

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-27-40>

УДК 622.2

СТРАТЕГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ РУЙНУВАННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН НА ОСНОВІ СИСТЕМ ІНЖЕНЕРНОГО МОНІТОРИНГУ

Данилюк Н.Я.

STRATEGIC APPROACHES TO REDUCE THE RISKS OF DRILL STRIKE FAILURE BASED ON ENGINEERING MONITORING SYSTEMS

Danyliuk N.Y.

У сучасній нафтогазовій промисловості питання підвищення довговічності бурильних установок є ключовим для забезпечення ефективності та економічної доцільності видобутку ресурсів. Діяльність у жорстких умовах експлуатації призводить до інтенсивного зношення обладнання, що обумовлює необхідність застосування новітніх технологій для його захисту. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є впровадження BIM-технологій (Building Information Modeling), які сприяють покращенню управління життєвим циклом обладнання, оптимізації процесів технічного обслуговування та прогнозуванню зносу. У статті проведено комплексний аналіз впливу корозійних середовищ на матеріали бурильних установок, визначено основні чинники, що призводять до деградації конструктивних елементів, та розглянуто сучасні методи їх захисту. Зокрема, увага приділена використанню антикорозійних покриттів, модифікованих матеріалів і катодного захисту. Крім того, розглянуто можливості застосування BIM-технологій для моніторингу стану бурильного обладнання в реальному часі, що дозволяє своєчасно виявляти дефекти, мінімізувати ризики аварій та збільшувати експлуатаційний ресурс установок. Дослідження показало, що інтеграція BIM-моделей з методами прогнозовної аналітики та системами технічного обслуговування дозволяє значно зменшити витрати на ремонт і простої обладнання. Це, у свою чергу, забезпечує підвищення загальної ефективності нафтогазових підприємств та сприяє їх стійкому розвитку. Автори підкреслюють важливість подальших досліджень у сфері цифрового моделювання для підвищення довговічності бурильних установок та розробки нових стандартів управління технічним станом

обладнання. Результати роботи можуть бути корисними для інженерів, які займаються проектуванням і експлуатацією бурильного обладнання, а також для науковців, що досліджують перспективні методи захисту матеріалів у нафтогазовій галузі. Подальші дослідження у цьому напрямку мають потенціал значно покращити надійність обладнання та знизити операційні витрати, що є критично важливим фактором для енергетичної безпеки та економічної стабільності галузі.

Ключові слова: ризики руйнування; інженерний моніторинг; оптимізація буріння; технології прогнозування; інтернет речей (IoT); безпека бурових операцій.

Вступ. Нафтогазова промисловість висуває високі вимоги до надійності бурильного обладнання, зокрема бурильних колон. Руйнування колон може спричинити серйозні технічні, екологічні та економічні наслідки. Основними причинами пошкоджень є механічні навантаження, корозія, ерозія та втомне руйнування. Інженерний моніторинг відіграє важливу роль у ранньому виявленні дефектів та подовженні строку експлуатації бурильних колон. У сучасних умовах, коли технологічний розвиток відіграє ключову роль у нафтогазовій промисловості, стратегічне впровадження цифрових інструментів моніторингу дозволяє суттєво покращити надійність і безпеку бурових операцій. Впровадження таких підходів дозволяє не лише підвищити ефективність

використання обладнання, а й зменшити витрати на ремонт і заміну пошкоджених колон.

Дане дослідження розглядає стратегічні підходи до зменшення ризиків руйнування шляхом застосування сучасних методів моніторингу та цифрових технологій. Зокрема, акцент робиться на використанні сенсорних технологій, цифрових двійників та методів штучного інтелекту для прогнозування можливих відмов і продовження строку служби бурильних колон.

Мета та завдання статті. Метою дослідження є розробка стратегічних підходів до зниження ризиків руйнування бурильних колон шляхом впровадження сучасних методів інженерного моніторингу та цифрових технологій. Це дозволить забезпечити підвищення надійності бурильного обладнання, мінімізувати аварійні ситуації та покращити ефективність бурових процесів. Для досягнення цієї мети дослідження передбачає комплексний аналіз основних факторів, що спричиняють руйнування бурильних колон, зокрема вплив механічних навантажень, корозії, втомних процесів і геологічних умов. Вивчення традиційних і сучасних методів інженерного моніторингу сприятиме визначенню оптимальних підходів до прогнозування і запобігання відмовам бурильних колон.

У рамках дослідження буде проведено оцінку можливостей цифрових технологій, таких як цифрові двійники, IoT-системи, BIM-моделювання та методи машинного навчання, для створення інтегрованих систем моніторингу. Це дасть змогу вчасно виявляти критичні зміни в технічному стані колон і розробляти ефективні заходи зниження ризиків. Запропоновані стратегічні підходи включатимуть рекомендації щодо використання інноваційних матеріалів, оптимізації режимів буріння та вдосконалення методів контролю стану бурильних колон, що сприятиме підвищенню їхньої довговічності та зниженню експлуатаційних витрат.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблематика зниження ризиків руйнування бурильних колон є актуальною в контексті підвищення ефективності та безпеки буріння. У науковій літературі цій темі приділено значну увагу, зокрема через інтеграцію систем інженерного моніторингу.

Дослідження Семенченка А.І. акцентують на формалізації стратегічного планування для забезпечення безпеки технологічних процесів. Автор пропонує комплексний підхід до оцінки

ризиків, який може бути адаптований для моніторингу бурильних колон. Водночас у роботах Внукової Н.М. та співавторів розглядається ризик-орієнтована система, що включає оцінку та контроль ризиків для зниження ймовірності аварій. Ці принципи застосовні до буріння, де своєчасне виявлення дефектів є критичним.

Аналіз причин аварій бурильних труб, представлений у джерелі, підкреслює важливість діагностики матеріальних і технологічних факторів. Дослідження ІФНТУНГ вказують на втому металу та гідравлічні впливи як ключові причини руйнувань. Для їх запобігання пропонується впровадження систем реального часу, що узгоджується з концепцією інженерного моніторингу.

У працях, опублікованих на платформі URAN, наголошується на необхідності інтеграції даних із сенсорів для прогнозування аварій. Це підтверджує доцільність використання IoT-технологій у системах моніторингу. Крім того, дослідження SIPRI акцентують на глобальних ризиках, включаючи технологічні, що підкреслює важливість стратегічного підходу до управління безпекою.

Незважаючи на значний прогрес, у літературі недостатньо уваги приділено адаптації систем моніторингу до специфічних умов буріння, зокрема в екстремальних геологічних середовищах. Це визначає перспективу подальших досліджень, спрямованих на створення гнучких стратегій зниження ризиків.

Виклад основного матеріалу. Основні причини руйнування бурильних колон

Руйнування бурильних колон є однією з найсерйозніших проблем у бурових роботах, оскільки їхня цілісність безпосередньо впливає на ефективність буріння, безпеку персоналу та економічні витрати. Вивчення механізмів і факторів, що спричиняють пошкодження бурильних колон, є критично важливим для розробки стратегічних підходів до їхнього моніторингу та захисту. Основні причини руйнування бурильних колон можна поділити на чотири ключові групи: механічні навантаження, втомні процеси, корозійний вплив і геологічні фактори [1].

Механічні навантаження. Бурильні колони піддаються значним механічним навантаженням під час бурових робіт, що призводить до їх поступового зношування та руйнування. Осьові

та радіальні навантаження створюють напружено-деформований стан, що сприяє утворенню тріщин і втраті міцності матеріалу. Динамічні та ударні навантаження, особливо при бурінні в складних геологічних умовах, є основними чинниками руйнування бурильних колон [2].

Бурильні колони піддаються значним механічним навантаженням під час виконання бурових операцій [3]. До основних видів навантажень належать (табл. 1):

а) осеве навантаження (стиснення та розтягнення) – виникає внаслідок ваги колонни та глибини буріння. Надмірне стиснення може спричинити втрату стійкості труб, тоді як розтягнення призводить до пластичних деформацій і мікротріщин.

б) крутий момент – діє внаслідок обертального руху колони, особливо у жорстких геологічних умовах. При перевищенні критичних значень крутного моменту можливе виникнення скручування або розриву труб.

Таблиця 1

Основні механічні навантаження на бурильні колони [3]

Вид навантаження	Опис	Наслідки
Осьове навантаження (стиснення та розтягнення)	Виникає внаслідок ваги колони та глибини буріння	Пластичні деформації, мікротріщини, втрата стійкості труб
Крутий момент	Вплив обертального руху колони, особливо у складних геологічних умовах	Скручування, розрив труб
Поперечні згинальні навантаження	Виникають через відхилення свердловини та нерівномірний розподіл навантаження	Локальні напруження, прискорене руйнування матеріалу
Динамічні навантаження та ударні хвилі	Виникають при зміні швидкості буріння, бурінні в жорстких породах	Структурне пошкодження, швидке зношування

в) поперечні згинальні навантаження – з'являються через відхилення свердловини та нерівномірний розподіл навантаження. Наявність бокових сил спричиняє локальні напруження, що прискорюють процес руйнування матеріалу.

г) динамічні навантаження та ударні хвилі – виникають при зміні швидкості буріння, роботи в умовах жорстких порід, а також при зустрічі з несподіваними геологічними аномаліями.

Втомні процеси. Циклічні навантаження, які виникають у процесі буріння, викликають накопичення мікрodefектів у матеріалі колон. Це призводить до втомного руйнування, що особливо небезпечно в місцях концентрації напружень, таких як різьбові з'єднання або зони зварних швів. Втомне пошкодження може залишатися непомітним протягом тривалого часу, однак раптовий вихід з ладу бурильної колони може спричинити серйозні аварії [3].

Механічна втома є однією з головних причин поступового руйнування бурильних колон. Під впливом багатократних циклів навантажень матеріал бурильних труб зазнає мікроструктурних змін, що призводять до накопичення пошкоджень та утворення тріщин [4]. Основні механізми втомного руйнування включають (табл. 2):

а) виснаження матеріалу внаслідок багаторазових змін напружень – під час обертання та роботи у викривлених свердловинах відбуваються повторювані цикли навантаження, які значно знижують міцність металу.

б) зосередження напружень у місцях конструктивних дефектів – різьбові з'єднання, зони зварювання та мікрodefекти стають точками ініціації тріщин.

Таблиця 2

Втомні процеси в бурильних колонах [4]

Фактор	Механізм впливу	Наслідки
Багаторазові цикли навантажень	Постійне повторення навантажень у викривлених свердловинах	Виснаження матеріалу, накопичення пошкоджень
Концентрація напружень	Виникає в різьбових з'єднаннях, зонах зварювання	Формування мікротріщин, втомне руйнування
Температурні коливання	Перепади температур через зміну глибини буріння	Термічне розширення, додаткові напруження

в) вплив температурних коливань – унаслідок зміни глибини та умов буріння температура в матеріалі може змінюватися, що сприяє термічному розширенню та додатковим напруженням.

Корозійний вплив. Бурильні колони експлуатуються в агресивних середовищах, де наявність сірководню (H_2S) та інших корозійних агентів спричиняє хімічне та електрохімічне руйнування матеріалу. Корозія значно знижує міцність колон і може спричинити їх передчасне руйнування. Використання антикорозійних покриттів та спеціальних сплавів може частково зменшити цей ризик [3].

Корозія бурильних колон є одним із найнебезпечніших факторів, оскільки вона не тільки послаблює матеріал, але й може викликати катастрофічне руйнування [4]. Основні типи корозійного впливу включають (табл. 3):

а) загальна електрохімічна корозія – виникає через контактування металу з агресивними середовищами (солена вода, кислоти, сірководень). Висока вологість та температура сприяють інтенсифікації процесу.

б) корозійна втома – поєднання корозійного середовища з циклічними навантаженнями прискорює процес тріщиноутворення.

в) сульфідно-стресова корозія (SSC) – особливо небезпечна у зонах, де присутній сірководень (H_2S), що призводить до розриву металу через внутрішні напруження.

Таблиця 3

Корозійний вплив на бурильні колони [4]

Тип корозії	Причини	Наслідки
Загальна електрохімічна корозія	Вплив агресивних середовищ (солена вода, H_2S)	Ослаблення матеріалу, зниження міцності
Корозійна втома	Поєднання корозії з циклічними навантаженнями	Швидке тріщиноутворення, зниження ресурсу
Сульфідно-стресова корозія (SSC)	Вплив сірководню (H_2S)	Катастрофічне розривання труб
Пітингова корозія	Локальні хімічні атаки на поверхню металу	Утворення глибоких точкових пошкоджень

г) пітингова корозія – локальні ділянки металу зазнають агресивного впливу, утворюючи глибокі ямки, які можуть стати точками початку руйнування.

Геологічні фактори. Геологічні умови буріння також суттєво впливають на стан бурильних колон. Взаємодія з твердими породами спричиняє абразивний знос, а місцеві перегріви, що виникають унаслідок тертя, можуть знижувати міцність матеріалу. Крім того, неоднорідність гірських порід може викликати нерівномірний розподіл навантажень по всій довжині колони.

Фізико-механічні характеристики порід відіграють важливу роль у довговічності бурильних колон [4]. Основні проблеми, пов'язані з геологічними факторами (табл. 4):

а) абразивний знос – твердокристалічні включення (кварц, пірит) спричиняють швидке стирання зовнішньої поверхні труб.

б) диференціальний тиск – значний перепад тиску між стінками свердловини та внутрішнім простором колони може викликати механічну деформацію.

в) геодинамічні процеси – зсуви пластів, землетруси, зміни тектонічної напруженості можуть спричинити непередбачувані напруження в колоні.

Таблиця 4

Вплив геологічних факторів на бурильні колони [4]

Геологічний фактор	Прояв	Наслідки
Абразивний знос	Вплив твердокристалічних включень (кварц, пірит)	Швидке стирання зовнішньої поверхні труб
Диференціальний тиск	Значний перепад тиску між стінками свердловини та внутрішнім простором колони	Механічна деформація, втрата міцності
Геодинамічні процеси	Зсуви пластів, землетруси, зміни напруженості	Непередбачувані напруження в колоні

Аналіз основних причин руйнування бурильних колон свідчить про необхідність комплексного підходу до їхнього захисту [4]. Поєднання сучасних методів інженерного моніторингу, використання високоякісних

матеріалів та впровадження цифрових технологій дозволить значно підвищити довговічність колон, зменшити ризики аварій та оптимізувати експлуатаційні витрати [5].

Методи інженерного моніторингу для оцінки стану бурових колон

Забезпечення надійності бурових колон є одним із ключових завдань у буровій практиці. Для мінімізації ризиків руйнування необхідно здійснювати постійний моніторинг їхнього стану. Ефективний інженерний моніторинг базується на застосуванні як традиційних методів діагностики, так і сучасних цифрових технологій. Комплексний підхід до оцінки стану бурових колон дозволяє не лише своєчасно виявляти дефекти, а й прогнозувати потенційні ризики, що дає змогу значно підвищити безпеку та економічну ефективність бурових операцій [6].

До традиційних методів оцінки стану бурових колон належать візуальний огляд, неруйнівний контроль та аналіз експлуатаційних характеристик (рис. 1).

Візуальний огляд є найпростішим способом діагностики, що здійснюється шляхом перевірки механічних пошкоджень, корозійного зношення та тріщин. Однак цей метод має суттєві обмеження, оскільки не дозволяє виявляти приховані дефекти [8].

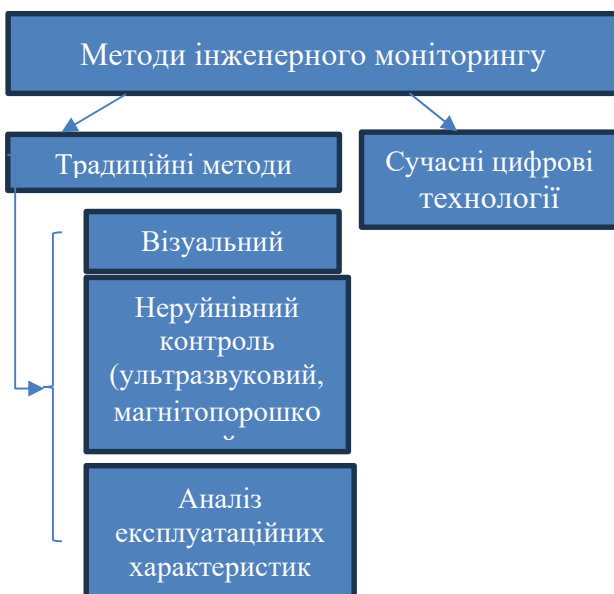


Рис. 1. Загальна схема методів інженерного моніторингу [6], [7]

Неруйнівний контроль (NDT) включає використання ультразвукової дефектоскопії,

магнітопорошкового та рентгенографічного методів (рис. 2).

а) ультразвуковий контроль дозволяє виявляти тріщини, зони корозійного ураження та локальні дефекти матеріалу.

б) магнітопорошковий метод ефективний для виявлення поверхневих та підповерхневих тріщин у феромагнітних матеріалах.

в) рентгенографія дає змогу отримати зображення внутрішньої структури колон, що є особливо важливим для контролю якості зварних з'єднань.



Рис. 2. Схема неруйнівного контролю (NDT) [7]

Аналіз експлуатаційних характеристик включає контроль крутного моменту, осьових навантажень та амплітуди вібрацій під час буріння. Ці показники допомагають оцінити загальний стан конструкції та виявити потенційні ознаки руйнування на ранніх стадіях (рис. 3).

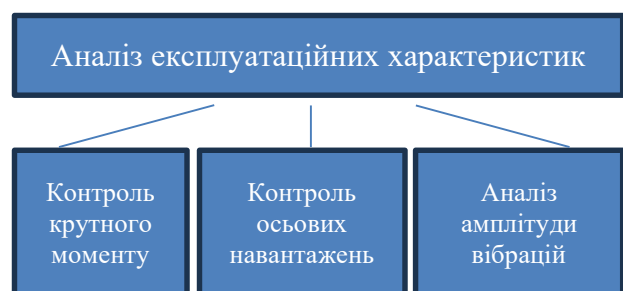


Рис. 3. Аналіз експлуатаційних характеристик [8]

Традиційні методи контролю, хоч і широко застосовуються, мають низку обмежень, пов'язаних із людським фактором, високими затратами часу та недостатньою чутливістю до мікродефектів. У зв'язку з цим сучасні цифрові технології набувають дедалі більшого значення у сфері інженерного моніторингу [8].

Сучасні цифрові технології (BIM, IoT, машинне навчання)

Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для діагностики та прогнозування стану бурильних колон. Найперспективнішими напрямками є використання інформаційного моделювання будівель (BIM), інтернету речей (IoT) та алгоритмів машинного навчання [9].

BIM-технології у моніторингу бурильних колон

Інформаційне моделювання будівель (BIM) використовується для створення цифрових двійників бурильних колон. Такі моделі містять детальну інформацію про матеріальні характеристики, навантаження, історію експлуатації та можливі дефекти. Використання BIM дозволяє (рис. 4):

- а) візуалізувати напружено-деформований стан колон;
- б) інтегрувати дані з датчиків у режимі реального часу;
- в) моделювати сценарії розвитку пошкоджень та прогнозувати залишковий ресурс конструкцій.

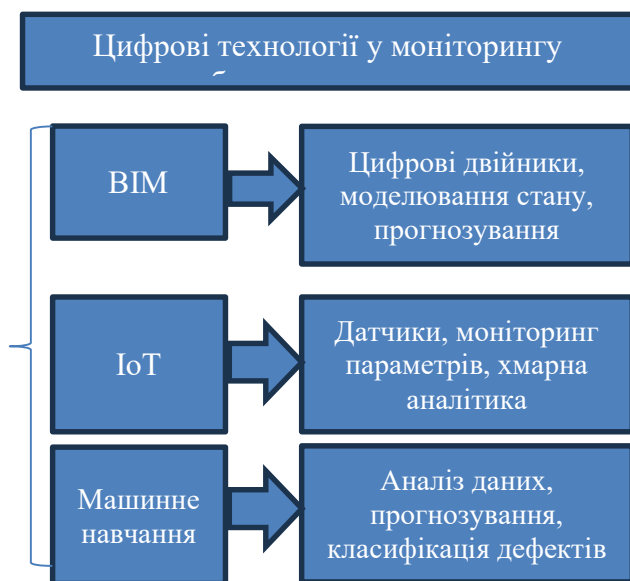


Рис. 4. Загальна схема цифрових технологій у моніторингу бурильних колон [9]

IoT та сенсорні системи

Інтернет речей відіграє важливу роль у сучасному моніторингу бурильних колон. Завдяки інтеграції датчиків, встановлених уздовж конструкції, можна здійснювати постійний контроль ключових параметрів [9]:

- 1) зміни вібраційного стану;
- 2) температурних градієнтів;
- 3) рівня зношення матеріалу;
- 4) параметрів навантаження.

Отримані дані передаються до хмарних серверів, де здійснюється їх обробка та аналіз у реальному часі. Це дозволяє своєчасно виявляти аномалії та оперативно реагувати на загрозу руйнування [9].

Детальніше про ці технології, їх функції та ключові переваги описано у таблиці 5.

Таблиця 5

Функціональні можливості машинних технологій [9]

Технологія	Основні функції	Ключові переваги
BIM	Візуалізація стану, інтеграція даних, прогнозування ресурсу	Детальне моделювання, історія експлуатації, аналіз напружень
IoT	Контроль вібрацій, температури, зношення, навантажень	Постійний моніторинг, миттєва реакція, хмарний аналіз
Машинне навчання	Аналіз закономірностей, класифікація дефектів, прогнозування виходу з ладу	Автоматизація, висока точність, попередження аварій

Алгоритми машинного навчання у прогнозуванні дефектів.

Машинне навчання дозволяє автоматизувати аналіз великих масивів даних, отриманих у процесі експлуатації бурильних колон [10]. Алгоритми на основі нейронних мереж та методів глибокого навчання здатні [11]:

- 1) розпізнавати закономірності у поведінці конструкцій під навантаженням [12];
- 2) класифікувати дефекти за рівнем небезпеки [12];

3) прогнозувати час до повного виходу з ладу колон [12].

Застосування цифрових технологій значно підвищує точність моніторингу та забезпечує можливість проактивного управління технічним станом бурового обладнання [13].

Комплексні системи моніторингу

Комбінація традиційних методів контролю та сучасних цифрових технологій формує основу комплексних систем моніторингу бурових колон [14]. Такі системи мають низку переваг (табл. 6):

а) поєднання фізичних і цифрових методів діагностики, що дозволяє отримувати максимально повну картину стану колон.

б) використання великих даних та штучного інтелекту для оперативного аналізу й прийняття рішень.

в) можливість дистанційного моніторингу, що забезпечує контроль у реальному часі без необхідності проведення дороговартісних перевірок на місці.

Таблиця 6

Порівняння традиційних та цифрових методів моніторингу [14]

Метод моніторингу	Опис	Переваги	Недоліки
Традиційні методи (візуальний контроль, ультразвук, діагностика, механічні вимірювання)	Використання перевірених фізичних методів для оцінки стану колон	Висока точність локальних вимірювань, доступність	Вимагає ручного проведення перевірок, не забезпечує постійного моніторингу
Цифрові технології (BIM, IoT, машинне навчання)	Інтеграція датчиків, цифрових двійників та аналітики великих даних	Автоматизований моніторинг у реальному часі, прогнозування дефектів	Висока початкова вартість впровадження
Комплексні системи (поєднання традиційних і цифрових підходів)	Аналіз у реальному часі на основі історичних та сенсорних даних	Найбільш повна картина стану колон, можливість дистанційного моніторингу	Необхідність адаптації до конкретних умов експлуатації

Однією з перспективних моделей комплексного моніторингу є система цифрового двійника бурової колоні, що об'єднує дані з датчиків, результати комп'ютерного моделювання та історичні дані експлуатації.

Такий підхід дозволяє не лише оцінювати поточний стан обладнання, але й прогнозувати можливі сценарії розвитку дефектів, що дає змогу запобігати аварійним ситуаціям [15].

Таким чином, розвиток методів інженерного моніторингу бурових колон забезпечує підвищення ефективності бурових робіт, зниження витрат на технічне обслуговування та мінімізацію ризиків руйнування обладнання. Впровадження сучасних цифрових технологій у поєднанні з традиційними методами контролю є ключовим напрямом підвищення безпеки та довговічності бурових колон у сучасній нафтогазовій промисловості [16].

Стратегічні підходи до зменшення ризиків

Забезпечення довговічності бурових колон є одним із ключових аспектів безпечного та ефективного проведення бурових робіт. Високі механічні навантаження, агресивне середовище та складні технологічні умови експлуатації створюють значні ризики передчасного виходу з ладу бурового обладнання. Для мінімізації цих ризиків застосовуються комплексні стратегічні підходи, що поєднують методи проактивного моніторингу, використання інноваційних матеріалів, оптимізацію режимів буріння та впровадження цифрових технологій [17].

Проактивний моніторинг. Традиційні підходи до контролю технічного стану бурових колон здебільшого зводяться до періодичних перевірок та діагностичних заходів після виявлення дефектів. Однак такий підхід не завжди дозволяє своєчасно реагувати на початкові стадії деградації матеріалу. Проактивний моніторинг передбачає безперервний контроль критичних параметрів бурових колон у режимі реального часу, що дозволяє не лише виявляти наявні дефекти, а й прогнозувати їх розвиток [18].

Сучасні сенсорні системи забезпечують контроль напружено-деформованого стану колон шляхом аналізу наступних параметрів [19]:

а) рівня осьових і крутних навантажень;

б) амплітуди та частоти вібрацій;

в) змін у геометрії колоні під впливом навантажень;

г) локальної температури та корозійної активності.

Детальніше про аналіз параметрів напружено-деформованого стану колон наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Основні параметри моніторингу бурильних колон [18]

Параметр	Опис	Метод контролю
Осьові та крутні навантаження	Визначають рівень механічного впливу на колону	Сенсорні системи, тензодатчики
Вібрації (амплітуда, частота)	Контроль резонансних коливань, що сприяють руйнуванню	Акселерометри, датчики вібрацій
Зміни у геометрії	Деформації під впливом навантажень	Лазерні сканери, оптичні датчики
Локальна температура	Вплив перегріву на матеріал	Тепловізори, термопари
Корозійна активність	Оцінка рівня корозії	Електрохімічні сенсори, аналіз хімічного складу

Використання бездротових сенсорів та технологій інтернету речей (IoT) дозволяє інтегрувати дані моніторингу у хмарні платформи для автоматизованого аналізу та побудови прогнозних моделей. Зокрема, застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання забезпечує оцінку залишкового ресурсу колон на основі багатфакторного аналізу експлуатаційних умов.

Впровадження інноваційних матеріалів. Матеріал бурильної колони визначає її довговічність та стійкість до впливу агресивних факторів. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ресурсу колон є використання високоміцних сплавів, що володіють підвищеною міцністю та стійкістю до корозійного та механічного зношування [19].

Серед інноваційних матеріалів, що знаходять застосування у бурових системах, можна виділити [18]:

а) високоміцні маловуглецеві сталі, модифіковані елементами, що підвищують їхню корозійну та втомну стійкість (Cr, Mo, Ni, V).

б) композитні покриття, що формують додатковий бар'єр від корозії та механічного зношування (нанокерамічні, карбідні, алюмінієві).

в) біметалеві конструкції, що поєднують міцність сталевого осердя з корозійною стійкістю зовнішнього шару.

г) наноструктуровані сплави, що демонструють підвищену зносостійкість завдяки унікальній мікроструктурі.

Інноваційні матеріали, що знаходять застосування у бурових системах, а також їх переваги та недоліки наведені у таблиці 8, а демонстрація збільшення довговічності бурильних колон при застосування цих інноваційних матеріалів наведена на рисунку 5.

Таблиця 8

Порівняння традиційних та інноваційних матеріалів для бурильних колон [18]

Матеріал	Переваги	Недоліки
Високоміцні маловуглецеві сталі	Висока механічна міцність, стійкість до втоми	Потребує додаткового захисту від корозії
Композитні покриття	Захист від корозії та зношування, легка вага	Висока вартість нанесення
Біметалеві конструкції	Поєднання міцності сталі та стійкості до корозії	Складність виробництва
Наноструктуровані сплави	Покращена зносостійкість, висока довговічність	Висока собівартість, обмежене застосування

Використання інноваційних матеріалів дає змогу збільшити ресурс бурильних колон на 30-50%, що значно скорочує експлуатаційні витрати та ризики аварійних ситуацій [19].

Оптимізація режимів буріння. Режими буріння відіграють ключову роль у зменшенні ризику механічного пошкодження бурильних колон. Основними факторами, що впливають на процес зношування та руйнування колон, є [18]:

а) величина осьового навантаження, що визначає рівень контактного напруження між колоною та стінками свердловини.

б) швидкість обертання, що впливає на динамічні навантаження та рівень вібрацій.

в) гідравлічний режим, що визначає ефективність видалення шламу та рівень ерозійного впливу бурового розчину.

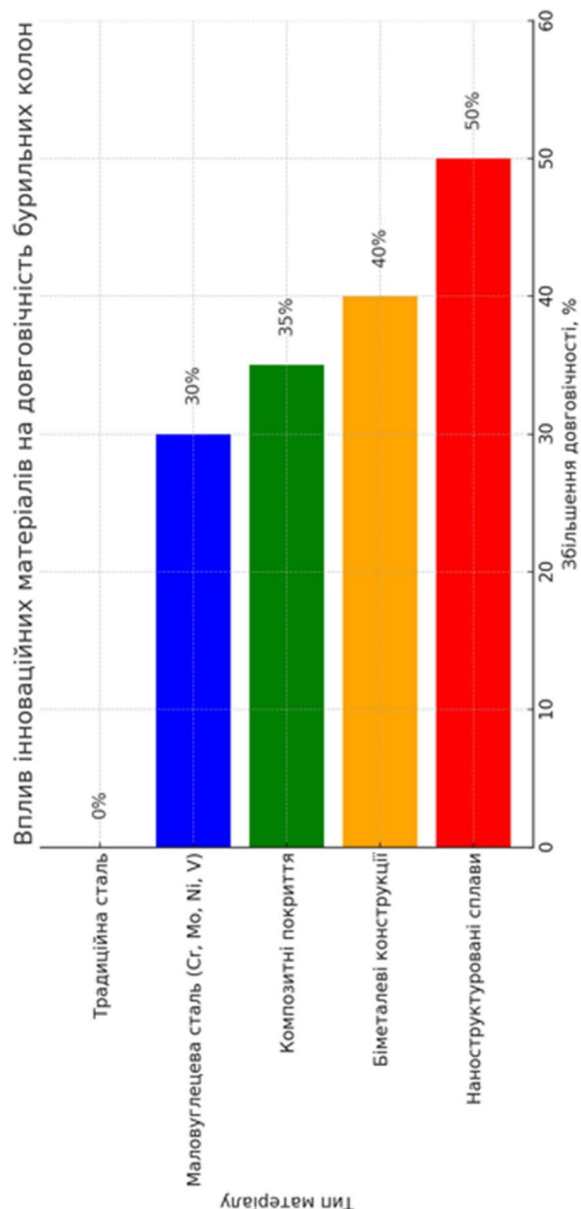


Рис. 5. Графік, який демонструє збільшення довговічності бурильних колон при застосуванні інноваційних матеріалів (з даного графіка можна помітити, що найкращий ефект дають наноструктуровані сплави, які можуть підвищити ресурс колон до 50%) [18]

Для зниження ризику руйнування колон застосовується адаптивне регулювання навантажень, що базується на аналізі поточних умов буріння [19]. Зокрема, використання автоматизованих систем контролю режимів дозволяє (табл. 9):

а) підтримувати оптимальне співвідношення швидкості обертання та осьового навантаження для мінімізації втомних пошкоджень;

б) динамічно змінювати гідравлічний режим для запобігання ерозійному зношуванню;

в) здійснювати оперативний контроль вібрацій, що дозволяє запобігти утворенню резонансних коливань у колоні.

Таблиця 9

Фактори, що впливають на зношування бурильних колон та методи оптимізації режимів буріння [19]

Фактор	Вплив на колону	Метод оптимізації
Осьове навантаження	Викликає контактне напруження	Адаптивне регулювання навантажень
Швидкість обертання	Викликає динамічні навантаження та вібрації	Контроль оптимальної швидкості
Гідравлічний режим	Впливає на ерозію та ефективність видалення шламу	Динамічне коригування параметрів

Застосування цифрових моделей буріння дозволяє прогнозувати ефекти зміни параметрів у режимі реального часу та оперативно коригувати стратегію буріння для мінімізації навантажень на бурильні колони.

Використання BIM-технологій. Застосування технології інформаційного моделювання будівель (BIM) дозволяє інтегрувати всі дані про бурильні колони у єдину цифрову платформу, що забезпечує комплексний аналіз їхнього стану на всіх етапах життєвого циклу [9].

Основними перевагами використання BIM у процесі експлуатації бурильних колон є (табл. 10):

а) створення цифрових двійників, що відображають напружено-деформований стан колон у режимі реального часу [15,16].

б) моделювання сценаріїв деградації матеріалу, що дозволяє прогнозувати розвиток дефектів на основі історичних даних та експлуатаційних умов.

в) оптимізація технічного обслуговування, що дозволяє мінімізувати витрати на ремонти та запобігати аварійним відмовам.

г) інтеграція з іншими цифровими системами (IoT, штучний інтелект, великі дані), що дозволяє автоматизувати процес прийняття рішень щодо технічного стану колон.

Додатково на рисунку 6 продемонстровано порівняння ефективності традиційного управління ризиками та за допомогою BIM-методики.

Таблиця 10

Використання BIM-технологій у моніторингу бурових колон [9]

Функція BIM	Опис	Переваги
Цифрові двійники	Відображення стану колон у реальному часі	Прогнозування пошкоджень
Моделювання деградації	Аналіз історичних даних для прогнозування дефектів	Зниження аварійних ризиків
Оптимізація обслуговування	Автоматизований аналіз стану колон	Мінімізація витрат
Інтеграція з IoT та AI	Автоматичний контроль стану колон	Підвищення ефективності прийняття рішень

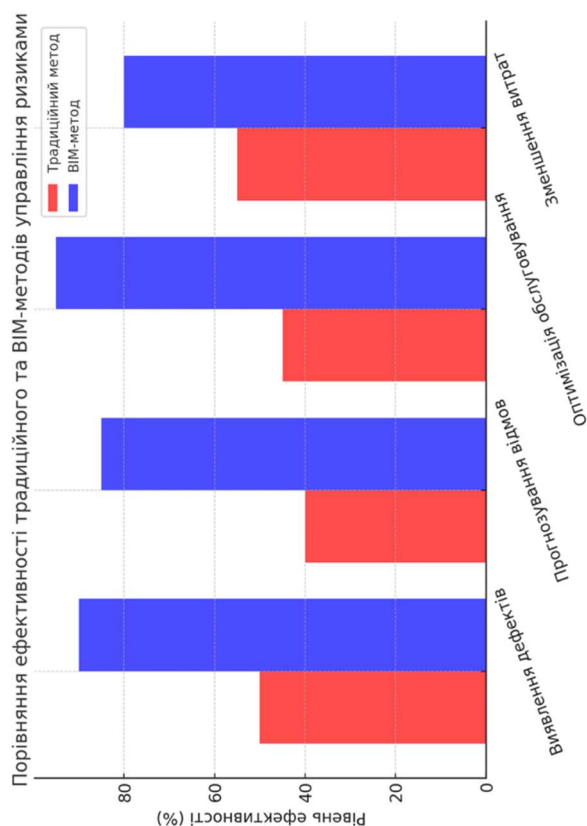


Рис. 6. Графік ефективності традиційного управління ризиками та за допомогою BIM-методики [9]

Застосування BIM-технологій у буровій галузі дозволяє значно підвищити ефективність управління ризиками та забезпечити максимальну надійність бурових колон у складних умовах експлуатації [9].

Комплексний підхід до зниження ризиків виходу з ладу бурових колон базується на впровадженні проактивного моніторингу, використанні інноваційних матеріалів, оптимізації режимів буріння та застосуванні BIM-технологій. Поєднання цих методів дозволяє значно збільшити термін служби колон, підвищити безпеку бурових робіт та зменшити експлуатаційні витрати. Подальший розвиток цифрових технологій, зокрема алгоритмів штучного інтелекту та предиктивної аналітики, відкриває нові можливості для удосконалення систем моніторингу та управління технічним станом бурового обладнання.

Практичні рекомендації для нафтогазової галузі

Ефективне впровадження технологій моніторингу є критично важливим для забезпечення довговічності бурових колон, особливо в умовах інтенсивної експлуатації у глибоких свердловинах з високим тиском і температурою. Одним із перспективних напрямків є використання вбудованих сенсорів та оптоволоконних систем, які дозволяють у режимі реального часу отримувати дані про напружено-деформований стан колон. Зокрема, технологія Distributed Acoustic Sensing (DAS), яка вже успішно використовується на деяких нафтових родовищах у Північному морі, забезпечує безперервний контроль за динамічними навантаженнями, температурними змінами та корозійною активністю вздовж усієї довжини бурової колони. Впровадження таких систем дозволяє оперативно реагувати на критичні зміни, зменшуючи ризик раптових відмов обладнання [20].

Додатково, використання штучного інтелекту та машинного навчання у поєднанні з великими масивами даних, отриманих від IoT-систем, відкриває нові можливості для прогнозного аналізу стану колон. Наприклад, компанія Schlumberger впроваджує алгоритми глибокого навчання для ідентифікації патернів втомного руйнування, що дає змогу передбачати потенційні дефекти за кілька тисяч годин до їхнього критичного розвитку. Подібний підхід забезпечує значне підвищення безпеки бурових операцій і мінімізацію непродуктивного часу,

який може коштувати компаніям сотні тисяч доларів на добу [21].

Оптимізація технічного обслуговування має ґрунтуватися на концепції condition-based maintenance (CBM), що передбачає проведення ремонтних і профілактичних заходів лише за необхідності, а не за жорстко регламентованим графіком [22]. Такий підхід уже демонструє високу ефективність у видобувних компаніях Норвегії та Канади, де впровадження CBM дозволило зменшити кількість аварійних відмов бурильних колон на 35%, а витрати на ремонт – на 25%. Крім того, використання сучасних покриттів, таких як карбід-вольфрамові або керамічні наноструктуровані композити, дозволяє зменшити вплив абразивного зношування та агресивних хімічних середовищ, що є особливо важливим для глибоководного буріння в регіонах, таких як Мексиканська затока чи Західна Африка [23].

Одним із ключових аспектів економічної ефективності впровадження запропонованих заходів є застосування BIM-технологій для комплексного управління життєвим циклом бурильних колон. Створення цифрових двійників дозволяє не лише проводити моделювання експлуатаційних навантажень, а й оцінювати довгостроковий економічний ефект від впровадження нових матеріалів чи технологій моніторингу [24]. Наприклад, у рамках спільного проекту компаній ExxonMobil та Halliburton було доведено, що використання BIM-моделювання для оптимізації конструкції бурильних труб дозволило скоротити середню тривалість буріння свердловини на 8%, що еквівалентно економії понад 3 мільйони доларів на кожній свердловині [25].

Враховуючи зростаючі виклики у сфері нафтогазового буріння, застосування цифрових технологій, адаптивних стратегій технічного обслуговування та новітніх матеріалів є ключовими факторами для підвищення надійності бурильних колон. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на розробку інтегрованих рішень, що поєднують аналітику великих даних, передові матеріали та автоматизовані системи моніторингу для створення максимально ефективних і безпечних бурових процесів [20].

Висновок. Результати проведеного дослідження підтверджують, що інтеграція сучасних методів інженерного моніторингу, цифрових технологій та стратегічних підходів до оптимізації експлуатаційних параметрів бурильних колон є ключовим напрямком для

підвищення їхньої надійності. Впровадження інтелектуальних сенсорних систем у поєднанні з аналізом великих даних дозволяє своєчасно ідентифікувати критичні напруження та прогнозувати залишковий ресурс колон, що суттєво знижує ймовірність їх аварійного руйнування.

Застосування високоміцних сплавів та адаптивних композитних покриттів демонструє значний потенціал у зменшенні негативного впливу корозійно-абразивного зношування, що є особливо актуальним для складних гірничо-геологічних умов. Оптимізація режимів буріння з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень та цифрового моделювання дозволяє підвищити ефективність роботи колон, мінімізуючи ризики механічного пошкодження.

Розвиток і впровадження BIM-моделювання у нафтогазовій галузі відкриває нові перспективи для комплексного аналізу життєвого циклу бурильних труб. Використання цифрових двійників не лише забезпечує точніший контроль за технічним станом колон, а й сприяє формуванню стратегій управління ресурсами на основі економічно обґрунтованих прогнозів. Це дає змогу зменшити непродуктивні витрати та підвищити рентабельність бурових операцій.

Таким чином, результати цього дослідження можуть бути використані для розробки нових стандартів експлуатації бурильних колон, що дозволить суттєво підвищити їхню довговічність, зменшити витрати на технічне обслуговування та підвищити рівень безпеки нафтогазових проєктів. Подальші дослідження в цій сфері мають бути спрямовані на розширення можливостей штучного інтелекту та машинного навчання для більш точного прогнозування деградації матеріалів, а також на тестування інноваційних матеріалів у реальних експлуатаційних умовах.

Л і т е р а т у р а

1. Івасів В. М., Гридчук Я. С., Юрич Л. І. Analysis of destruction causes of drill string elements // Technology audit and production reserves. 2014. № 6. С. 15. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.31838.
2. Витязь О. Ю., Грабовський Р. С., Тирлич В. В., Артим В. І. Оцінка впливу динамічних навантажень на умови руйнування труб бурильних колон під час спуско-підймальних операцій // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2018. С. 38–47.

3. Артим В. І. Оцінка пошкоджуючої дії асиметричного навантаження на елементи бурильних і штангових колон // *Нафтогазова енергетика*. 2009. № 4. С. 26–32.
4. Крижанівський Є. І. Вплив асиметрії циклу на опір корозійної втоми з'єднань бурильних труб // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 1990. Т. 26, № 4. С. 87–89.
5. Джус А. П., Лисканич М. В. Вплив асиметрії навантаження на характеристики втомного руйнування елементів бурильної колони // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2. С. 54–58.
6. Кийко Л. М. Методи та засоби контролю різьбових з'єднань трубних колон : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 2002. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0402U000952> (дата звернення: 18.09.2024).
7. Івасів В. М. Методи та засоби управління бурильною колоною для забезпечення її надійності : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 1999. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0599U000334> (дата звернення: 21.08.2024).
8. Рачкевич Р. В. Розвиток наукових основ забезпечення працездатності колон бурильних і насосно-компресорних труб : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.10. Івано-Франківськ, 2018. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0518U000405> (дата звернення: 18.09.2024).
9. Данилюк Н. Я., Артим В. І. Огляд методів і засобів інформаційної підтримки життєвого циклу бурильних установок на основі BIM-технології // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2024. № 1(56). С. 34–48. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-34-48](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-34-48) (дата звернення: 18.09.2024).
10. Рачкевич Р. В., Слободян В. І., Івасів В. М., Артим В. І. Довговічність трубних колон за складного напружено-деформованого стану // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 4. С. 25–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnng_2016_4_4 (дата звернення: 21.08.2024).
11. Гридчук Я. С. Прогнозування довговічності елементів бурильної колони при вібраційному навантаженні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.12 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2013. 20 с.
12. Данилюк Я. М. Прогнозування довговічності бурильних колон з використанням засобів геометричного контролю труб // *Методи та прилади контролю якості*. 2002. № 8. С. 6–10.
13. Рачкевич І. О. Прогнозування втомної довговічності елементів бурильної колони на основі машинного навчання // *Український науковий журнал*. 2021. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0821U102160> (дата звернення: 18.09.2024).
14. Демків І. В., Ковальчук О. А. Аналіз концепції цифрових двійників: історія розвитку та сучасне застосування // *Електронний архів ТНТУ*. 2022. С. 179–180.
15. Industrial Internet Consortium. Цифрові двійники для промислового застосування. АТЕР КРІ, 2020 (дата звернення: 18.09.2024).
16. Цифрові двійники: що це за технологія і як вона допоможе відновити Україну. PSM7.com, 2023 (дата звернення: 18.09.2024).
17. Витязь О. Ю. Розвиток наукових основ оцінки роботоздатності колон бурильних та гнучких труб : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.10. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2021. 350 с.
18. Рачкевич Р. В. Розвиток наукових основ забезпечення працездатності колон бурильних і насосно-компресорних труб на ділянках похило-скерованих і горизонтальних свердловин із урахуванням просторової жорсткості : дис. канд. техн. наук : 05.15.10. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2016. 200 с.
19. Чернов Б. О., Сімків М. Є., Чернов В. Б. Методи підвищення довговічності елементів бурильної колони // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 4(29).
20. Markom A. M., Saharudin S., Hisham M. H. Systematic Review of Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing: Advancements, Applications, and Challenges // *SSRN*. 2025 (дата звернення: 18.09.2024).
21. Wang B., Zhan Z., Cheng M. Distributed acoustic sensing technology in marine geosciences // *Geodesy and Geodynamics*. 2024. Vol. 15, No. 5. P. 345–359.
22. Витязь О. Ю. Прогнозування довговічності бурильних колон з використанням засобів неруйнівного контролю // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2023. № 2. С. 45–52.
23. Li H., Bao X. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 12792–12803.
24. Zhang Y., Wang D. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2020. Vol. 32, No. 24. P. 1525–1528.
25. Витязь О. Ю. Вплив експлуатаційних дефектів на роботоздатність бурильних колон // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2023. № 3. С. 33–40.

References

1. Iivasiv V. M., Grydzhuk Ya. S., Yurych L. I. Analysis of destruction causes of drill string elements // *Technology audit and production reserves*. 2014. № 6. P. 15. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.31838.
2. Vityaz O. Yu., Hrabovskyi R. S., Tyrlych V. V., Artym V. I. Otsinka vplyvu dynamichnykh navantazhen na umovy ruynuvannya trub burylnykh kolon pid chas spusko-pidiimalnykh operatsii // *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2018. P. 38–47.
3. Artym V. I. Otsinka poshkodzhuvanoi dii asymetrychnoho navantazhennia na elementy burylnykh i shtanhovykh kolon // *Naftogazova energetyka*. 2009. № 4. P. 26–32.
4. Kryzhanivskiy Ye. I. Vplyv asymetrii tsykladu na opir korozii vtomly z'iednan burylnykh trub // *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. 1990. T. 26, № 4. P. 87–89.
5. Dzhus A. P., Lyskanych M. V. Vplyv asymetrii navantazhennia na kharakterystyky vtomnoho ruynuvannya elementiv burylnoi kolony // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*. 2010. № 2. P. 54–58.
6. Kiyko L. M. Metody ta zasoby kontroliu rizbovykh z'iednan trubnykh kolon : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 2002. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0402U000952> (data zvernennia: 18.09.2024).
7. Ivasiv V. M. Metody ta zasoby upravlinnia burylnoi kolonoiu dlia zabezpechennia yii nadiinosti : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 1999. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0599U000334> (data zvernennia: 21.08.2024).
8. Rachkevych R. V. Rozvytok naukovykh osnov zabezpechennia pratsezdatsnosti kolon burylnykh i nasosno-kompresornykh trub : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk, 2018. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0518U000405> (data zvernennia: 18.09.2024).
9. Danyliuk N. Ya., Artym V. I. Ohliad metodiv i zasobiv informatsiinoi pidtrymky zhyttievoho tsykladu burylnykh ustanovok na osnovi BIM-tekhnologii // *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2024. № 1(56). P. 34–48. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-34-48](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-34-48) (data zvernennia: 18.09.2024).
10. Rachkevych R. V., Slobodian V. I., Ivasiv V. M., Artym V. I. Dovhovichnist trubnykh kolon za skladnoho napruzhenno-deformovanoho stanu // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*. 2016. № 4. P. 25–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnng_r_2016_4_4 (data zvernennia: 21.08.2024).
11. Grydzhuk Ya. S. Prohnozuvannia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony pry vibratsiinomu navantazhenni : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.05.12 / Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu. Ivano-Frankivsk, 2013. 20 p.
12. Danyliuk Ya. M. Prohnozuvannia dovhovichnosti burylnykh kolon z vykorystanniam zasobiv heometrychnoho kontroliu trub // *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2002. № 8. P. 6–10.
13. Rachkevych I. O. Prohnozuvannia vtomnoi dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony na osnovi mashynnoho navchannia // *Ukrainskyi naukovyi zhurnal*. 2021. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0821U102160> (data zvernennia: 18.09.2024).
14. Demkiv I. V., Kovalchuk O. A. Analiz kontseptsii tsyfrovyykh dvynkyv: istoriia rozvytku ta suchasne zastosuvannia // *Elektronnyi arkhiv TNTU*. 2022. P. 179–180.
15. Industrial Internet Consortium. Digital twins for industrial applications. ATEP KPI, 2020 (access date: 18.09.2024).
16. Tsyfrovi dvynky: shcho tse za tekhnolohiia i yak vona dopomozhe vidnovyty Ukrainu. PSM7.com, 2023 (access date: 18.09.2024).
17. Vityaz O. Yu. Rozvytok naukovykh osnov otsinky robotodatnosti kolon burylnykh ta hnutkykh trub : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk : Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu, 2021. 350 p.
18. Rachkevych R. V. Rozvytok naukovykh osnov zabezpechennia pratsezdatsnosti kolon burylnykh i nasosno-kompresornykh trub na dilianakh pokhylo-skerovanykh i horyzontalnykh sverdlodyn iz urakhuvanniam prostоровoi zhorstkosti : dys. kand. tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk : Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu, 2016. 200 p.
19. Chernov B. O., Simkiv M. Ye., Chernov V. B. Metody pidvyshchennia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*. 2008. № 4(29).
20. Markom A. M., Saharudin S., Hisham M. H. Systematic Review of Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing: Advancements, Applications, and Challenges // *SSRN*. 2025 (access date: 18.09.2024).
21. Wang B., Zhan Z., Cheng M. Distributed acoustic sensing technology in marine geosciences // *Geodesy and Geodynamics*. 2024. Vol. 15, No. 5. P. 345–359.
22. Vityaz O. Yu. Prohnozuvannia dovhovichnosti burylnykh kolon z vykorystanniam zasobiv neruynivnoho kontroliu // *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2023. № 2. P. 45–52.
23. Li H., Bao X. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 12792–12803.
24. Zhang Y., Wang D. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable // *IEEE*

Photonics Technology Letters. 2020. Vol. 32, No. 24. P. 1525–1528.

25. Vityaz O. Yu. Vplyv ekspluatatsiinykh defektiv na robotodatnist burylnykh kolon // Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu. 2023. № 3. P. 33–40.

Danyliuk N.Y. Strategic approaches to reduce the risks of drilling strike failure based on engineering monitoring systems

In the modern oil and gas industry, the issue of increasing the durability of drilling rigs is key to ensuring the efficiency and economic feasibility of resource extraction. Activities in harsh operating conditions lead to intensive wear of equipment, which necessitates the use of the latest technologies for its protection. One of the promising areas in this context is the implementation of BIM technologies (Building Information Modeling), which contribute to improving equipment life cycle management, optimizing maintenance processes and predicting wear. The article provides a comprehensive analysis of the impact of corrosive environments on drilling rig materials, identifies the main factors leading to the degradation of structural elements, and considers modern methods of their protection. In particular, attention is paid to the use of anti-corrosion coatings, modified materials and cathodic protection. In addition, the possibilities of using BIM technologies for monitoring the condition of drilling equipment in real time are considered, which allows for timely detection of defects, minimizing the risks of accidents and increasing the operational life of the units.

The study showed that the integration of BIM models with predictive analytics and maintenance systems allows to significantly reduce the costs of repairs and downtime of equipment. This, in turn, ensures an increase in the overall efficiency of oil and gas enterprises and contributes to their sustainable development. The authors emphasize the importance of further research in the field of digital modeling to increase the durability of drilling rigs and develop new standards for managing the technical condition of equipment. The results of the work can be useful for engineers involved in the design and operation of drilling equipment, as well as for scientists investigating promising methods of material protection in the oil and gas industry. Further research in this area has the potential to significantly improve the reliability of equipment and reduce operating costs, which is a critically important factor for energy security and economic stability of the industry.

Keywords: failure risks; engineering monitoring; drilling optimization; forecasting technologies; Internet of Things (IoT); drilling safety.

Данилюк Назарій Ярославович – аспірант кафедри нафтогазового обладнання, спеціальності галузевого машинобудування, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, d.nazariy97@gmail.com.

Стаття подана 18.04.2025.