

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2157>

***Г. А. Ускенбаева¹, Ә. Қ. Сыдық², А. К. Шукирова³,
С. Е. Тасанбаев⁴, К. С. Кульниязова⁵**

^{1,2,3,4,5}Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6904-8000>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8915-8798>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3032-4722>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3950-3062>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8320-2091>

*e-mail: gulzhum_01@mail.ru

ГИБРИДТІ МОДЕЛЬДЕУ ӘДІСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ КҮРДЕЛІ ӨНЕРКӘСІПТІК ОБЪЕКТІЛЕРДІҢ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІН ҚАЛЫПТАСТЫРУ

Соңғы онжылдықта әлемдік мұнай-газ құбыр инфрақұрылымын басқаратын компаниялар «цифрлық құбыр» деңгейінен «интеллектуалды құбыр» (smart/intelligent pipeline) тұжырымдамасына жүйелі түрде өту стратегиясын қалыптастырды. Бұл трансформация Industry 4.0, киберфизикалық жүйелер (CPS), өндірістік IoT, бұлттық есептеулер, үлкен деректер аналитикасы және жасанды интеллекттің өндірістік ортаға терең енуімен жеделдей түсті. Нәтижесінде құбыр желілерін жобалау, салу және пайдалану үдерістерінде деректерге сүйенген басқару, активтің өмірлік циклін толық қамтитын мониторинг, тәуекелді алдын ала болжау және операциялық тиімділікті көтеру негізгі мақсатқа айналды.

Осы жаһандық өзгерістер аясында цифрлық егіз (Digital Twin) технологиясы интеллектуалды құбырды қалыптастырудың ең маңызды «күшейтуші» (enabling) тетіктерінің бірі ретінде орнықты. Цифрлық егіз нақты физикалық құбыр объектілерімен үздіксіз байланыста болатын сандық модельдер жүйесін құрып, нақты уақыт режимінде күй-жай деректерін виртуалды ортадағы есептеу модельдерімен біріктіреді.

Бұл мақалада мұнай-газ құбыр желілерін интеллектуалдандырудағы цифрлық егіздің рөлі егжей-тегжейлі талданып, оның анықтамасы, ұзақ мерзімді мақсаттары, қолдану парадигмасы және болашақ зерттеу/тәжірибелік жұмыстардың негізгі бағыттары ұсынылады. Атап айтқанда, цифрлық егіздің тиімділігі көбіне деректердің толықтығы мен сенімділігіне, модельдердің физикалық процестерді дәл сипаттауына, жүйелер арасындағы интеграция сапасына және басқарушылық шешімдердің автоматтандырылған контурын дұрыс құруға тәуелді екені негізделеді.

Цифрлық егіздің практикалық іске асырылуының мысалы ретінде мұнай өңдеу өндірісінің цифрлық егізіне біріктірілген флюид-катализикалық крекингтің гибриді физика-деректерге негізделген моделі қарастырылып, оның болжау дәлдігінің артуы және экстраполяция жағдайларында тұрақтылығы көрсетіледі.

Кілтті сөздер: цифрлық егіз, интеллектуалды құбыр, киберфизикалық автоматтандыру, өндірістік IoT, SCADA/GIS интеграциясы, актив тұтастығы, ақауды ерте анықтау, болжамды қызмет көрсету.

Кіріспе

Мұнай мен газды өндіру, өңдеу және тұтыну аймақтары көбіне географиялық тұрғыдан алшақ орналасқандықтан, магистральдық құбыр жүйелері әлемдік энергетикалық инфрақұрылымның «қан тамыры» ретінде қарастырылады. Құбыр көлігі жоғары өткізу қабілетімен, үздіксіз жұмыс режимімен және салыстырмалы төмен тасымал құнымен ерекшеленгенімен, оның қауіпсіздігі мен экологиялық жауапкершілігіне қойылатын талаптар тұрақты түрде күшейіп келеді. Қысымның ауытқуы, гидравликалық соққылар, коррозия, үшінші тарап әсері, геологиялық қауіптер (жер көшкіні, шөгу, сейсмикалық ықпал), сондай-ақ адам факторы мен киберқауіпсіздік тәуекелдері құбыр жүйесін басқаруды күрделі киберфизикалық міндетке айналдырады. Сондықтан құбыр инфрақұрылымын тиімді әрі сенімді пайдалану үшін бақылау–талдау–болжау–басқару контурларын цифрлық технологиялар арқылы қайта құру жаһандық деңгейде өзекті бағыт болып отыр [1; 2; 3].

Соңғы жиырма жылда көптеген елдердегі ірі құбыр операторлары «дәстүрлі құбырды басқарудан» «цифрлық құбырға» көшу траекториясын қалыптастырды. Бұл кезеңде ақпараттық технологияларға сүйенген өндірістік басқару құралдары кеңінен енгізілді: SCADA жүйелері арқылы

өлшеу-гораптарынан деректер жинау, GIS арқылы трасса мен активтердің кеңістіктік моделін жүргізу, қашықтан зондтау және мониторинг (спутниктік деректер, аэрофото/дрон түсірілімдері), телемеханика, сондай-ақ құжаттаманы цифрландыру және активтің өмірлік циклі бойынша деректер қорын қалыптастыру. Нәтижесінде жобалау мен құрылыс кезеңіндегі «цифрлық із» (digital thread) күшейіп, пайдаланудағы негізгі көрсеткіштер (қысым, шығын, температура, компрессорлық агрегаттардың режимдері, апаттық қорғаныс жүйелерінің күйі және т.б.) бойынша көрінімділік артты. Операциялық жоспарлау, авариялық әрекет ету, тәуекелді басқару және техникалық қызмет көрсету үдерістері біртіндеп регламенттеліп, басқару моделі тәжірибеге ғана сүйенетін «экстенсивті» тәсілден деректермен негізделген «жүйелі/нақтылаушы» (elaborative) тәсілге ығыса бастады.

Дегенмен цифрлық құбырдың қалыптасуы құбыр жүйесінің барлық мәселесін толық шешіп берді деу қиын. Қазіргі операциялық тәжірибеде жиі байқалатын бірқатар жүйелік түйткілдер сақталады.

Біріншіден, деректердің жүйелер арасында шашыраңқы орналасуы және «ақпараттық бөгеттер» (data silos) мәселесі. Көп ұйымдарда SCADA, GIS, EAM/CMMS (активтерді басқару және жөндеу жүйелері), өндірістік лабораториялық жүйелер, инспекция нәтижелері, геотехникалық бақылау, мердігерлік есептер және жобалық құжаттар әртүрлі форматта, әртүрлі стандартпен жүргізіледі. Бұл интероперабельділікті төмендетіп, бизнес-процестердің бірізділігіне нұқсан келтіреді: бір дерек әр жүйеде әрқалай түсіндіріліп, бірыңғай «ақиқат нүктесін» (single source of truth) құру қиындайды.

Екіншіден, деректер көлемінің өсуі әрдайым құндылықтың өсуіне әкелмейді. Жинақталған үлкен деректердің (historian, журналдар, инспекция нәтижелері, датчиктер ағыны) едәуір бөлігі терең аналитикаға айналмай, есеп беру немесе «қоймада сақтау» деңгейінде қалып қояды. Нақты шешім қабылдау кезінде көптеген талдау әрекеттері әлі де мамандардың тәжірибесіне, субъективті пайымына және қолмен салыстыруға тәуелді болуы мүмкін. Бұл күрделі жүйеде тәуекелді бағалау дәлдігін шектейді және жасырын ақауларды ерте кезеңде анықтауды қиындатады.

Үшіншіден, тікелей өлшенбейтін немесе толық бақыланбайтын күй айнымалылары бойынша сенімді болжау мен бағалау әдістері жеткіліксіз болуы ықтимал. Мысалы, ішкі коррозия қарқыны, шөгінді түзілуі, жабынның деградациясы, нақты ағып кетудің ерте белгілері, топырақ қозғалысының құбырға беретін әсері сияқты құбылыстарды «нақты уақыттағы өлшеммен» толық қамту әрдайым мүмкін емес. Осындай жетіспейтін ақпарат кей жағдайда апаттардың түпкі себептерінің бірі болады, өйткені қауіпті процесс ерте сатысында байқалмай қалады.

Төртіншіден, модельдеу мен симуляция құбыр операциясын басқаруда маңызды инженерлік құрал болғанымен, модельдердің дәлдігі мен калибрлеу сапасы көптеген факторға тәуелді. Гидравликалық және термиялық модельдер үшін бастапқы параметрлердің дәлдігі, шекаралық шарттардың тұрақтылығы, өлшеу қателіктері, трасса ерекшелігі, жабдықтың нақты күйі сияқты мәселелер шешілмесе, симуляция нәтижелері шешім қабылдауды жеткілікті деңгейде қолдай алмайды. Дәлдігі төмен модель оптимизация мен сценарийлік талдаудың қолданбалы әсерін шектейді.

Бесіншіден, автоматтандыру деңгейі толық емес болғандықтан, күрделі басқару міндеттерінің бір бөлігі диспетчерлердің қолмен басқаруына сүйеніп қалады. Бұл әсіресе күрделі режимдерде, көп учаскелі желілерде, газ тасымалдаудағы тұтыну графигі өзгергенде, авариялық жағдайларда немесе шектеулер (қысым лимиттері, компрессорлық станция қуаты, қауіпсіздік регламенттері) қатаң болғанда байқалады. Қолмен басқару адам факторын күшейтіп, реакция уақытын ұзартады және шешімдердің тұрақтылығына әсер етуі мүмкін.

Осы аталған түйткілдер құбыр инфрақұрылымын басқаруда ақпарат пен автоматтандырудың (IT/OT) терең интеграциясын қажет етеді. Яғни мақсат – тек цифрландыру емес, нақты уақыт деректерін, физикалық модельдерді, тәуекелді бағалау әдістерін және басқару алгоритмдерін біртұтас киберфизикалық контурға біріктіру.

Осы жаһандық тренд аясында «интеллектуалды құбыр» ұғымы қалыптасты. Интеллектуалды құбыр – бұл датчиктерден бастап басқару деңгейіне дейінгі барлық қабаттарда деректердің сапасы, модельдердің адекваттылығы және басқару әрекеттерінің үйлесімділігі қамтамасыз етілетін жүйе. Мұндай жүйеде цифрлық егіз (Digital Twin) технологиясы негізгі қозғаушы тетік ретінде қарастырылады. Цифрлық егіз физикалық құбырдың сандық бейнесін ғана емес, оның жұмыс режимін сипаттайтын көпдеңгейлі модельдер кешенін (гидравлика/жылуалмасу, жабдық күйі, сенімділік, қауіп-қатер, геокеңістіктік факторлар), сондай-ақ нақты уақыт деректерімен үздіксіз синхрондалатын талдау-есептеу механизмдерін қамтиды. Нәтижесінде «бақылау → модельдеу → болжау → оптимизация → басқару» циклі тұйық контур ретінде жұмыс істеп, активтің өмірлік циклі бойында (жобалау–құрылыс–пайдалану–жаңғырту) тиімді шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді [4; 5; 6].

Материалдар мен әдістері

Мұнай-газ құбыр жүйесіндегі цифрлық егіздің мәні

Цифрлық егіз ұғымы мұнай-газ құбыр инфрақұрылымында тек «3D-модель» немесе «деректер панелі» ретінде ғана түсіндірілмейді. Ол –

құбыр желісінің физикалық активтерімен (құбыр, арматура, компрессорлық/сорғы станциялары, өлшеу тораптары, қорғаныс жүйелері) тұрақты байланыста болатын, нақты уақыт деректеріне сүйеніп жаңартылатын және инженерлік шешім қабылдауды автоматтандыруға бағытталған киберфизикалық жүйе. Яғни цифрлық егіздің негізгі құндылығы – «өлшеу → түсіндіру → болжау → оптимизация → басқару» тізбегін бір ортада біріктіріп, басқарудың сапасын арттыруында [7; 8].

Құбыр жүйесінің цифрлық егізі – виртуалды кеңістікте құрылған, физикалық объектімен дәл сәйкестендірілген және оның мінез-құлқын (режимдерін, динамикасын, шектеулерін) қайталай алатын сандық модельдер жиынтығы. Ол эксплуатация барысындағы өлшеу деректерімен (SCADA/IoT), технологиялық регламенттермен, геокеңістіктік ақпаратпен (GIS), жабдық паспорттарымен және техникалық қызмет көрсету тарихымен үздіксіз толықтырылып отырады. Мұндай тәсіл құбыр жүйесінің ағымдағы күйін бақылауды ғана емес, алдағы өзгерістерді алдын ала бағалауды және басқару әрекеттерін негіздеуді қамтамасыз етеді.

Цифрлық егіздің мәнін ашатын төрт базалық белгі бар.

1) Дәл сәйкестендіру (precise mapping).

Физикалық құбыр жүйесінің әрбір маңызды элементі цифрлық ортада «бірімәнді» көрсетілуі тиіс: құбыр учаскелері мен диаметрлері, материал сипаттары, гидравликалық кедергілер, жапқыш арматураның орналасуы, компрессор/сорғы агрегаттарының параметрлері, өлшеу құралдарының қателік диапазоңдары, қорғаныс құрылғыларының логикасы және т.б. Мұндағы мақсат – әртүрлі дереккөздерден келетін ақпараттың (датчик, есеп, инспекция, жөндеу журналы) бір активке дұрыс байланысуын қамтамасыз ету және модель мен деректің тұтастығын сақтау. Егер сәйкестендіру дәл болмаса, мониторингтің сенімділігі төмендеп, болжау нәтижелері де қате бағытқа кетеді.

2) Мінез-құлықтың сәйкестігі (behavioral consistency).

Цифрлық егіз тек статикалық сипаттамалармен шектелмей, құбыр жүйесінің динамикалық жүрісін шынайы көрсетуі керек. Бұл жерде көпфизикалық және көпмасштабты модельдер маңызды рөл атқарады: гидравлика (қысым-шығын қатынастары, транзиттік құбылыстар), жылуалмасу, газдың сығымталылығы, компрессорлық станциялардың жұмыс карталары, сондай-ақ сенімділік және тәуекел модельдері. Қажет болған жағдайда егіз «оқиғаға әсерді» де модельдейді: ағып кету ықтималдығы, апаттық режимдердің таралуы, шектеулердің орындалуы, операциялық сценарийлердің қауіпсіздігі. Яғни цифрлық егіз құбырдың «қазір қалай жұмыс істеп тұрғанын» ғана емес, «неге бұлай болып жатырын» және «ертең не болуы мүмкін екенін» дәлелдеуге жақындайды.

3) Өмірлік цикл бойымен бірге дамуы (co-evolution).

Құбыр желісі уақыт өте өзгереді: жаңа учаскелер қосылады, режимдер ауысады, жабдық тозады, жөндеу жүргізіледі, датчиктер жаңартылады, регламенттер түзетіледі. Цифрлық егіз осы өзгерістердің барлығын «цифрлық із» ретінде қабылдап, модельдерді қайта калибрлеп, өзектендіріп отыруы қажет. Демек егіз – бір рет жасалып, кейін «қатып қалатын» жоба емес; ол активпен бірге өмір сүретін және ақпараттық деңгейі тұрақты өсетін жүйе. Бұл талап әсіресе киберфизикалық автоматтандыру логикасына сай: физикалық ортадағы өзгеріс цифрлық ортада кешікпей көрініс табуы керек.

4) Жабдық циклі оңтайландыру және өзін-өзі жетілдіру (closed-loop optimization).

Цифрлық егіздің ең маңызды айырмашылығы – ол деректерді жинап көрсетумен ғана шектелмейді, шешім қабылдау контурын күшейтеді. Нақты уақыт деректері арқылы күй бағаланады, модельдермен салыстыру арқылы ауытқу себептері ізделеді, тәуекел мен тиімділік критерийлері бойынша ұсыныстар есептеледі, әрі қарай басқару жүйесіне (диспетчерлік шешім, APS/оптимизация, автоматты реттеу) ықпал етеді. Уақыт өте келе модель дәлдігі жақсарып, басқару стратегиялары нақтыланып, құбыр желісінің жұмыс істеуі «нақты әрі интеллектуалды» деңгейге жақындайды. Бұл – өндірістік киберфизикалық жүйелердің негізгі қағидасы: кері байланысқа негізделген үздіксіз жетілдіру.

Осы төрт белгі цифрлық егізді «цифрландыру құралынан» жоғары деңгейге көтеріп, оны құбыр инфрақұрылымын интеллектуалдандырудың өзегіне айналдырады [9].

Ұзақ мерзімді мақсат

Қазіргі таңда цифрлық егізге қатысты салалық түсінік әрқелкі: бір жерде ол тек 3D-визуализация ретінде қабылданса, басқа жерде ол операциялық аналитика, симуляция және басқару алгоритмдері біріктірілген толық киберфизикалық платформа ретінде қарастырылады. Мұндай айырмашылықтар технологияның жаңалығымен ғана емес, ұйымдардың дерек мәдениеті, капиталдық инвестиция мүмкіндігі, кадрлық құзыреттері, сондай-ақ ИТ/ОТ интеграциясының жетілу деңгейімен байланысты. Сондықтан мұнай-газ құбыр саласында цифрлық егіздің ұзақ мерзімді мақсатын нақты тұжырымдау маңызды: бұл ортақ түсінікті қалыптастырып, жобаларды «жеке-жеке автоматтандырудан» жүйелік трансформацияға бағыттайды.

Ұзақ мерзімді мақсат ретінде әлемдік практикаға сәйкес келетін ең дұрыс бағдар – интеллектуалды құбыр экожүйесін құру. Мұнда «экожүйе» дегеніміз: деректер, модельдер, бизнес-процестер және басқару функциялары бір архитектурада біріктіріліп, қатысушылар арасында (оператор, сервистік

ұйым, жобалаушы, инспекция, қауіпсіздік қызметі, реттеуші талаптар) ақпарат алмасу тиімді ұйымдастырылған орта. Бұл мақсатқа жетудің түйінді шарты – кеңейтілген интеграция (extensive integration), яғни бірнеше деңгейдегі біріктіруді қатар дамыту: деректерді интеграциялау, модельдерді интеграциялау, технологияларды интеграциялау, ақпарат пен автоматтандыруды интеграциялау.

Осы ұзақ мерзімді мақсаттың практикалық нәтижесі – құбыр желісін басқаруда жаңа сапа деңгейін қалыптастыру: қауіпсіздік пен сенімділіктің өсуі, энергия шығынының азаюы, жоспардан тыс тоқтаулардың қысқаруы, экологиялық тәуекелдің төмендеуі, сондай-ақ әртүрлі ұйымдар мен бөлімдер арасында деректерді қайта-қайта сұратпай-ақ, ортақ ортада қолдану арқылы операциялық тиімділіктің артуы. Ең маңыздысы – цифрлық егіз тек «технология» болып қалмай, ақпарат, технология және бизнес арасындағы байланыстарды қайта құратын басқару философиясына айналады.

Мұнай-газ құбыр жүйесіндегі цифрлық егіздің қолданылуын жоспарлау

Цифрлық егіз сияқты күрделі технология өз құндылығын тек нақты қолдану жағдайларында (application scenario) толық ашады. Егер технология нақты бизнес-мәселені шешуге «байланбаса», ол қағаз жүзіндегі концепция немесе демонстрациялық модель деңгейінде қалып қоюы мүмкін. Сондықтан мұнай-газ құбыр жүйесіне арналған цифрлық егіздің анықтамасы мен ұзақ мерзімді мақсаты айқындалғаннан кейін, келесі қадам – оның құбыр бизнесіндегі тірек рөлін (supporting role) нақтылау: қандай өндірістік міндеттерді қолдайды, қандай деректер мен модельдер қажет, қандай есептеулер жүргізіледі және нәтиже қандай басқарушылық әрекетке айналады.

Қолдану сценарийлері қаңқасы

Мұнай-газ құбыры – бір ғана құрылғы емес, кеңістікте созылған күрделі желілік жүйе. Оның жұмысында гидравликалық динамика, жылуалмасу, материалдың шаршауы, коррозиялық процестер, геологиялық тәуекелдер, жабдықтың сенімділігі, адам-машина өзара әрекеті және киберқауіпсіздік бір уақытта әсер етеді. Сол себепті «бір егіз – бір модель – бір есеп» логикасы жеткіліксіз. Практикалық енгіздеу цифрлық егіз нақты міндеттерге бөлініп, әр міндет бойынша қажет дерек, модель және есептеу пакеті анықталады. Бұл тәсіл үш нәтиже береді:

1. бизнеске нақты әсері бар қолдану нүктелері таңдалады;
2. есептеу ресурсы мақсатты жұмсалады (толық байланысқан аса ауыр модельде бірден құруға ұмтылмай);
3. енгізу кезең-кезеңімен жүріп, жүйе масштабталатын архитектураға сүйенеді.



1-сурет – Мұнай және газ құбырының цифрлық егіз жүйесінің қолдану сценарийі

Сценарийлердің иерархиясы және негізгі бағыттар

Құбыр операторының күнделікті қызметі жоспарлау, орталықтандырылған реттеу (dispatching), өндірістік операциялар, аварияларды жою, жедел жөндеу жоспарлары және активтерді басқару (asset management) сияқты жұмыс түрлерінен тұрады. Осындай өндірістік талдау нәтижесінде практикада көптеген (ондаған/жүздеген) нақты талаптар пайда болады. Оларды жүйелеудің тиімді жолы – талаптарды қайта құрастыру, нақтылау және деңгейлеу арқылы бірінші деңгейлі (first-level) және екінші деңгейлі (second-level) қолдану сценарийлеріне бөлу.

Бірінші деңгейлі сценарий – бизнес тұрғысынан ірі функциялық блок: ол бірнеше екінші деңгейлі сценарийлерді қамтып, кеңірек дерек пен модельдерді талап етеді және есептеу-талдау көлемі ауқымды болады. Екінші деңгейлі сценарий – нақты инженерлік міндет (мысалы, коррозия даму қарқынын болжау немесе катодтық қорғаныс схемасын бағалау) және ол бірінші деңгейлі сценарийдің «құраушы модулі» ретінде жұмыс істейді.



2-сурет – Табиғи газ құбырының ағып кетуінен кейінгі апаттық жағдай

Модульдеу принципі және есептеу ресурсын тиімді пайдалану

Жеке өнімнің цифрлық егізімен салыстырғанда (мысалы, бір компрессор немесе бір клапан), құбыр жүйесінің цифрлық егізі әлдеқайда кең бизнес өрісін қамтиды, модельдік күрделілігі жоғары және деректер өлшемі өте үлкен. Сондықтан «толық байланысқан» (fully coupled) цифрлық егізді бірден құру көбіне есептеу ресурстары тұрғысынан да, енгізу тәуекелі тұрғысынан да тиімсіз. Прагматикалық және масштабталатын тәсіл төмендегідей:

1. Жүйені төрт доменге бөлу (құбыр–ағын–станция–орта);
2. Осы домендердің деректері мен модельдерін цифрлық егіз платформасына жинап, сценарий талаптарына қарай жергілікті талдау/есептеу модульдерін шақыру;
3. Есептеу модульдерінің кеңейтілетіндігі (expansibility), интерактивтілігі және әртүрлі детальдылық деңгейін (granularity) қолдауы: кей сценарийге жоғары өлшемді күрделі модель керек болса, кей жағдайға ықшамдалған төмен өлшемді модель жеткілікті;
4. Алдын ала анықталған ақпарат ағыны бойынша есептеу нәтижелерін бизнес жүйелерге «итеріп шығару» (push data and results): диспетчерлік басқару, жоспарлау, активтерді басқару, қауіпсіздік қызметі сияқты тұтынушыларға қажетті форматта жеткізу;
5. Цифрлық егізді делдал орта (mediation layer) ретінде пайдаланып, әртүрлі сценарийлер арасында дерек–модель–білім–нәтиженің қайта

қолданылуын (reuse) қамтамасыз ету және соңында «құбыр экожүйесі» мақсатына жақындау.

Сценарийлердің өзара байланысы және қауіпсіздік мысалы

Құбыр қауіпсіздігі – барлық жағдайда өзекті, себебі құбырдағы ақау (дефект) тек техникалық шығын емес, адамдарға, мүлікке және қоршаған ортаға әсер ететін тәуекелге айналуы мүмкін. Нақты өндірісте «құбыр зақымдана ма?», «істен шығу қандай салдарға әкеледі?», «қалай және қай жерде жөндеу тиімді?», «ағып кету болса, таралу аймағы қандай?» сияқты сұрақтар басқарушылар үшін ең қиындарының бірі. Бұған қоса, бұл сұрақтар көбіне әртүрлі бөлімдердің жауапкершілігіне бөлінеді (құрылымдық тұтастық, экология, диспетчерлеу, жөндеу, қауіпсіздік), ал бөлімаралық «бизнес-бөгеттер» үйлесімді әрі жедел әрекет етуге кедергі келтіреді.

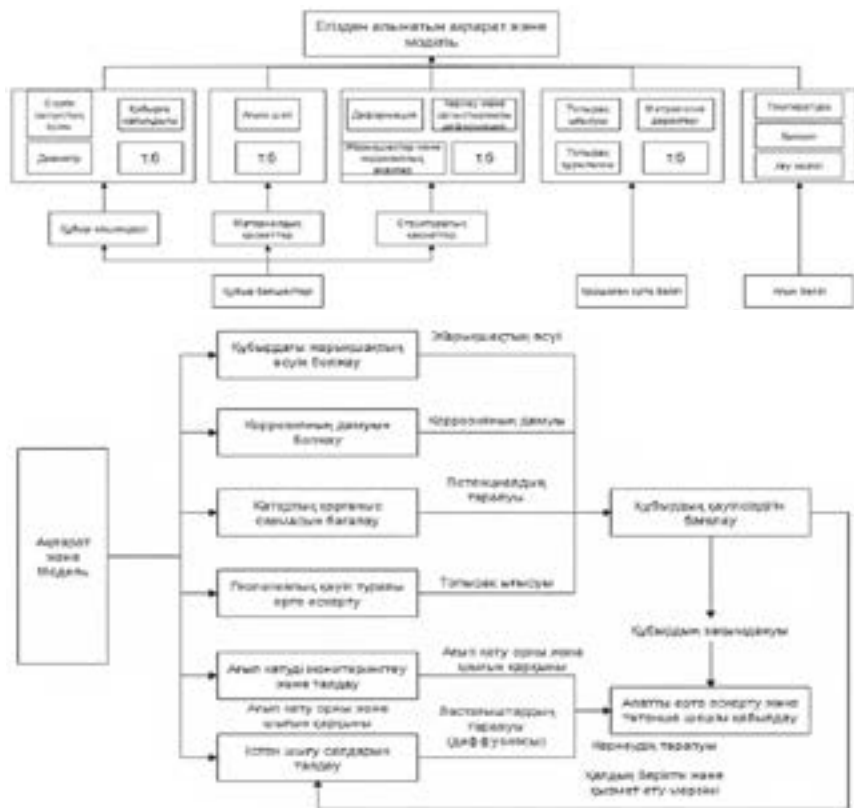
Цифрлық егіздің сценарийлік архитектурасы осындай жағдайда шешуші рөл атқарады. Егер қауіпсіздікке қатысты дерек қалыптан тыс күйді (abnormal) көрсетсе немесе басқарушы команда қолмен триггер жасаса, онда сәйкес бірінші және екінші деңгейлі сценарийлер алдын ала берілген тәртіппен іске қосылып, өзара байланысады. Мысалы, құбыр қауіпсіздігін бағалау контурында цифрлық егіз мынадай есептеулерді үйлесімді біріктіре алады:

- жарықшақ өсу трендін бағалау және уақыт бойынша болжам;
- коррозия дамуының болжамы (ішкі/сыртқы);
- кернеу таралуы және қалдық беріктікті есептеу;
- топырақ ығысуы/геологиялық факторлар әсерін бағалау;
- әлсіз және ең қауіпті учаскені көрсету (weak point identification).

Егер ағып кетуді мониторинг жүйесі (leak detection) нақты орын мен ықтимал шығын мөлшерін анықтаса, цифрлық егіз қосымша түрде:

- ластаушы заттардың таралу аймағын (diffusion range) бағалайды;
- ықтимал жарылыс/өрт әсерінің аймағын (impact area) және жылулық әсерді (heat affected zone) есептейді;
- осы бағалаулар негізінде жедел жөндеу жоспары, эвакуация/оқшаулау шаралары және экологиялық қорғаныс жоспарын қалыптастыруға дерек береді.

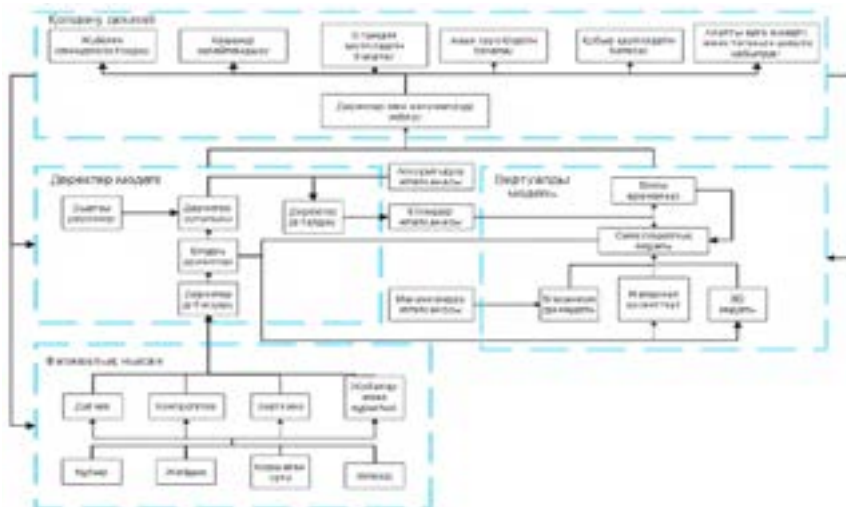
Осылайша цифрлық егіз қауіпсіздік мәселесін «әр бөлім жеке қарайтын» күйден «ортақ дерекке сүйенген интеграцияланған шешім» күйіне ауыстырады.



3-сурет – Қолданбалы сценарий корреляциясының мысалы

Қолдану парадигмасы

Цифрлық егізді бір ғана пәндік технология деп қарастыру дұрыс емес. Ол – симуляция, өндірістік IoT, деректерді беру инфрақұрылымы, үлкен деректер аналитикасы, визуализация, білімдер базасы (knowledge network) және алгоритмдік кітапханаларды біріктіретін кешенді технологиялық жүйе. Мұнай-газ құбыр жүйесінде бұл кешен міндетті түрде көпсалалы түйісуді талап етеді: механика/беріктік, коррозия инженериясы, гидравлика, автоматика және басқару, IT/OT интеграциясы, киберқауіпсіздік, тәуекел-инжиниринг [10;11;12].



4-сурет – Мұнай және газ құбыры жүйесіне арналған цифрлық егіздің қолданбалы парадигмасы

Практикалық енгізуді басқару үшін қолдану парадигмасын «**екі ұш және екі өзек**» (two ends & two cores) қағидасымен түсіндіруге болады:

Екі ұш (ends):

1. Физикалық ұш (Entity): нақты құбыр, жабдық, орта және олармен байланысты өлшеу/басқару құралдары (датчиктер, контроллерлер), лабораториялық бақылау, жобалау-құрылыс деректері.

2. Қолданба ұшы (Application): сенімділік талдауы, кешенді оптимизация, станция/ағын/құбыр қауіпсіздігі, апатты ескерту және төтенше шешім қабылдау сияқты бизнес-қызметтер.

Екі өзек (cores):

3. Деректер моделі (Data model core): сыртқы және ішкі деректерді жинау, деректер орталығы, деректерді талдау, егіз деректері (twin data), деректерді басқару/сапа (data governance), білімдер мен алгоритмдер кітапханасы.

4. Виртуалды модель (Virtual model core): механизмдік модельдер, материал қасиеттері, 3D-модельдер, симуляциялық модельдер, ережелер мен білімге негізделген логика (knowledge rules).

Бұл архитектурада «деректер моделі» мен «виртуалды модель» бір-бірінен тәуелсіз емес, керісінше өзара біріктірілген және тұйық контурда жұмыс істейді. Ең маңыздысы – цифрлық егіздің «нағыз өміршендігі» (real

vitality) көбіне **пайдалану (operation)** кезеңінде байқалады, өйткені дәл осы уақытта нақты өндірістік деректер үздіксіз келіп, модельдер тұрақты калибрленіп, басқару шешімдері күн сайын қабылданады.

Қолдану парадигмасының негізгі қызметтік мақсатын бірнеше логикалық механизм арқылы нақтылауға болады:

1. Өндірістік деректер арқылы модель параметрлерін түзету (calibration): нақты операциялық дерек симуляция моделіндегі негізгі параметрлерді нақтылайды; бұл модель дәлдігін кезең-кезеңімен арттырады.

2. AI/Big Data нәтижелерін виртуалды модельмен тексеру (verification/validation): деректерге негізделген модельдер (ML) кейде корреляцияны себеп-салдар ретінде қате түсіндіруі мүмкін; механизмдік/симуляциялық модель бұл нәтижелерді инженерлік тұрғыдан тексеруге көмектеседі.

3. Білім ережелері арқылы басқаруды қолдау: механизмдік модель толық емес немесе белгісіз аймақтарда үлкен деректер мен AI қалыптастырған knowledge rules басқару шешімін бағыттайды.

4. Дерек аз кезде симуляция арқылы дерек кеңейту (data augmentation): сирек кездесетін авариялық режимдер немесе әлі болмаған сценарийлер виртуалды модельде имитацияланып, деректер ауқымы кеңейеді; бұл қауіпсіздік талдауын да, оқыту деректерін де күшейтеді.

Нәтижесінде цифрлық егіз жүйесі құбыр инфрақұрылымына қатысты «жоғары дәлдікті виртуалды модельді» және «қолдануға жарамды, сенімді аналитиканы» бір уақытта қамтамасыз ететін киберфизикалық платформаға айналады. Бұл сіздің мамандығыңыз тұрғысынан (жоғары технологиялық өндірістерді киберфизикалық автоматтандыру) классикалық CPS қағидасына дәл келеді: физикалық процесс пен цифрлық есептеу қабаты үздіксіз синхрондалып, басқарудың сапасы тұйық контурда жақсарып отырады.

Нәтижелер және талқылау

ФКК моделдеу проблематикасы және гибридтендіру тұжырымдамасы

Флюид-каталитикалық крекинг (ФКК) мұнайды екіншілік өңдеудің орталық процесі болып табылады және вакуумдық газойльдерден жоғары октанды бензиннің 40–55 % шығымын қамтамасыз етеді. Процесті математикалық сипаттау құбылыстардың көпмасштабтылығына байланысты күрделене түседі: цеолиттің микрокеуектеріндегі көмірсутектердің диффузиясынан (кеуек өлшемі 0,74 нм, диффузия уақыты $\sim 10^{-6}$ с) бастап диаметрі 8–12 м реактордағы катализатор циркуляциясына дейін (болу уақыты 2–4 с). Негізгі физика-химиялық аспектілерге мыналар жатады [13; 14]:

– Карбкатиондық кинетика: USY цеолитінің қышқыл орталықтарында олефиндердің протондануы, одан кейін β -ығысу, изомерлену және циклдену

реакциялары. Элементарлық сатылардың активация энергиялары 80 кДж/моль (изомерлену) мен 150 кДж/моль (ароматтану) аралығында өзгереді.

– Бәсекелес адсорбция: молекулалардың полярлығы мен өлшеміне тәуелді адсорбция коэффициенттері бар Ленгмюр изотермасымен сипатталады.

$$\theta_i = \frac{K_i C_i}{1 + \sum_{j=1}^N K_j C_j}, \quad K_i = K_i^0 \exp\left(-\frac{\Delta H_{ads,i}}{RT}\right)$$

– Катализатордың дезактивациясы: кокстану (қайтымды дезактивация) мен металдармен улану (қайтымсыз дезактивация) әсерлерінің біріктірілген ықпалы.

$$\frac{da_c}{dt} = -k_{rev} a_c C_{coke} - k_{irrev} (a_c - a_{\infty})$$

Классикалық модельдер іргелі компромисты көрсетеді: детальды кинетикалық схемалар (40–60 псевдокомпонент) 200–500 параметрді сәйкестендіруді талап етеді және нақты уақыт режимінде қолдануға жарамсыз; ал эмпирикалық корреляциялар экстраполяциялау қабілетінің шектеулілігімен сипатталады. Гибридтік архитектуралар бұл компромисты модельді құрылымы тұрақты физикалық негізге және бейімделгіш нейрожелілік компонентке декомпозициялау арқылы еңсереді.

«Құрылымдық кинетика + нейрожелілік түзету» гибридтік моделінің архитектурасы

Гибридтік модель келесідей түрде формалданады:

$$\frac{dc_g}{dt} = R_{struct}(c_g, T, a_c; k_0) + \Delta R_{NN}(z_{op}, z_{feed}; \theta)$$

мұнда бірінші қосылғыш құрылымдалған кинетикалық модельді, ал екіншісі – нейрожелілік түзетуді білдіреді [15].

Құрылымдық кинетикалық ішкі модель химиялық класы мен қайнау температурасы интервалдары бойынша топтастырылған 15 псевдокомпоненттен тұратын реакциялық желіге негізделген:

1-кесте

Класс	Псевдокомпоненттер	Қайнау диапазоны, °C	Реакция саны
Жеңіл парафиндер	nP1-nP3	<95	8
Ауыр парафиндер	nP4-nP6	95-221	12
Изопарафиндер	iP1-iP3	95-221	6
Олефиндер	O1-O3	<221	7
Нафтендар	N1-N2	95-350	8
Ароматты	A1-A3	95-350	7

Псевдокомпоненттің $i \rightarrow j$ ауысуына арналған реакция жылдамдығы r_{ij} Ленгмюр–Хиншельвудтың модификацияланған теңдеуімен сипатталады:

$$r_{ij} = \frac{k_{ij}^0 \exp(-E_{a,ij}/RT) a_c^{\alpha_{ij}} C_1}{(1 + \sum_{m=1}^{15} K_m C_m)^{\beta_{ij}}}$$

Негізгі параметрлер k_{ij}^0 және $-E_{a,ij}$ **Unisim** бағдарламалық ортасында жүргізілген зертханалық сынақтардың деректері бойынша анықталған.

Нейрожелілік түзету градиент ағынын тұрақтандыру үшін қалдық байланыстары (ResNet) бар толық байланысқан желі түрінде жүзеге асырылған:

$$h^{(l+1)} = h^{(l)} + \text{Dropout}_{0,1}(GELU(W^{(l)} h^{(l)} + b^{(l)})), \quad l = 0, \dots, 5$$

Архитектурасы: 20 кіріс (8 операциялық параметр + шикізаттың 12 сипаттамасы) $\rightarrow 256 \rightarrow 256 \rightarrow 512 \rightarrow 512 \rightarrow 256 \rightarrow 256 \rightarrow 15$ шығыс (псевдокомпоненттердің түзілу жылдамдықтарына енгізілетін түзетулер). Параметрлердің жалпы саны: 684 431.

Термодинамикалық үйлесімділікті қамтамасыз ету үшін шығындар функциясына физикалық шектеулер енгізілген:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{total} + \lambda_C \left\| \sum_i v_{C,i} \Delta R_{NN,i} \right\|^2 + \lambda_H \left\| \sum_i v_{H,i} \Delta R_{NN,i} \right\|^2 \\ + \lambda_E \left\| \sum_i \Delta R_{NN,i} \Delta H_{f,i} \right\|^2 \end{aligned}$$

мұнда $v_{C,i}$ и $v_{H,i}$ – көміртек пен сутегінің стехиометриялық коэффициенттері, $\Delta H_{f,i}$ – түзілу жылуы. Коэффициенттер: $\lambda_C = 10^3, \lambda_H = 10^3, \lambda_E = 10^2$

Оқыту екі кезеңде жүргізіледі:

- (1) 50 000 синтетикалық режимде алдын ала оқыту;
- (2) өнеркәсіптік деректер негізінде жіңішке баптау.

Гидродинамиканы көпмасштабты сипаттау және онлайн-бейімдеу

Псевдосұйытылған қабаттың гидродинамикасы 8 осьтік аймақтан тұратын аймақтық (зоналық) модель арқылы сипатталады.

Катализатор сипаттамаларының дрейфі жағдайында дәлдікті сақтау үшін кеңейтілген күйі бар кеңейтілген Калман сүзгісіне (ККС) негізделген онлайн-бейімдеу сызбасы іске асырылған:

$$x_{aug} = [c_g^T, a_c, C_{coke}, k_{adapt}^T]^T \in \mathbb{R}^{25}$$

мұнда k_{adapt} ең сезімтал 8 кинетикалық параметрді қамтиды. Процесс шуының $Q(t)$ және өлшеу шуының $R(t)$ ковариациялық матрицалары 6

сағаттық үйлеспеушілік тарихын талдайтын LSTM рекурренттік желісі арқылы бейімделеді:

$$[vec(Q), vec(R)] = MLP(LSTM_{64}([e(t - \Delta t), \dots, e(t - 24\Delta t)]))$$

Үйлеспеушілік шегі асқан жағдайда ($\|e(t)\|_2 > 3\sigma_e$) артық үйренуді болдырмау үшін шағын қадаммен ($\eta = 10^{-5}$) импульс әдісі арқылы салмақтар онлайн түрде қосымша оқытылады.

Верификация нәтижелеріне сәйкес, таза физикалық модель (түзетусіз): бензин үшін MAE = 1,95 масс. %; таза эмпирикалық модель: MAE = 1,68 масс.%, алайда шикізат ауысқан кезде экстраполяция қателігі > 4 масс. % құрайды. Ал гибридітік модель экстраполяция кезінде де дәлдігін сақтайды (қате < 1,5 масс. %).

Сонымен қатар, гибридітік модель мұнай өңдеу зауытының цифрлық егізіне біріктірілген және өнім сапасын 95 % сенімділік интервалымен болжауға мүмкіндік береді (стационарлық режимдерде бензин үшін $\pm 1,8$ масс.%), фракциялардың ағымдағы бағаларын ескере отырып, маржиналдылық критерийі бойынша жұмыс режимін оңтайландыруды жүзеге асырады. Бұдан бөлек, дезактивация тренді негізінде катализатордың қалдық ресурсын болжауға мүмкіндік береді.

Физикалық шектеулері бар «құрылымдық кинетика + нейрожелілік түзету» гибридітік архитектурасы физикалық модельдердің дәлдігі, есептеу тиімділігі және пайдалану шарттарының өзгеруіне бейімделгіштік арасындағы бірегей теңгерімді қамтамасыз етеді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің гранты (грант № AP23489120) есебінен қолдау тапты.

Қорытынды

Цифрлық егіз (Digital Twin) технологиясы әртүрлі салаларда ғылыми-зерттеу және қолданбалы жобалардың қарқынды дамуына серпін берген маңызды бағыттардың бірі болып табылады. Мұнай-газ құбыр жүйелері контекстінде цифрлық егіздің негізгі құндылығы – деректер мен модельдерді жобалау–құрылыс–пайдалану өмірлік циклі бойында біріктіру арқылы қауіпсіздік, сенімділік және операциялық тиімділікті басқарудың жана деңгейіне көтерілу мүмкіндігінде. Алайда цифрлық егізді енгізу тек жекелеген жүйелерді цифрландырумен немесе визуализациямен шектелмей, IT/OT интеграциясына негізделген кешенді киберфизикалық трансформацияны талап етеді.

Осы зерттеу аясында күрделі өнеркәсіптік жүйелерге арналған цифрлық егізді қолданудың құрылымдалған парадигмасы ұсынылды. Ұсынылған тәсіл физикалық тұрғыдан интерпретацияланатын модельдер мен машиналық

оқыту әдістерін біртұтас киберфизикалық контурда біріктіруге негізделген. Әдістің практикалық іске асырылуы флюид-каталитикалық крекинг процесінің гибриді моделі мысалында көрсетіліп, болжау қателігінің төмендеуімен қатар, шикізат құрамы мен пайдалану режимдері өзгерген жағдайларда модельдің тұрақтылығы қамтамасыз етілді.

Алынған нәтижелер гибриді архитектуралардың таза физикалық және таза эмпирикалық модельдерге тән шектеулерді еңсеруге мүмкіндік беретінін және оларды мұнай-газ және химия өнеркәсібіндегі жоғары өлшемді, сызықтық емес технологиялық процестерге арналған цифрлық егіздердің перспективасы негізі ретінде қарастыруға болатынын дәлелдейді. Сонымен қатар, цифрлық егізді өнеркәсіптік деңгейде кеңінен енгізу деректер сапасын басқару, модельдерді калибрлеу мен валидациялау, есептеу архитектураларын жетілдіру және стандарттау бағыттарында жүйелі ғылыми-әдістемелік жұмысты талап ететіні көрсетілді.

REFERENCES

- 1 **Glaessgen E., Stargel D.** The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles [C] // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – 2012. – Paper AIAA 2012-1818. – <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- 2 **Grieves M., Vickers J.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [M] // In: Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer. – 2016. – P. 85-113. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- 3 **Uhlemann T. H. J., Lehmann C., Steinhilper R.** The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 [J] // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 61. – P. 335–340. – <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>.
- 4 **Boschert S., Rosen R.** Digital Twin—The Simulation Aspect [M] // In: Hehenberger P., Bradley D. (eds.) Mechatronic Futures. Cham: Springer. – 2016. – P. 59–74. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5.
- 5 **Tao F., Zhang M., Liu Y.** Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing [J] // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 20418–20427. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069.
- 6 **Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C.** Digital Twin in Industry: State-of-the-Art [J] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15(4). – P. 2405–2415. – <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.

7 **Rasheed A., San O., Kvamsdal T.** Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective. IEEE Access. – 2020. – Vol. – P. 21980–22012. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>

8 **Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B.** Characterising the Digital Twin: A systematic literature review [J] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. –2020. –Vol. 29(A). –P. 36–52. – <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.

9 **Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C.** Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research [J] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.

10 **Meza E. B. M., Souza D. G. B., Copetti A., Sobral A. P. B., Silva G. V., Tammela I., Cardoso R.** Tools, Technologies and Frameworks for Digital Twins in the Oil and Gas Industry: An In-Depth Analysis [J] // Sensors. – 2024. – 24(19). –Article 6457. – <https://doi.org/10.3390/s24196457>.

11 **Bo L., Gai J., Xue X.** The Digital Twin of Oil and Gas Pipeline System [J] // IFAC-PapersOnLine. –2020. – Vol. 53(5). – P. 710–714. – <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.162>.

12 **Wang T., Feng K., Ling J., et al.** Pipeline condition monitoring towards digital twin system: A case study [J] // Journal of Manufacturing Systems. –2024. – Vol. 73. – P. 256–274. – <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.006>.

13 **Weekman V. W., Nace D. M.** Kinetic modeling of fluid catalytic cracking. AIChE Journal. – 1970. – Vol. 16(3). – P. 397–404. – <https://doi.org/10.1002/aic.690160308>

14 **Gao Z., Li C., Yang Y., et al.** Hybrid modeling and optimization of fluid catalytic cracking process based on first-principles and data-driven methods. Chemical Engineering Research and Design. – 2020. – Vol. 160. – P. 505–519. – <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.06.020>

15 **Kadlec P., Gabrys B., Strandt S.** Data-driven soft sensors in the process industry. Computers & Chemical Engineering. – 2009. – Vol. 33(4). – P. 795–814. – <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.12.012>

01.04.26 ж. баспаға түсті.

14.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

22.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Г. А. Ускенбаева^{1,}, Ә. Қ. Сыдық², А. К. Шукирова³,*

С. Е. Тасанбаев⁴, К. С. Кульниязова⁵

^{1,2,3,4,5}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 01.04.26.

Поступило с исправлениями 14.04.26.

Принято в печать 22.05.26.

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СЛОЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В последние десятилетия компании, управляющие мировой нефтегазовой трубопроводной инфраструктурой, последовательно формируют стратегию перехода от уровня «цифрового трубопровода» к концепции «интеллектуального трубопровода» (smart/intelligent pipeline). Данная трансформация ускоряется в условиях развития Industry 4.0, киберфизических систем (CPS), промышленного интернета вещей, облачных вычислений, аналитики больших данных и глубокой интеграции искусственного интеллекта в производственную среду. В результате в процессах проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводных сетей ключевыми целями становятся управление на основе данных, мониторинг активов на протяжении всего жизненного цикла, раннее прогнозирование рисков и повышение операционной эффективности.

В контексте этих глобальных изменений технология цифрового двойника (Digital Twin) утвердилась как один из ключевых «усиливающих» (enabling) механизмов формирования интеллектуального трубопровода. Цифровой двойник представляет собой систему цифровых моделей, находящихся в непрерывной связи с реальными физическими объектами трубопровода и объединяющих данные о его состоянии в режиме реального времени с вычислительными моделями в виртуальной среде.

В данной статье подробно анализируется роль цифрового двойника в интеллектуализации нефтегазовых трубопроводных сетей, представлены его определение, долгосрочные цели, парадигма применения и основные направления будущих исследовательских и практических работ. Обосновано, что эффективность цифрового двойника в значительной степени определяется полнотой и достоверностью данных, точностью описания физических процессов в моделях, качеством межсистемной интеграции и корректным построением автоматизированного контура принятия управленческих решений.

В качестве примера практической реализации цифрового двойника рассмотрена гибридная физико-данных модель флюид-каталитического крекинга, интегрированная в цифровой двойник нефтеперерабатывающего производства, демонстрирующая повышение точности прогнозирования и устойчивость при экстраполяции.

Ключевые слова: цифровой двойник, интеллектуальный трубопровод, киберфизическая автоматизация, промышленный IoT, интеграция SCADA/GIS, целостность активов, раннее обнаружение дефектов, прогнозное обслуживание.

G. A. Uskenbayeva^{1,*}, A. Q. Sydyk², A. K. Shukirova³,

S. Ye. Tassanbayev⁴, K. S. Kulniyazova⁵

^{1,2,3,4,5}L. N. Gumilyov Eurasian National University,

Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 01.04.26.

Received in revised form 14.04.26.

Accepted for publication 22.05.26.

FORMATION OF A DIGITAL TWIN OF COMPLEX INDUSTRIAL ASSETS BASED ON HYBRID MODELING METHODS

Over the past decade, companies managing the global oil and gas pipeline infrastructure have consistently developed strategies to transition from the “digital pipeline” level to the concept of the “intelligent pipeline” (smart/intelligent pipeline). This transformation has been significantly accelerated by the advancement of Industry 4.0, cyber-physical systems (CPS), industrial Internet of Things (IIoT), cloud computing, big data analytics, and the deep integration of artificial intelligence into industrial environments. As a result, data-driven management, full life-cycle asset monitoring, proactive risk prediction, and enhanced operational efficiency have become key objectives in the design, construction, and operation of pipeline networks.

Within the context of these global changes, Digital Twin technology has emerged as one of the most important enabling mechanisms for the development of intelligent pipelines. A digital twin represents a system of digital models continuously connected with real physical pipeline assets, integrating real-time condition data with computational models in a virtual environment.

This paper provides a detailed analysis of the role of digital twins in the intellectualization of oil and gas pipeline networks, presenting their definition, long-term objectives, application paradigm, and key directions for future research and practical implementation. It is demonstrated that the effectiveness of digital twins largely depends on data completeness and reliability, the accuracy of physical process representation in models, the quality of system integration, and the proper design of an automated decision-making control loop.

As a practical implementation example of a digital twin, a hybrid physics- and data-driven model of fluid catalytic cracking is considered, integrated into the digital twin of an oil refining process, demonstrating improved prediction accuracy and robustness under extrapolation conditions.

Keywords: digital twin, intelligent pipeline, cyber-physical automation, industrial IoT, SCADA/GIS integration, asset integrity, early fault detection, predictive maintenance.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

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

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

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

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz