили оценить интегральное влияние климатического фактора на годовое энергопотребление и ресурсные показатели компрессора. Показано, что учет сезонности является необходимым условием повышения точности прогнозирования режимов эксплуатации и энергоэффективности компрессорных установок.

keywords:

digital twin, screw
compressor, seasonal
temperature variations, oil
and gas fields, energy
efficiency, mathematical
modeling.

ABSTRACT

The paper presents a study focused on the development and validation of a digital twin of a screw compressor operated at oil and gas fields of the Republic of Kazakhstan under sharply continental climatic conditions. The relevance of the work is determined by the significant influence of seasonal ambient temperature variations on thermodynamic, energy, and reliability characteristics of compressor equipment. Within the research framework, a computational and experimental database was formed, including archived process control data, results of field thermal measurements, and identification of mathematical model parameters. The developed digital twin is based on a thermogasdynamic description of real gas compression processes taking into account heat transfer, oil injection, leakages, and mechanical losses. Model verification was carried out by comparing simulated and actual operating parameters for representative seasonal conditions. Quantitative relationships describing the effect of ambient temperature on compressor capacity, power consumption, discharge temperature, specific energy consumption, and heat balance were obtained. Simulation results made it possible to assess the integral impact of climatic factors on annual energy consumption and equipment life indicators. It is shown that accounting for seasonal effects is essential for improving the accuracy of operational forecasting and energy efficiency assessment of compressor units.

КІРІСПЕ

Жаһандық индустрияландыру және энергия ресурстарын тұтынудың үздіксіз өсуі жағдайында көмірсутек шикізатын өндіруге, дайындауға және тасымалдауға тартылған технологиялық жабдықты пайдалану тиімділігін арттыру ерекше маңызға ие. Компрессорлық қондырғылар мұнай-газ кен орындары инфрақұрылымының ажырамас бөлігі бола отырып, негізінен бүкіл өндірістік тізбектің жұмыс істеу сенімділігін анықтайды. Бұрандалы компрессорлар энергия тиімділігіне, ықшамдылығына және ұзақ мерзімді жүктемелерге төзімділігіне байланысты газ және ілеспе мұнай газын өндіру нысандарында кеңінен қолданылады (Stosic N. et al., 2002.; Kovacevic A., et al., 2007; Rane S., et al., 2013). Алайда бұл жабдықты нақты өндірістік жағдайларда пайдалану ауыспалы жұмыс режимдерінде де, қоршаған ортаның әсеріне де байланысты бірқатар проблемалармен байланысты. Жаһандық деңгейде компрессорлық жүйелерді цифрландыру, олардың ақауларға төзімділігін арттыру және жұмыс істеу режимдерін оңтайландыру мәселелері зияткерлік энергия мен «ақылды» кен орындарын дамытудың негізгі бағыттарының бірі ретінде қарастырылады (Chang K.-H., et al., 2021; Mustafin T.N., et al., 2016).

Жылдық температура амплитудасы экстремалды мәндерге жететін күрт континенттік климаты бар аймақтарда компрессорлық жабдықты пайдалану ерекше қиындық тудырады (De Raere M., et al., 2005). Мұндай жағдайларда жұмыс ортасының жылу-физикалық қасиеттері, майлардың тұтқырлығы, газдың тығыздығымен ылғалдылығы өзгереді. Бұл қысудың термодинамикалық параметрлеріне, жұмыс органдарының тозуына және энергия шығындарына тікелей әсер етеді. Қазақстан Республикасы дәл осындай аймақтарға жатады. Елдің мұнай-газ кен орындарының көпшілігі қоршаған орта температурасының айтарлықтай маусымдық өзгеруімен сипатталады: солтүстік және орталық аймақтарда қыс мезгілінде -40°C -тан батыс және оңтүстік аймақтарда жаз айларында $+40^{\circ}\text{C}$ -қа дейін болады (De Raere M., et al., 2005). Бұл жағдайларда тәуліктік айырмашылықтар 20°C немесе одан да көп болуы мүмкін. Осындай климаттық ерекшеліктер бұрандалы компрессорлардың жұмысына кешенді әсер етеді, бұл нақты пайдалану параметрлерінің паспорттық мәндерден ауытқуын тудырады. Бұл өз кезегінде меншікті энергияны тұтынудың өсуіне, түйіндердің тез тозуына және апаттық тоқтау ықтималдығының жоғарылауына әкеледі (Harnatkiewicz P., et al., 2010; Xiao, Guo & Yan., et al., 2025; Wu X., et al., 2017).

Компрессорлық қондырғылардың сенімділігін қамтамасыз етудің дәстүрлі тәсілдері регламенттік техникалық қызмет көрсетуге, мерзімді диагностикаға және автоматтандырылған бақылау жүйелерін қолдануға негізделген. Бұл әдістер өзінің тиімділігін дәлелдеді, алайда бірқатар шектеулерге ие (Tao F., et al., 2018; Tao F., et al., 2019; Fuller A., et al., 2020; Negri E., et al., 2017). Жоспарлы-алдын алу жөндеу жұмыстары орташаландырылған нормативтер бойынша орындалады және нақты машинаның жеке ерекшеліктері мен оны пайдалану жағдайларын ескермейді. Мониторинг жүйелері жабдықтың ағымдағы күйін тіркейді, бірақ көп жағдайда сыртқы факторлардың өзгеруі жағдайында оның жұмыс параметрлерінің өзгерісін жоғары дәлдікпен болжау мүмкін емес. Қоршаған орта температурасын ескеру үшін эмпирикалық түзету коэффициенттерін қолдану да жуықтау сипатқа ие және компрессор ішіндегі термодинамикалық, механикалық және энергетикалық процестердің күрделі өзара байланысын көрсетпейді (Kritzing W., et al., 2018).

Соңғы жылдары аталған мәселені шешудің ең перспективалы жолдарының бірі сандық модельдеу технологияларын енгізу, атап айтқанда өнеркәсіптік жабдықтың сандық егіздерін құру болды. Сандық егіз ұғымы нысанның динамикалық математикалық-бағдарламалық моделін білдіреді, бұл модель датчиктерден алынатын деректер арқылы нақты уақытта нысанмен үйлестірілген және оның әртүрлі пайдалану режимдеріндегі

қызмет ету барысын қалпына келтіруге қабілетті. Бұл тәсілдің артықшылығы нақты технологиялық қондырғыға араласусыз виртуалды эксперименттер жүргізу, ақауларды болжау, жұмыс режимдерін оңтайландыру және қалдық ресурсты бағалау мүмкіндігі болып табылады. Сонымен қатар, сандық егіз климаттық, жүктемелік және технологиялық параметрлерді қоса алғанда, көптеген факторлардың әсерін бір уақытта есепке алуға мүмкіндік береді (Madni A. M., et al., 2019).

Айқын артықшылықтарға қарамастан, компрессорлық жабдықтың сандық егіздерін тәжірибе жүзінде іске асыру бірқатар қиындықтармен байланысты болып келеді. Біріншіден, газды сығу, жылу беру, май бөлу және механикалық шығындар процестерін жеткілікті дәлдікпен сипаттай алатын адекватты математикалық модельді әзірлеу қажет. Екіншіден, әртүрлі маусымдық жағдайлардағы жұмыс параметрлерін қоса алғанда, үлкен көлемдегі эксперименттік деректерді жинау және верификациялау қажет. Үшіншіден, модельді кенорындардың қолданыстағы автоматтандыру жүйелерімен интеграциялау міндеті күрделенеді. Көптеген кәсіпорындар үшін қосымша шектеу экономикалық фактор болып табылады, өйткені толық масштабты сандық платформаларды құру айтарлықтай инвестицияларды және ұзақ уақыт енгізуді қажет етеді.

Балама бағыт ретінде шектеулі мамандандырылған міндеттерді шешуге бағытталған жеңілдетілген есептеу модельдері мен бағдарламалық симуляторларды қолдану болып табылады, мысалы, энергия тиімділігін бағалау немесе температуралық режимдерді болжау. Олардың артықшылығы – енгізудің салыстырмалы қарапайымдылығы және есептеу ресурстарына қойылатын талаптардың төменділігі болып табылады. Алайда мұндай шешімдер, әдетте, кешенді талдауды қамтамасыз етпейді және әсіресе Қазақстан жағдайлары үшін маңызды болып табылатын маусымдық климаттық тербелістерді қоса алғанда, пайдалану әсерлерінің толық спектрін ескеруге мүмкіндік бермейді (Glaessgen E., et al., 2012; Yan J., et al., 2017; Carvalho T. P., et al., 2019).

Осылайша, жабдықтың нақты түрлеріне және пайдаланудың аймақтық ерекшеліктеріне бейімделген мамандандырылған сандық егіздерді әзірлеудің өзекті ғылыми-практикалық міндеті қалыптасады. Қазақстандық кенорындар үшін бұл бағыт стратегиялық маңызға ие. Мұнай-газ секторы елдің жалпы ішкі өнімінің елеулі үлесін қалыптастырады және экспорттық кірістердің негізгі көзі болып қала береді. Өндірістік жабдықтың энергия тиімділігі мен сенімділігін арттыру өндірудің өзіндік құнын төмендетумен, газдың технологиялық жоғалтуларын азайтумен және парниктік газдар шығарындыларын қысқартумен тікелей байланысты. Жаһандық энергия тәртібіне көшу және экологиялық талаптардың күшеюі жағдайында бұл факторлар қосымша маңыздылыққа ие болады.

Айта кету керек, Қазақстан кенорындарындағы компрессорлық парктің едәуір бөлігі он жылдан астам, ал жекелеген нысандарында жиырма жылдан астам уақыт бойы пайдаланылуда. Жабдықтың тозуы экстремалды температуралық режимдермен үйлесе отырып, жоспардан тыс ақаулардың қаупін күшейтеді. Бұл ретте қысқы кезеңде нақты сынақтарды жүргізу техникалық және экономикалық тұрғыдан қиын. Бұрандалы компрессордың $-30...-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі теріс температураларда және $+35...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі оң температураларда жұмысын қайта шығара алатын сандық егізді құру өндірісті тоқтатпай-ақ осы олқылықты толтыруға мүмкіндік береді.

Таңдалған бағыттың өзектілігі Қазақстанның индустрияны цифрландыру саласындағы мемлекеттік саясатымен де айқындалады. «Цифрлық Қазақстан» бағдарламаларын іске асыру және мұнай-газ кәсіпорындарында Индустрия 4.0 элементтерін енгізу жабдықты бақылау және басқарудың интеллектуалды жүйелерін әзірлеу мен енгізуді ынталандырады. Осы тұрғыда жеке технологиялық қондырғылардың қолданбалы сандық егіздерін құру интеграцияланған цифрлық кенорындарды қалыптастыруға бағытталған практикалық қадам ретінде қарастырылады.

Қарастырылып отырған жұмыс компрессорлық машиналардың барлық түрлерін модельдеудің ауқымды әмбебап платформасын құруға бағытталмағанын атап өткен жөн. Зерттеу Қазақстан кенорындарында пайдаланылатын нақты бұрандалы компрессорды модельдеуге байланысты неғұрлым шектеулі, қолданбалы міндетті шешуге бағытталған, оның пайдалану сипаттамаларына маусымдық температуралық тербелістердің тигізетін әсеріне баса назар аударылған. Мұндай тәсіл термодинамикалық және жылулық процестерді терең пысықтауға, есептік және нақты деректердің салыстырмалылығын қамтамасыз етуге және шешімді кейіннен кеңейту үшін әдіснамалық негізді қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Орындалған жұмыс жылдық пайдалану циклінде қоршаған орта параметрлерінің өзгеруін ескеретін бұрандалы компрессордың сандық егізін әзірлеуге және апробациялауға бағытталған. Зерттеу шеңберінде әртүрлі маусымдық температураларда компрессордың жұмыс процестерін адекватты түрде қайта шығара алатын, оның өнімділігін, энергетикалық шығындары мен жылулық режимдерін есептеуді қамтамасыз ететін, сондай-ақ қазақстандық кенорындар жағдайында пайдалану тиімділігін талдауға арналған құрал ретінде қызмет ететін математикалық және бағдарламалық модельді құру мақсаты қойылған.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Зерттеу мақсатына сәйкес эксперименттік және есептік жұмыстар Қазақстан Республикасының мұнай-газ кен орындарының бірінде пайдаланылатын бұрандалы компрессордың цифрлық егізін салу және верификациялау үшін жеткілікті деректер жиынтығын алуға, сондай-ақ маусымдық температуралық ауытқулардың оның пайдалану сипаттамаларына әсерін бағалауға бағытталған. Орындалған жұмыстардың жалпы жоспары қондырғы жұмысының табиғи параметрлерін жинауды, есептелген термогазодинамикалық модельді қалыптастыруды, жылу балансының алгоритмдерін әзірлеуді, цифрлық егізді бағдарламалық қамтамасыз етуді және модельдеу нәтижелерін жылдық пайдалану циклінің әртүрлі кезеңдерінде алынған нақты деректермен салыстыруды қамтитын өзара байланысты мәселелерді дәйекті шешуді қамтыды. Зерттеу қолданбалы сипатта болды және бір компрессорлық қондырғының жұмысын кен орнының компрессорлық паркіне таратылмай талдауға бағытталған, бұл климаттық фактордың әсерін егжей-тегжейлі зерттеуге назар аударуға мүмкіндік берді.

Зерттеу нысаны ілеспе мұнай газын сығымдау үшін қолданылатын өнеркәсіптік маймен толтырылған бұрандалы компрессор болды. Қондырғының номиналды өнімділігі 0,8 МПа қысыммен есептелген кезде 52 м³/мин құрады. Жетек қуаты 315 кВт асинхронды электр қозғалтқышымен жүзеге асырылды. Компрессор ашық алаңда блок-модульдік құрылымда жұмыс істеді, бұл оның қоршаған орта температурасына тікелей тәуелділігін тудырды. Штаттық бақылау жүйесі сору және айдау қысымын, кіріс және шығыс газ температурасын, айналым тізбегіндегі май температурасын және тұтынылатын электр қуатын тіркеуді қамтамасыз етті.

Деректердің бастапқы массивін қалыптастыру үшін авторлар 14 ай ішінде технологиялық процесті басқарудың автоматтандырылған жүйесінің мұрағаттарын талдады, бұл толық маусымдық циклды, соның ішінде -32 °C-қа дейінгі қысқы төменгі және +37 °C-қа дейінгі жазғы жоғары температураларды қамтуға мүмкіндік берді. Параметрлерді тіркеудің дискреттілігі 10 секундты құрады, алайда модельдеу мақсатында дәлдік пен есептеу жүктемесі арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін 5 минуттық орташа мәндер қолданылды. Өңделген іріктеменің жалпы көлемі технологиялық параметрлердің 3,6 млн жазбасынан асты.

Архивтік деректерді талдаумен қатар, компрессорлық қондырғыны қысқы және жазғы кезеңдерде заттай жылу техникалық тексерулер жүргізілді. Өлшеулер К типті тасымалданып келетін калибрленген термодатчиктер және қателігі $\pm 1,5$ % болатын инфрақызыл пирометрлер көмегімен орындалды. Компрессорлық блок корпусының, майбөлгіштің, жылуалмастырығыштар мен құбыржолдардың температуралары тіркелді. Қосымша блок-контейнер ішіндегі және сыртқы алаңдағы қоршаған ауаның температурасы анықталды. Алынған деректер есептік модельдегі жылуөткізгіштік коэффициенттерін нақтылау үшін пайдаланылды.

Сандық егізді құрудың әдістемелік негізі ретінде сығымдау процестерінің термодинамикалық модельдеуін параметрлерді эмпирикалық сәйкестендіру элементтерімен үйлестіретін комбинацияланған тәсіл қызмет етті. Бұрандалы компрессордың жұмыс процесі ағып кетулерді, май бүркүді және жұмыс камерасының қабырғаларымен жылуалмасуды ескере отырып, нақты газдың квазистационарлы политропты сығылуы ретінде сипатталды. Процестің базалық теңдеуі келесі түрде жазылды:

$$p \cdot V^n = \text{const},$$

мұндағы политропа көрсеткіші n эксперименттік деректер бойынша анықталды және қоршаған орта температурасы мен жүктеме режиміне байланысты 1,08-1,22 аралығында өзгерді. Теріс температуралар кезінде май тұтқырлығының артуына және жылу бөлудің қарқындылығына байланысты n мәні орташа есеппен 6-8 %-ға төмендейтіні анықталды.

Компрессор арқылы өтетін газдың массалық шығыны төмендегі өрнек бойынша анықталды:

$$G = \rho_1 \cdot Q_t \cdot \eta_v,$$

мұндағы ρ_1 - сору кезіндегі газ тығыздығы, Q_t - теориялық беріліс, η_v - көлемдік пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК). Тығыздық кенорнының қатар жүретін газының компоненттік құрамы бойынша анықталған сығылу коэффициентін ескере отырып, нақты газ күйінің теңдеуі арқылы есептелді. Көлемдік ПӘК паспорттық және нақты өнімділікті салыстыру негізінде сәйкестендірілді және 0,71–0,83 аралығында өзгерді. Роторлардың термиялық деформациялары кезінде саңылаулар арқылы ағып кетулердің ұлғаюына байланысты қысқы кезеңде оның 0,74-ке дейін төмендеуі тіркелді.

Компрессордың жылу балансы келесі теңдеу негізінде қалыптасты:

$$Q_{\text{сж}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{эл}} = Q_{\text{газ}} + Q_{\text{масло}} + Q_{\text{окр}},$$

мұнда: сығымдау жылуы (газды сығу кезінде бөлінетін жылу), үйкеліс әсерінен болатын механикалық шығындар, қозғалтқыштағы электрлік шығындар, сығылған газбен кететін жылу (газдың ағысымен шығарылатын жылу), маймен кететін жылу (майдың салқындату әсері), қоршаған ортаға таралатын жылу ескерілді. Жылуөткізгіштік коэффициенттері натурлық өлшеулердің нәтижелері бойынша анықталды және модельді верификациялау кезінде ең кіші квадраттар әдісімен түзетілді. Қысқы кезеңде корпусының жиынтық жылу бергіштік коэффициенті температуралық қысымның ұлғаюына байланысты жазғы кезеңмен салыстырғанда 18 %-ға өсетіні анықталды.

Сандық егіздің бағдарламалық іске асырылуы инженерлік модельдеу ортасында модульдік архитектураны пайдалана отырып орындалды. Модель газодинамиканы есептеу блогын, жылулық блокты, энергетикалық модульді және климаттық әсерлер модулін қамтыды. Соңғы модуль қоршаған ортаның нақты температурасын енгізуді және оның сорылатын газдың тығыздығына, майдың тұтқырлығына, жылуөткізгіштік коэффициенттеріне және жетектің электрлік шығындарына әсерін есептеуді қамтамасыз етті. Есептеу 1 минуттық қадаммен жүргізілді, бұл температураның тәулік ішіндегі өтпелі ауытқуларын қайта жаңғыртуға мүмкіндік берді.

Сандық егізді верификациялау компрессордың жылдың сипатты кезеңдеріндегі есептік және нақты жұмыс параметрлерін салыстыру жолымен жүргізілді. Бақылау

нүктелері ретінде қоршаған орта температурасы $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ және $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ болған кездегі режимдер таңдалды. Айдау қысымы, шығыстағы газ температурасы және тұтынылатын қуат бойынша ауытқулар бағаланды. Қысым бойынша орташа квадраттық сәйкессіздік 3,4 %-дан, айдау температурасы бойынша 4,1 %-дан, электр қуаты бойынша 5,6 %-дан аспады, бұл қойылған қолданбалы мәселені шешу үшін жеткілікті деп танылды.

Сонымен қатар, авторлармен мұрағаттық деректерде тіркелмеген гипотетикалық режимдерді, оның ішінде $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ дейін экстремалды салқындатуды модельдеу орындалды. Есептеулер $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ кезіндегі номиналды жағдайлармен салыстырғанда меншікті энергия тұтынуының 9-11 %-ға өсетінін көрсетті, бұл механикалық шығындардың ұлғаюымен және май бөлу жағдайларының нашарлауымен түсіндіріледі. Жазғы температура $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан жоғары болған кезде, керісінше, айдау температурасының $108-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейін өсуі тіркелді, бұл шекті рұқсат етілген мәндерге жақындап, салқындату режимдерін түзету қажеттілігін көрсетті.

Маусымдық тұрақсыздықты есепке алу үшін авторлар климаттық жүктеменің интегралды функциясын енгізді, бұл қоршаған орта температурасы мен оның жыл бойына әсер ету ұзақтығының жыл ішінде біріктірілуін білдіреді. Осы функцияны қолдану нүктелік есептеулерден компрессордың жылдық энергия шығындарының болжамына көшуге мүмкіндік берді. Есептеу климаттық фактордың агрегаттың жылдық энергия тұтынуын изотермиялық есептік жағдайлармен салыстырғанда 6,3 %-ға арттыратынын көрсетті.

Осылайша, қолданылған әдістеме заттай өлшеулерді, мұрағаттық деректерді талдауды және термодинамикалық модельдеуді біріктірді, бұл маусымдық температуралық тербелістердің бұрғандылығы компрессордың пайдалану параметрлеріне әсерін тиісті түрде көрсететін жұмысқа қабілетті сандық егізді құруды қамтамасыз етті. Орындалған зерттеулер көлемі бір компрессорлық қондырғының шеңберімен шектелді және оның жұмыс режимдерін Қазақстан кенорындарының климаттық жағдайында бағалаудың дәлдігін арттырудың локальды міндетін шешті, бұл жүргізілген жұмыстың қолданбалы бағыты мен қалыпты ауқымына сәйкес келеді.

НӘТИЖЕЛЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Орындалған зерттеулер нәтижесінде Қазақстан Республикасының мұнай-газ кенорындарына тән қоршаған орта температурасының маусымдық өзгергіштігі жағдайында оның пайдалану сипаттамаларын қайта жаңғыртуға бағытталған бұрғандылығы компрессордың сандық егізі қалыптастырылып, апробациядан өткізілді. Мұрағаттық және нақты деректер негізінде құрастырылған есептеу-эксперименттік база климаттық параметрлер мен компрессорлық қондырғының өнімділік, меншікті энергия тұтыну, температуралық режимдер және интегралды энергия тиімділігі сияқты негізгі жұмыс істеу көрсеткіштері арасындағы сандық тәуелділіктерді анықтауға мүмкіндік берді.

Жылдық цикл ішіндегі технологиялық ақпараттар жиынын өңдеу қоршаған орта температурасының күй теңдеуі арқылы анықталатын сору кезіндегі газдың тығыздығына тікелей әсер ететінін көрсетті.

$$\rho_1 = p_1 / (Z \cdot R \cdot T_1),$$

мұндағы p_1 – сору қысымы, Z – сығылу коэффициенті, R – газ тұрақтысы, T_1 – газдың абсолюттік температурасы. Қоршаған орта температурасының $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейін төмендеуі кезінде сорылатын газдың тығыздығы $0,92$ -ден $1,27\text{ кг/м}^3$ -ге дейін өсті, бұл 38 %-ға ұлғаюға сәйкес келді. Бұл жағдай геометриялық беріліс өзгеріссіз қалған кезде компрессордың массалық өнімділігінің артуына әкелді. Цифрлық егіздің есептеулері газдың массалық шығынының $47,6$ -дан $64,8\text{ кг/мин.}$ дейін ұлғайғанын көрсетті, алайда сонымен қатар механикалық және энергетикалық шығындардың өсуі тіркелді (1-кесте).

1-кесте. Қоршаған орта температурасының газ тығыздығына, массалық өнімділікке және компрессордың тұтынылатын қуатына әсер етуі

Қоршаған ортаның температурасы, °C	Сору кезіндегі газдың тығыздығы, кг/м³	Массалық шығын, кг/мин	Көлемдік беріліс, м³/мин	Тұтынылатын қуат, кВт	Меншікті қуат, кВт/(кг/мин)
+35	0,89	46,2	51,9	270	5,84
+30	0,92	47,6	52,0	272	5,71
+20	1,01	51,8	52,1	276	5,33
+10	1,08	55,4	52,2	281	5,07
0	1,16	59,3	52,3	287	4,84
-10	1,21	61,7	52,3	292	4,73
-20	1,25	63,5	52,4	298	4,69
-30	1,27	64,8	52,4	305	4,71

Ескерту - авторлар құрастырған

Тұтынылатын электр қуаты келесі өрнек негізінде анықталды:

$$N = (G \cdot k \cdot R \cdot T_1 / (k-1)) \cdot [(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1] / \eta_{\Sigma},$$

мұндағы k – адиабата көрсеткіші, p_2 – айдау қысымы, η_{Σ} – жиынтық пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК). Модельдеу нәтижелері бойынша, қыс мезгілінде температура $-25 \dots -30$ °C болғанда, жетектің нақты қуаты 298–305 кВт-қа дейін артты, ал $+20$ °C температурада бұл көрсеткіш 272–278 кВт-ты құрады. Орташа өсім 9,4 % құрады. Сонымен қатар газ тығыздығының өсуі май тұтқырлығының артуынан және бұрандалы жұптағы үйкелістен болатын энергия шығындарын толық емес, жартылай ғана орнына толтырды.

Температуралық режимдерді зерттеу айдау температурасының климаттық жағдайларға және салқындату жүйесінің тиімділігіне тұрақты тәуелділігін анықтауға мүмкіндік берді. Шығыстағы газ температурасы политроптық қатынас бойынша есептелді:

$$T_2 = T_1 \cdot (p_2/p_1)^{(n-1)/n}.$$

Жаз кезінде қоршаған орта температурасы $+35 \dots +37$ °C болғанда T_2 есептік мәні 109–112 °C-қа жетті, бұл 107–114 °C диапазонындағы нақты өлшеулермен расталды (1-сурет).



1-сурет. Эксперименттік-есептік модельдеу нәтижелері бойынша бұрандалы компрессордың айдау температурасының қоршаған орта температурасына тәуелділігі
Ескерту – Авторлармен құрастырылған

Қысқы жұмыс кезінде айдау температурасы 78-84 °С дейін төмендеді, сондықтан өзгерістің жылдық амплитудасы шамамен 30 °С болды (2-кесте). Нәтижелер жаз кезінде компрессордың шекті рұқсат етілген жылу режимдеріне жақын жұмыс істейтінін көрсетті, бұл майдың деградациясын тездетеді және апаттық өшіру қаупін арттырады.

2-кесте. Компрессордың айдау температураларының, политроп көрсеткішінің және жылулық жүктемелерінің маусымдық динамикасы

Қоршаған орта температурасы, °С	Айдау температурасы, °С	Политроп көрсеткіші, n	Газбен жылу тасымалдау, %	Маймен жылу әкегу, %	Корпус арқылы шығындар, %
+40	116	1,22	57	29	14
+35	111	1,21	56	30	14
+20	98	1,18	55	30	15
+5	90	1,15	55	29	16
-10	84	1,12	54	29	17
-25	80	1,10	54	28	18
-30	78	1,08	54	28	18

Ескерту - авторлар құрастырған

Май жүйесінің жұмыс істеуін талдау нәтижесінде Аррениус теңдеуі түрінде аппроксимацияланатын тұтқырлықтың айқын температуралық тәуелділігі анықталды.

$$M = M_0 E^{\wedge}(E / (R \cdot T)).$$

Майдың температурасы +60 °С-тан +25 °С-қа дейін төмендеген кезде динамикалық тұтқырлық 0,018-ден 0,041 Па·с-қа дейін өсті, яғни 2,2 еседен астамға артты. Бұл айналым жүйесіндегі гидравликалық шығындардың 14 %-дан 17 %-ға дейін өсуіне және сығылу аймағында майды бөлу тиімділігінің төмендеуіне әкелді. Сандық егіз бұл құбылысты механикалық қуат шығындарының ұлғаюы есебінен қайта шығарды: қыста бұл шығындар 36-39 кВт-қа дейін жетсе, жазда 28-30 кВт-ты құрады.

Көлемдік пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) келесі өрнекпен анықталады:

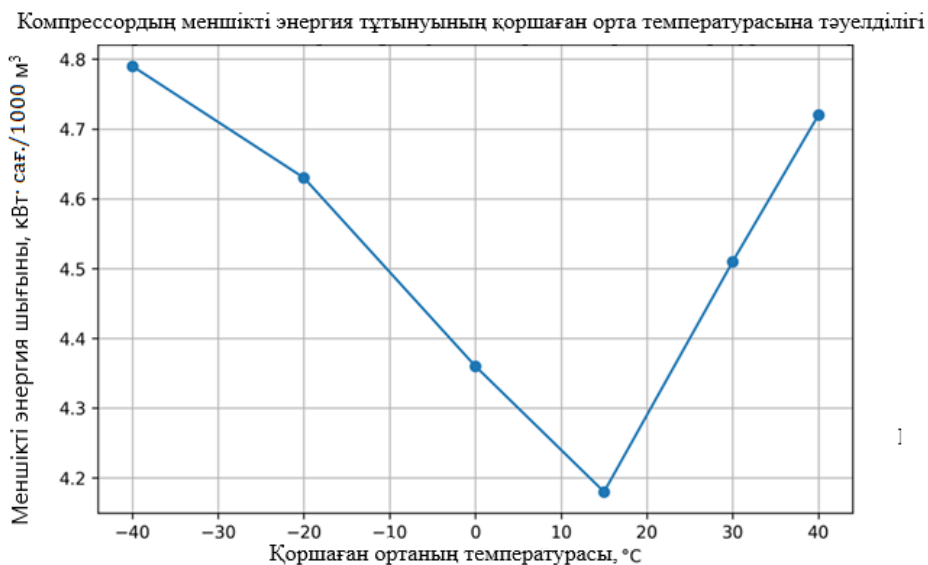
$$\eta_v = Q_f / Q_t,$$

мұндағы Q_f - нақты беріліс, Q_t - теориялық беріліс, бұл көрсеткіштің де маусымға қатысты өзгергені байқалды. Модельдеу және мұрағаттық деректер нәтижелері бойынша оның маусымаралық кезеңдегі 0,82-ден -20 °С-тан төмен температурада 0,74-ке дейін төмендегені анықталды. Негізгі себеп корпусстар мен роторлардың жылулық деформациялары болды, олар шеттік және бұрандааралық саңылаулар арқылы ағып кетуді ұлғайтты. Жаз кезінде η_v жылулық саңылаулардың тұрақтануына байланысты 0,80-0,83-ке дейін өсті.

Компрессордың интегралды энергия тиімділігі электр энергиясының нақты шығыны арқылы бағаланды:

$$e = N / G$$

Есептеулер көрсеткендей, e шамасының минималды мәні қоршаған орта температурасы +10...+15 °С болғанда тіркеліп, 4,18 кВт·сағ/1000 м³ құрады (2-сурет). Қыс кезінде көрсеткіш 4,63 кВт·сағ/1000 м³-ке дейін өссе, жаз кезінде 4,51 кВт·сағ/1000 м³-ке дейін артты (3-кесте). Осылайша, климаттың әртүрлілігі оңтайлы жағдайлармен салыстырғанда 10,8 %-ке дейін қосымша энергетикалық «айыппұл» қалыптастырды.



2-сурет. Компрессордың меншікті энергия тұтынуының қоршаған орта температурасына тәуелділігі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

3-кесте. Компрессордың энергия тиімділігінің, меншікті энергия тұтынуының және ресурстық көрсеткіштерінің маусымдық өзгеруі

Ортаның температурасы, °C	Меншікті энергия шығыны, кВт·сағ./1000 м³	Жалпы ПЭК η_{Σ}	Механикалық шығындар, кВт	Майды ауыстыру аралығы, мото сағат	Мойынтіректердің тозу коэффициенті
+40	4,72	0,71	30	2900	1,05
+30	4,51	0,74	29	3200	1,03
+15	4,18	0,78	28	4000	1,00
0	4,36	0,76	32	3700	1,07
-20	4,63	0,73	37	3500	1,15
-40*	4,79	0,71	39	3300	1,18

Ескерту - авторлармен құрастырылған

Сандық егіз агрегаттың жылу балансын талдауға мүмкіндік берді. Сығымдау және механикалық шығындар кезінде бөлінетін жалпы жылу мөлшері келесідей бөлінді: 54-57 % сығылған газбен кетірілді, 28-31% маймен шығарылды, 12-15 % корпус арқылы қоршаған ортаға таралды. Қыс мезгілінде корпус арқылы жылу жоғалту үлесі 18 %-ға дейін өсті, себебі жабдық пен сыртқы орта арасындағы температура градиенті ұлғайды. Бұл кезде жылу беру коэффициенті 9,6-дан 11,4 Вт/(м²·К)-ге дейін артты.

Есептелген және нақты параметрлерді салыстыру дамыған сандық егіздің сәйкестігін растады. Өнімділік бойынша орташа ауытқу 3,1 %, айдау температурасы бойынша 3,8 %, тұтыну қуаты бойынша 5,2 % құрады. Максималды сәйкессіздіктер көктемнің өтпелі кезеңдерінде байқалды және 6-7% жетті, бұл газ ылғалдылығының тұрақсыздығымен және модельде толық ескерілмеген оның құрамдас құрамының өзгеруімен түсіндірілді.

Экстремалды режимдерді модельдеу қосымша сандық бағалауға мүмкіндік берді. Қоршаған орта температурасының -40 °C дейін гипотетикалық төмендеуі кезінде жетектің болжамды қуаты 312 кВт-қа жетті, ал меншікті электр энергиясының шығыны 4,79 кВт·сағ/1000 м³ дейін өсті. Бұл жағдайда майдың температурасы +22 °C дейін төмендеді, бұл

айдау шарттары бойынша рұқсат етілген мәндердің шекарасында болды. Қарама-қарсы сценарийде +40 °С температурада айдау температурасы 116 °С деңгейінде болжанған, бұл пайдалану ережесінен 6-8 °С жоғары болды.

Климаттық жүктеме функциясын қолдана отырып жасалған жылдық интегралды модельдеу:

$$Kcl = \int_0^T (T_{ref} - T_{amb}(t))^2 dt,$$

мұндағы T_{ref} – тірек температурасы +20 °С, $T_{amb}(t)$ – ағымдағы температура, энергетикалық ауытқуларға ең көп үлесті қыс айларының типізетінін көрсетті. Олар жылдық электр энергиясының артық шығынының 61 %-на дейінгі бөлігін құрады. Жаз кезінде 27 % қамтамасыз етілсе, қалған үлес маусымаралық кезеңге тиесілі. Бір компрессор үшін жылдық жиынтық қосымша электр энергиясының шығыны 186 МВт·сағ құрады.

Сонымен қатар, температураның ресурстық көрсеткіштерге әсері бағаланды. Айдау температурасының 105 °С-тан жоғары көтерілуі компрессорлық майдың тотығуын үдетіп, оны ауыстырудың есептік аралығын 4000 мотосағаттан 3100 мотосағатқа дейін қысқартты. Қыста пайдалану, керісінше, майлау материалының жоғары тұтқырлығы салдарынан мойынтіректердің механикалық тозуын арттырды. Тозудың есептік үдеу коэффициенті номиналды жағдайлармен салыстырғанда 1,18-ге жетті. Корпусты кеңістіктік жылулық модельдеу температуралық өрістердің біркелкі еместігін көрсетті. Ең жоғары градиенттер шығару терезесінің аймағында тіркеліп, жаз кезінде ұзындығы 0,8 м қашықтықта 22 °С-қа жетті. Қыс кезінде градиент 11–13 °С-қа дейін төмендеді, алайда жылу жоғалтулар артты. Бұл әсерлер сандық егізде жылу беру коэффициенттерін түзету арқылы ескерілді.

Сонымен қатар, алынған нәтижелер маусымдылықтың жабдықтың дайындық коэффициентіне әсерін сандық түрде бағалауға мүмкіндік берді. Жаз кезінде температураға байланысты тоқтаулар санының 0,6 %-ға және қыста іске қосу кезіндегі сәтсіздіктердің 0,9 %-ға ұлғаюы есебінен жылдық дайындықтың интегралды төмендеуі 1,4 %-ды құрады. Қарастырылып отырған қондырғы үшін бұл жылына 122 сағат газдың жеткіліксіз шығарылуына тең.

Осылайша, жасалған сандық егіз бұрандалы компрессордың Қазақстанның климаттық жағдайларының кең ауқымында пайдалану әрекетін қайта жаңғыртуды қамтамасыз етті және маусымдық температуралық тербелістердің өнімділікке, энергия тұтынуға, жылулық режимдерге және ресурстық көрсеткіштерге әсерін сипаттайтын сандық тәуелділіктер жиынтығын алуға мүмкіндік берді. Есептік және эксперименттік деректердің жиынтығы климаттық фактордың энергетикалық тиімділіктің 8–11 % шегіндегі тұрақты ауытқуын, айдау температурасының жылдық диапазон бойынша 30 °С-қа дейінгі өзгерісін және қысқы, жазғы шекті мәндер арасындағы тұтынылатын қуаттың 33 кВт-қа дейінгі айырмашылығын қалыптастыратынын көрсетті, бұл Қазақстан кен орындарының компрессорлық жабдығын сандық модельдеу кезінде ескерудің маңыздылығын растайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу Қазақстан Республикасының мұнай-газ кен орындарының күрт континенттік климаты жағдайында жұмыс істейтін бұрандалы компрессорлардың пайдалану сипаттамаларын бағалау дәлдігін арттыруға байланысты өзекті ғылыми-қолданбалы мәселені шешуге бағытталған. Жұмыс барысында қоршаған ортаның маусымдық температуралық тербелістерін және олардың жабдықтың термогазодинамикалық, энергетикалық және ресурстық көрсеткіштеріне кешенді әсерін ескеруге бағдарланған компрессорлық қондырғының арнайы сандық егізі әзірленіп, сынақтан өткізілді. Ұзақ пайдалану кезеңінің мұрағаттық технологиялық деректерін, заттай

жылу техникалық зерттеулердің нәтижелерін және математикалық модельдің сәйкестендірілген параметрлерін қамтитын қалыптастырылған есептік-эксперименттік база модельдеудің қажетті сенімділігін қамтамасыз етті және компрессордың жұмыс процестерін климаттық әсерлердің кең ауқымында қайта жаңғыртуға мүмкіндік берді.

Алынған нәтижелерді жинақтау температуралық фактордың компрессорлық қондырғының жұмыс істеуінің барлық негізгі көрсеткіштеріне жүйелі әсер ететінін көрсетті. Қыс кезіндегі теріс мәндерден жаз кезіндегі максимум мәндерге дейінгі диапазондағы қоршаған орта температурасының өзгеруі жұмыс ортасының қасиеттерінің, жылу алмасу параметрлерінің және майлау жағдайларының айтарлықтай өзгеруіне әкелетіні анықталды, бұл жиынтықта нақты жұмыс режимдерінің номиналдыдан тұрақты ауытқуларын құрайды. Өзірленген сандық егіз бұл әсерлерді сәйкес түрде қайта жаңғырту қабілетін растады, өнімділік, айдау температурасы және тұтынылатын қуат бойынша есептік және заттай параметрлердің қанағаттанарлық сәйкестігін қамтамасыз етті. Модельдеудің қол жеткізілген дәлдік деңгейі ұсынылған модельді инженерлік талдау және болжау құралы ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында қоршаған орта температурасының төмендеуі сору кезіндегі газ тығыздығының артуымен және компрессордың массалық өнімділігінің ұлғаюымен қатар жүретіні, алайда бұл оң әсер механикалық шығындар мен энергия шығындарының өсуімен теңестірілетіні сандық түрде дәлелденді. Қысқы режимдерде тұтынылатын электр қуатының номиналды мәндерден он пайызға жуық жоғары шамаларға дейін өсуі тіркелді. Сонымен қатар климаттық жағдайлардың айдау температуралық режимдеріне айқын әсері анықталды. Жазғы кезеңде компрессор рұқсат етілген ең жоғары жылулық жүктемелерге жақын жұмыс істейді, бұл майдың деградациясын үдетеді және түйіндердің пайдалану ресурсын төмендетеді. Қысқы жағдайларда, керісінше, майлау материалдарының тұтқырлығының артуына, майдың таралуының нашарлауына және гидравликалық шығындардың ұлғаюына байланысты мәселелер күшейеді.

Зерттеу барысында қоршаған орта температурасының төмендеуі сору кезінде газ тығыздығының жоғарылауымен және компрессордың жаппай өнімділігінің жоғарылауымен қатар жүретіні сандық түрде дәлелденді, бірақ бұл оң әсер механикалық шығындар мен энергия шығындарының артуымен өтеледі. Қысқы режимдерде тұтынылатын электр қуатының номиналды мәннен он пайызға асатын мәндерге дейін өсуі тіркелді. Сонымен бірге климаттық жағдайлардың қысымның температуралық режимдеріне айқын әсері анықталды. Жаз кезінде компрессор шекті рұқсат етілген жылу жүктемелеріне жақын жұмыс істейді, бұл майдың нашарлауын тездетеді және түйіндердің пайдалану ресурсын төмендетеді. Қыс кезінде керісінше, майлау материалдарының тұтқырлығының жоғарылауымен, майдың таралуының нашарлауымен және гидравликалық шығындардың жоғарылауымен байланысты проблемалар күшейеді.

Алынған есептік тәуелділіктер пайдалы әсер етудің көлемдік коэффициентінің және интегралды энергия тиімділігінің маусымдық өзгергіштігін бағалауға мүмкіндік берді. Меншікті энергияны тұтынудың минималды мәндері маусымаралық температураның қалыпты температурасына сәйкес келетіні анықталды, ал қысқы және жазғы экстремумдар қосымша энергия шығынын құрайды. Интегралды жылдық модельдеу климаттық фактор компрессордың жалпы қуат тұтынуын изотермиялық есептеу жағдайларына қатысты алты пайыздан астам арттыруға қабілетті екенін көрсетті. Сонымен қатар, төмен температураның ұзақ әсер етуімен сипатталатын қыста пайдалану кезеңдері энергетикалық ауытқуларға үлкен үлес қосады.

Жұмыстың қосымша нәтижесі жабдықтың ресурстық сипаттамаларына температуралық режимдердің әсерін бағалау болды. Қысымның жоғары температурасында компрессорлық майды ауыстыру аралықтарының қысқаруы, сондай-ақ

суық іске қосу және майлаудың жоғары тұтқырлығы жағдайында мойынтірек түйіндерінің тозуын жеделдету анықталды. Кеңістіктік жылулық модельдеу корпусының температуралық өрістерінің біртекті еместігін және максималды жылулық градиенттердің орналасуын анықтауға мүмкіндік берді, бұл термокернеулік күйді диагностикалау және құрылым элементтерінің ұзақ мерзімділігін болжау үшін маңызды болып табылады.

Орындалған жұмыстың практикалық маңыздылығы мынада: әзірленген сандық егізді компрессорлардың жұмыс режимдерін оңтайландыру, салқындату және майлау жүйелерінің параметрлерін реттеу және маусымдық жағдайларға байланысты энергия шығынын болжамды бағалау үшін пайдалануға болады. Модельді қолдану нақты жабдыққа қауіп төндірмей, экстремалды режимдерді виртуалды сынауға мүмкіндік береді, бұл әсіресе шалғайдағы коммерциялық нысандар үшін өте маңызды. Ұсынылған тәсіл ұқсас компрессорлық қондырғыларға сандық егіздерді одан әрі көбейту үшін әдістемелік негіз бола алады.

Осылайша, зерттеу нәтижелері компрессорлық жабдықты сандық модельдеу кезінде климаттық факторларды есепке алудың жоғары маңыздылығын растады. Құрылған сандық егіз бұрандалы компрессордың өнімділігіне, энергия тұтынуына, жылулық режимдеріне және ресурстық көрсеткіштеріне маусымдық температуралық ауытқулардың әсерін сипаттайтын жаңа сандық тәуелділіктер жиынтығын алуды қамтамасыз етті. Жұмысты одан әрі дамытуды модельді компрессорлық станцияларға кеңейтумен, газдың құрамдас құрамының вариацияларын ескере отырып және сандық егізді болжамды диагностика мен кенорындарын интеллектуалды басқару жүйелеріне біріктірумен байланыстырған жөн.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС. Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен № BR24992956-ОТ-24. «Газды сығымдау үшін инновациялық жабдықтар мен технологияларды әзірлеу және құру» тақырыбы аясында жүзеге асырылды.

ҒЫЛЫМИ МАҚАЛАНЫ ЖАЗУ ПРОЦЕСІНДЕ ГЕНЕРАТИВТІ ЖИ ЖӘНЕ ОНЫҢ КӨМЕГІМЕН ТЕХНОЛОГИЯНЫ ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар өз жұмыстарын дайындаудың әртүрлі кезеңдерінде жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын пайдаланбаған.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital twin—The simulation aspect. *Mechatronic Futures*, 59–74. Springer. https://www.researchgate.net/publication/303900830_Digital_Twin-The_Simulation_Aspect
- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, Article 106024. https://www.iit.comillas.edu/publicacion/revista/en/2403/A_systematic_literature_review_of_machine_learning_methods_applied_to_predictive_maintenance
- Chang, K.-H., Sun, Y.-J., Lai, C.-A., Chen, L.-D., Wang, C.-H., Chen, C.-J., & Lin, C.-M. (2021). Big data analytics energy-saving strategies for air compressors in the semiconductor industry—An empirical study. *International Journal of Production Research*, 60(6), 1782–1794. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1870015>
- De Paepe, M., Bogaert, W., & Mertens, D. (2005). Cooling of oil injected screw compressors by oil atomisation. *Applied Thermal Engineering*, 25(15), 2764–2779. https://www.researchgate.net/publication/245213320_Cooling_of_oil_injected_screw_compressors_by_oil_atomisation

- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. https://www.researchgate.net/publication/341717861_Digital_Twin_Enabling_Technologies_Challenges_and_Open_Research
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1–14. https://www.researchgate.net/publication/268478543_The_digital_twin_paradigm_for_future_NASA_and_US_air_force_vehicles
- Harnatkiewicz, P., Rusinski, E., & Moczko, P. (2010). The lifetime prediction of a rotary screw compressor of a liquid cooler subjected to high pressure and high frequency loads. *Engineering Failure Analysis*, 17(6), 1290–1299. https://www.researchgate.net/publication/257519739_The_lifetime_prediction_of_a_rotary_screw_compressor_of_a_liquid_cooler_subjected_to_high_pressure_and_high_frequency_loads
- Kovacevic, A., Stosic, N., & Smith, I. K. (2007). Screw compressors: Three-dimensional computational fluid dynamics and solid-fluid interaction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 221(2), 95–108. https://www.researchgate.net/publication/321520609_Screw_Compressors_Three_Dimensional_Computational_Fluid_Dynamics_and_Solid_Fluid_Interaction
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>
- Madni, A.M., Madni, C.C., & Lucero, S.D. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1), Article 7. https://www.researchgate.net/publication/-330749986_Leveraging_Digital_Twin_Technology_in_Model-Based_Systems_Engineering
- Mustafin, T. N., Yakupova, R. R., Burmistrova, A. V., Khamidullina, M. S., & Khisameeva, I. G. (2016). Analysis of influence of screw compressor construction parameters and working condition on rotor temperature fields. *Procedia Engineering*, 152, 423–433. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816320203>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. https://www.researchgate.net/publication/319888412_A_Review_of_the_Roles_of_Digital_Twin_in_CPS-based_Production_Systems
- Rane, S., Kovacevic, A., & Stosic, N. (2013). Grid generation and CFD analysis of variable geometry screw compressors. *International Journal of Refrigeration*, 36(2), 553–563. <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/4417/>
- Stosic, N., Kovacevic, A., & Smith, I. K. (2000). The CFD analysis of a screw compressor suction flow. *International Compressor Engineering Conference*, Paper 1479. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2478&context=icec>
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169. https://www.researchgate.net/publication/-322566556_Data-driven_smart_manufacturing
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. https://www.researchgate.net/publication/345078627_Digital_Twin_in_Industry_State-of-the-Art
- Wu, X., Xing, Z., He, Z., Wang, X., & Chen, W. (2017). Effects of lubricating oil on the performance of a semi-hermetic twin screw refrigeration compressor. *Applied Thermal Engineering*, 112, 340–352. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431116322657>
- Xiao, G., Yan, D., & Li, C. (2025). Internal heat transfer of oil-injected screw compressor from liquid film flow model. *Applied Thermal Engineering*, 274. <https://www.researchgate.net/>

publication/391381495_Internal_heat_transfer_of_oil-injected_screw_compressor_from_liquid_film_flow_model

Yan, J., Meng, Y., Lu, L., & Li, L. (2017). Industrial big data in an Industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance. IEEE Access, 5, 23484–23491.

https://www.researchgate.net/publication/320635598_Industrial_Big_Data_in_an_Industry_40_Environment_Challenges_Schemes_and_Applications_for_Predictive_Maintenance

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Басканбаева Динара Жумабаевна – PhD, қауымдастырылған профессор, Сатпаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

Басканбаева Динара Жумабаевна – PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, г.Алматы, Казахстан

Baskanbayeva Dinara Zhumabaevna – PhD, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>



Елемесов Касым Коптлеуевич – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Сатпаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

Елемесов Касым Коптлеуевич – кандидат технических наук, профессор, Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

Yelemesov Kasym Koptleevich – candidate of technical sciences, Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: k.yelemesov@satbayev.university,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>



Мырзабекова Динара Мырзабекқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университет, Өскемен қ., Қазақстан

Мырзабекова Динара Мырзабекқызы – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Myrzabekova Dinara Myrzabekkyzy – PhD, Associate Professor, D.Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: DMyrzabekova@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4493-6102>



Бегімбаев Ерасыл Бекзатұлы – магистрант 1-го курса, Сатпаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

Бегімбаев Ерасыл Бекзатұлы – 1-ші курс магистранты, Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

Begimbayev Erasyl Bekzatovich – 1st-year master's student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: yerasylbegimbayev@gmail.com;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4170-3166>