



Механічна інженерія

Прийнято 25.02.2025. Прорецензовано 12.05.2025. Опубліковано 23.06.2025.

УДК 622

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-1(58)-19-35

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

Данилюк Н. Я.*

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0003-8916-7690>

e-mail: d.nazarii97@gmail.com

Анотація. 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 можливість 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 прогнозування 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; технології прогнозування; інтернет речей; безпека бурових операцій.

Запропоноване посилання: Данилюк, Н. Я. (2025). Стратегічні підходи до зменшення ризиків руйнування бурильних колон на основі систем інженерного моніторингу. Науковий вісник ІФНТУНГ, 1(58), 19-35. doi: 10.31471/1993-9965-2025-1(58)-19-35

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

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.

Аналіз сучасних та закордонних досліджень і публікацій

Сучасні дослідження з прогнозування довговічності бурильних колон та моніторингу їхнього технічного стану демонструють високий рівень інтеграції цифрових технологій у нафтогазовій галузі. Провідні українські та зарубіжні вчені зосереджують увагу на впровадженні методів цифрових двійників, інтелектуального аналізу даних, сенсорних систем та машинного навчання для запобігання аваріям і зменшення ризиків руйнування елементів бурильного обладнання.

Зокрема, Яциняк І. І. у своїй праці [1] аналізує можливості підвищення точності прогнозування втомного ресурсу бурильних труб шляхом застосування критеріїв подібності та статистичного моделювання в умовах змінного навантаження. Дослідження доводить важливість калібрування моделей на основі натурних даних, що дозволяє зменшити похибки при оцінці ресурсу труб у складних геологічних умовах.

Розширюючи підхід до врахування напружено-деформованого стану, Рачкевич Р. В. та співавт. дослідили вплив складного НДС на

довговічність трубних колон, встановивши залежність між граничними навантаженнями і зоною зародження втомних тріщин [2]. Їхні висновки доводять доцільність комплексної оцінки впливу циклічних і комбінованих навантажень, а також геометричних факторів на загальний технічний ресурс бурильних колон.

У контексті зарубіжних досліджень особливу увагу привертає стаття Wang J. та ін. [3], де представлено застосування цифрового двійника для оцінки технічного стану підйомної системи бурової установки. Автори демонструють успішне поєднання систем реального часу, сенсорних даних та моделювання в середовищі цифрового двійника, що дозволяє не лише аналізувати теперішній стан обладнання, але й прогнозувати потенційні відмови.

Цікавою є також робота Han B. та ін. [4], в якій розглянуто використання Distributed Acoustic Sensing (DAS) – технології, що базується на оптоволоконних кабелях, для виявлення мікротріщин і вібрацій у системах буріння. Такий підхід дозволяє оперативно реагувати на відхилення в роботі колони, знижуючи ризики катастрофічних відмов.

Додатково, Galagedarage Don M. P. запропонував фреймворк для прогнозування втомного руйнування бурильної колони на основі цифрового двійника [5]. Особливістю роботи є поєднання машинного навчання з класичними методами механіки руйнування, що забезпечує адаптивне оновлення прогнозних моделей у залежності від вхідних даних моніторингу.

Аналіз наведених джерел свідчить, що стратегічний підхід до моніторингу технічного стану бурильних колон на основі цифрових технологій забезпечує нову якість управління ризиками. Українські науковці активно інтегрують світові тенденції в дослідницьку практику, а сучасні методи (BIM, цифрові двійники, DAS) відкривають нові перспективи для забезпечення надійності та довговічності бурильного обладнання.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проблема забезпечення надійності та довговічності бурильних колон у нафтогазовій промисловості залишається актуальною через складність експлуатаційних умов і багатогранність факторів, що впливають на їх руйнування. Незважаючи на значний прогрес у розробці методів інженерного моніторингу та цифрових технологій, низка аспектів залишаються недостатньо дослідженими, що обмежує ефектив-

ність профілактики аварійних ситуацій і зниження експлуатаційних витрат.

Однією з ключових невирішених проблем є обмежена точність прогнозування втомного руйнування бурильних колон у реальному часі. Сучасні системи моніторингу, такі як сенсори вібрації чи Distributed Acoustic Sensing (DAS), дозволяють отримувати дані про напружено-деформований стан, однак їхня здатність точно передбачати момент виникнення мікротріщин або критичних дефектів залишається обмеженою. Це пов'язано з недостатньою інтеграцією моделей машинного навчання, які могли б узагальнювати дані з різних джерел (геологічних, механічних, хімічних) для створення точних прогнозів.

Іншою проблемою є висока вартість впровадження комплексних систем моніторингу, таких як IoT-системи чи цифрові двійники, що ускладнює їх широке застосування, особливо на родовищах з обмеженим фінансуванням. Більшість сучасних рішень орієнтовані на великі нафтогазові проекти, тоді як для менших операторів економічна доцільність використання таких технологій залишається сумнівною. Це створює прогалину в доступності передових методів моніторингу для різних сегментів галузі.

Крім того, невирішеною залишається проблема адаптації систем моніторингу до екстремальних геологічних умов, таких як високий тиск, температура чи агресивне корозійне середовище. Багато сенсорних систем, які ефективно працюють у стандартних умовах, втрачають надійність у глибоких свердловинах або при бурінні в геологічно складних формаціях. Це обмежує їхню універсальність і вимагає розробки нових матеріалів і технологій для сенсорів, здатних витримувати екстремальні умови.

Ще одним важливим аспектом є недостатня стандартизація методів інтеграції даних із різних джерел моніторингу. Наприклад, об'єднання інформації від ВІМ-моделей, IoT-систем і алгоритмів машинного навчання часто ускладнене через несумісність форматів даних або відсутність єдиних протоколів. Це знижує ефективність комплексного аналізу та перешкоджає створенню універсальних платформ для управління ризиками руйнування бурильних колон.

Нарешті, проблемою залишається обмежена увага до людського фактора в експлуатації систем моніторингу. Навіть найсучасніші технології можуть бути неефективними без належної підготовки персоналу, який інтер-

претує дані та приймає рішення. Недостатня кваліфікація операторів або відсутність чітких протоколів реагування на тривожні сигнали моніторингу може призводити до несвоєчасного виявлення дефектів.

Запропоновані в даному дослідженні стратегічні підходи спрямовані на часткове вирішення цих проблем шляхом інтеграції проактивного моніторингу, використання інноваційних матеріалів і оптимізації режимів буріння. Однак подальші дослідження необхідні для створення економічно доступних і універсальних рішень, які б враховували специфіку різних геологічних умов і забезпечували стандартизацію даних для комплексного аналізу.

Формулювання цілей 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, ВІМ-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.

Висвітлення основного матеріалу

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

Таблиця 1 – Основні механічні навантаження на бурильні колони [8]

Вид навантаження	Механізм виникнення	Наслідки для бурильних труб
Осьове навантаження (стиснення / розтягнення)	Зумовлене масою колони, тиском гідростатичної стовпи рідини та глибиною буріння	Пластичні деформації, ініціація мікротріщин, втрата стійкості
Крутний момент	Виникає внаслідок обертального руху колони, особливо в зоні підвищеного тертя	Скручування, накопичення зсувних напружень, ризик руйнування в зонах з'єднань
Поперечні згинальні навантаження	Обумовлені викривленням траєкторії свердловини та нерівномірним розподілом навантаження	Локальні напруження, втомне руйнування матеріалу, прогин труб
Динамічні та ударні навантаження	Виникають під час змін режиму буріння, ударів долота по породі, різкої зупинки чи запуску	Структурні пошкодження, прискорене зношування, зниження ресурсу труб

чинників, 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 [6].

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 [7].

Бурильні колони піддаються значним механічним навантаженням під час виконання бурових операцій. До основних видів навантажень належать [8]:

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

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

в) поперечні згинальні навантаження – з'являються через відхилення свердловини та нерівномірний розподіл навантаження. Наявність бокових сил спричиняє локальні напру-

ження, що прискорюють процес руйнування матеріалу.

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

Втомні процеси. Циклічні навантаження, які виникають у процесі буріння, викликають накопичення мікродфектів 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 [9].

Механічна втома є однією з головних причин поступового руйнування бурильних колон. Під впливом багатократних циклів навантажень матеріал бурильних труб зазнає мікροструктурних змін, що призводить до накопичення пошкоджень та утворення тріщин. Основні механізми втомного руйнування включають [10]:

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 мікродфекти стають точками ініціації тріщин.

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

Таблиця 2 – Втомні процеси в бурильних колонах [10]

Чинник	Механізм впливу	Наслідки
Багаторазові цикли навантажень	Повторювані механічні навантаження, особливо у викривлених або глибоких свердловинах	Акумулявання втомних пошкоджень, утворення та розвиток мікротріщин
Концентрація напружень	Локальне підвищення напружень у зонах різьблення, зварювання або геометричних переходів	Ініціація тріщин, прискорене втомне руйнування
Температурні коливання	Зміни температурного режиму через різні глибини буріння або теплові навантаження	Термічне розширення матеріалу, виникнення додаткових термонапружень

Таблиця 3 – Корозійний вплив на бурильні колони [10]

Тип корозії	Умови та причини виникнення	Наслідки для бурильних труб
Загальна електрохімічна корозія	Тривале контактування із буровими рідинами, збагаченими солями, киснем, CO ₂ або H ₂ S	Рівномірне ослаблення стінки труби, зменшення міцності, зростання ризику розгерметизації
Корозійна втома	Спільна дія корозійного середовища та циклічних механічних навантажень	Прискорене тріщиноутворення, зниження опору втомі, передчасне руйнування
Сульфідно-стресова корозія (SSC)	Агресивне середовище з наявністю H ₂ S, наявність розтягувальних напружень у металі	Крихке руйнування без видимих ознак зносу, скорочення ресурсу, втрати герметичності
Пітінгова (точкова) корозія	Локальні електрохімічні атаки в умовах мікросередовищ або при дефектах покриття	Утворення глибоких точкових каверн, локальне проривання стінки труби, складність виявлення

Корозійний вплив. Бурильні колони експлуатуються в агресивних середовищах, де наявність сірководню (H₂S) 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 [9].

Корозія бурильних колон є одним із найнебезпечніших факторів, оскільки вона не тільки послаблює матеріал, але й може викликати катастрофічне руйнування. Основні типи корозійного впливу включають [10]:

а) загальна електрохімічна корозія – виникає через контактування металу з агресивними середовищами (солоня 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 (H₂S), що призводить до скорочення терміну служби труб через внутрішні напруження.

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

Геологічні чинники. 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. Основні проблеми, пов'язані з геологічними чинниками [10]:

а) абразивне зношення – 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

Таблиця 4 – Вплив геологічних факторів на бурильні колони [10]

Геологічний чинник	Прояв або умови виникнення	Наслідки для бурильних труб
Абразивне зношення	Наявність у породі твердокристалічних мінералів (кварц, пірит, магнетит)	Інтенсивне стирання зовнішньої поверхні труб, зменшення товщини стінки, прискорене зношування
Диференціальний тиск	Високий перепад тиску між внутрішнім простором колони та стінками свердловини	Механічні деформації труб, овальні форми, локальна втрата міцності
Геодинамічні процеси	Зміщення пластів, сейсмічна активність, зміна геостресового поля	Формування непередбачуваних напружень, мікропошкодження, ризик втрати герметичності

можуть спричинити непередбачувані напруження в колоні.

Аналіз основних причин руйнування бурильних колон свідчить про необхідність комплексного підходу до їхнього захисту [10]. Поєднання сучасних методів інженерного моніторингу, використання високоякісних матеріалів та впровадження цифрових технологій дозволить значно підвищити довговічність колон, зменшити ризики аварій та оптимізувати експлуатаційні витрати [11].

Методи інженерного моніторингу для оцінки стану бурильних колон. Забезпечення надійності бурильних 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 бурильних колон дозволяє не лише своєчасно виявляти дефекти, а й прогнозувати потенційні ризики, що дає змогу значно підвищити безпеку та економічну ефективність бурових операцій [12].

До традиційних методів оцінки стану бурильних колон належать візуальний огляд, неруйнівний контроль та аналіз експлуатаційних характеристик [13].

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 [14].

Неруйнівний контроль (NDT) включає використання ультразвукової дефектоскопії, магнітопорошкового та рентгенографічного методів [13].

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.

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 [14].

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 [14].

Сучасні цифрові технології. 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 [15].

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 [15]:

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.

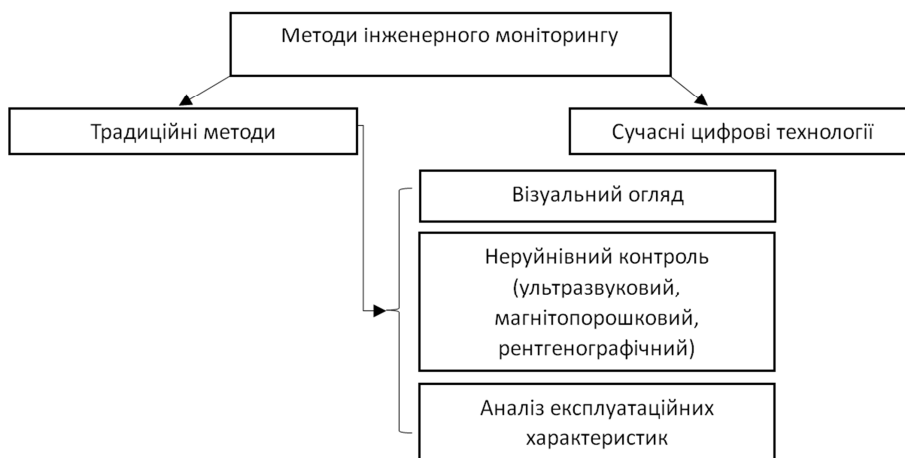


Рисунок 1 – Загальна схема методів інженерного моніторингу [14]

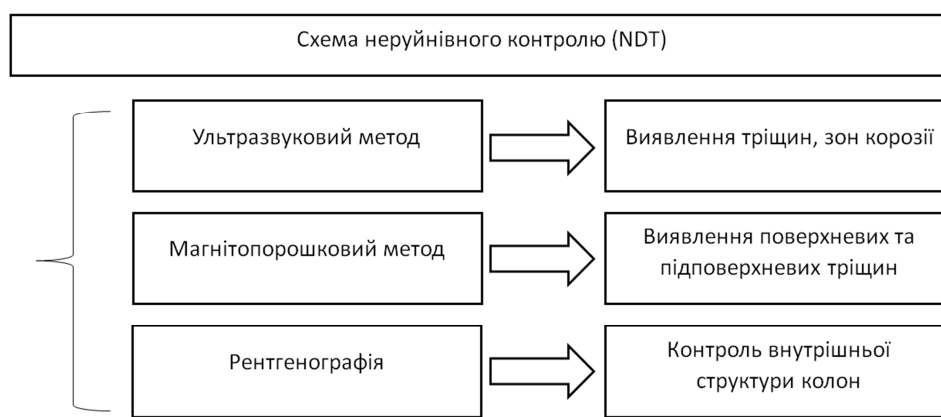


Рисунок 2 – Схема неруйнівного контролю (NDT) [13]



Рисунок 3 – Аналіз експлуатаційних характеристик [14]

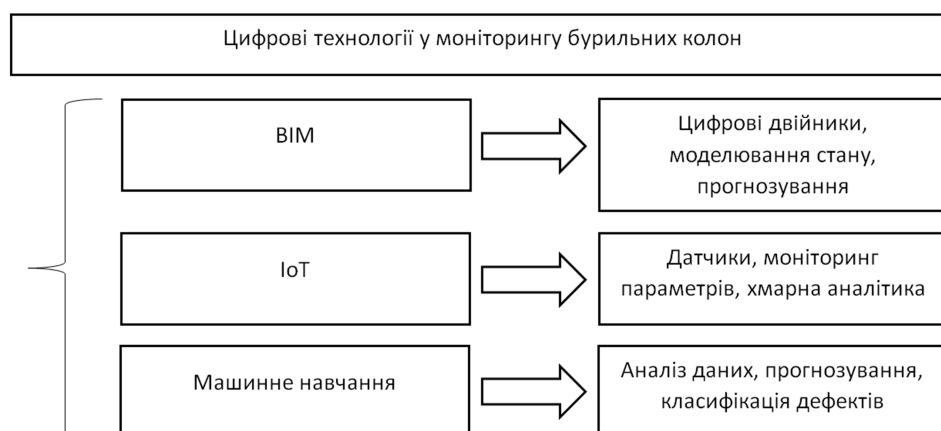


Рисунок 4 – Загальна схема цифрових технологій у моніторингу бурильних колон [15]

Таблиця 5 – Функціональні можливості машинних технологій [15]

Технологія	Основні функції	Ключові переваги
BIM (Building Information Modeling)	Інтеграція експлуатаційних даних, цифрове моделювання бурильних колон, візуалізація напружено-деформованого стану, прогнозування ресурсу	Точна геометрія, просторово-часовий аналіз, доступ до історії обслуговування та дефектів
IoT (Інтернет речей)	Збір даних з вбудованих сенсорів: вібрації, температура, тиск, деформації, зношення	Безперервний моніторинг у реальному часі, оперативна реакція, інтеграція з хмарними платформами
Машинне навчання (ML)	Виявлення аномалій, класифікація типів пошкоджень, предиктивна аналітика з прогнозуванням відмов	Автоматизація прийняття рішень, підвищення точності діагностики, зниження аварійності

Таблиця 6 – Порівняння традиційних та цифрових методів моніторингу [20]

Метод моніторингу	Опис	Переваги	Обмеження / Недоліки
Традиційні методи (візуальний контроль, ультразвукова діагностика, механічні вимірювання)	Використання перевірених фізичних методів для періодичної оцінки технічного стану колон	Висока точність локальних вимірювань, доступність, простота реалізації	Вимагають ручного проведення, не забезпечують безперервного моніторингу, обмежене охоплення
Цифрові технології (BIM, IoT, машинне навчання)	Застосування сенсорів, цифрових двійників, аналітики великих даних і штучного інтелекту	Автоматизований моніторинг у реальному часі, раннє виявлення дефектів, прогнозування відмов	Висока початкова вартість впровадження, необхідність технічної інфраструктури
Комплексні системи (гібридний підхід)	Інтеграція традиційних методів з цифровими платформами для підвищення точності аналізу	Повна картина технічного стану, можливість дистанційного управління, історичний і сенсорний аналіз	Потреба у налаштуванні під специфіку об'єкта, складність інтеграції та аналізу великих обсягів даних

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 [15]:

- 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 [15].

Алгоритми машинного навчання у прогнозуванні дефектів. Машинне навчання дозволяє автоматизувати аналіз великих масивів даних, отриманих у процесі експлуатації бурильних колон [16]. Алгоритми на основі ней-

ронних мереж та методів глибокого навчання здатні [17]:

- 1) розпізнавати закономірності у поведінці конструкцій під навантаженням [18];
- 2) класифікувати дефекти за рівнем небезпеки [18];
- 3) прогнозувати час до повного виходу з ладу колон [18].

Застосування цифрових технологій значно підвищує точність моніторингу та забезпечує можливість проактивного управління технічним станом бурильного обладнання [19].

Комплексні системи моніторингу. Комбінація традиційних методів контролю та сучасних цифрових технологій формує основу комплексних систем моніторингу бурильних колон. Такі системи мають низку переваг [20]:

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

Таблиця 7 – Основні параметри моніторингу бурильних колон [25]

Параметр	Інженерно-технічне значення	Методи контролю
Осьові та крутні навантаження	Визначають рівень механічного навантаження на колону; перевищення може призвести до деформацій або руйнування	Сенсорні системи навантажень, тензодатчики, інерційні вимірвальні пристрої
Вібрації (амплітуда, частота)	Контроль рівня коливань з метою уникнення резонансних ефектів та втомного руйнування	Акселерометри, датчики вібрацій, сейсмічні сенсори
Зміни геометрії конструкції	Виявлення деформацій, викривлень, прогинів або локального звуження труб	Лазерне 3D-сканування, оптичні лінійки, візуальні системи контролю
Локальна температура	Фіксація зон перегріву, які можуть спричинити втрату міцності матеріалу	Термопари, інфрачервоні датчики, тепловізійний контроль
Корозійна активність	Визначення інтенсивності корозійних процесів у середовищі буріння	Електрохімічні сенсори, потенціометричні зонди, аналіз складу бурового розчину

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 високовартісних перевірок на місці.

Однією з перспективних моделей комплексного моніторингу є система цифрового двійника бурильної колони, 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 [21].

Таким чином, розвиток методів інженерного моніторингу бурильних 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 бурильних колон у сучасній нафтогазовій промисловості [22].

Стратегічні підходи до зменшення ризиків. Забезпечення довговічності бурильних 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 застосовують комплексні

стратегічні підходи, що поєднують методи проактивного моніторингу, використання інноваційних матеріалів, оптимізацію режимів буріння та впровадження цифрових технологій [23].

Проактивний моніторинг. Традиційні підходи до контролю технічного стану бурильних 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 бурильних колон у режимі реального часу, що дозволяє не лише виявляти наявні дефекти, а й прогнозувати їх розвиток [24].

Сучасні сенсорні системи забезпечують контроль напружено-деформованого стану колон шляхом аналізу наступних параметрів [25]:

- а) рівня осьових і крутних навантажень;
- б) амплітуди та частоти вібрацій;
- в) змін у геометрії колони під впливом навантажень;
- г) локальної температури та корозійної активності.

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 багатофакторного аналізу експлуатаційних умов.

Таблиця 8 – Порівняння традиційних та інноваційних матеріалів для бурильних колон [24]

Матеріал	Ключові переваги	Обмеження / Недоліки
Високоміцні маловуглецеві сталі	Висока механічна міцність, добрий опір втомі, технологічність обробки	Необхідність додаткового антикорозійного захисту, чутливість до SSC у агресивних середовищах
Композитні покриття	Ефективний захист від корозії та абразивного зношування, зменшення маси елементів	Висока вартість нанесення, складність ремонту у польових умовах
Біметалеві конструкції	Поєднання міцності сталевого осердя з корозійною стійкістю зовнішнього шару	Складний процес виробництва, потенційні зони міжшарового ослаблення
Наноструктуровані сплави	Підвищена зносостійкість, висока довговічність, покращені характеристики опору тріщинам	Висока виробнича вартість, обмежена доступність і впровадження у масове виробництво

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 корозійно-го та механічного зношування [25].

Серед інноваційних матеріалів, що знаходять застосування у бурових системах, можна виділити [24]:

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.

З метою порівняльного аналізу впливу різних типів інноваційних матеріалів на довговічність бурильних колон було побудовано узагальнюючий графік (рис. 5). Вихідні дані отримано на основі узагальнення результатів сучасних досліджень [24–25] та числових розрахунків довговічності конструкцій при стандартних експлуатаційних навантаженнях.

На графіку представлено порівняльне збільшення довговічності (у відсотковому співвідношенні) відносно традиційної сталі, яка прийнята за базовий рівень (0%). Як видно, найбільший приріст ресурсу демонструють наноструктуровані сплави — до 50%. Біметалеві конструкції та композитні покриття до-

зволяють збільшити ресурс відповідно до 40% та 35%. Найменший, але суттєвий приріст забезпечує застосування легованих маловуглецевих сталей (до 30%), завдяки кращим механічним та антикорозійним властивостям.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що застосування інноваційних матеріалів є перспективним напрямком збільшення довговічності колон у складних умовах буріння, особливо при наявності високих температур, агресивних середовищ або циклічних навантажень.

Даний графік (рис. 5) демонструє збільшення довговічності бурильних колон при застосування інноваційних матеріалів (з нього можна помітити, що найкращий ефект дають наноструктуровані сплави, які можуть підвищити ресурс колон до 50%).

Використання інноваційних матеріалів дає змогу збільшити ресурс бурильних колон на 30-50%, що значно скорочує експлуатаційні витрати та ризики аварійних ситуацій [25].

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 [24]:

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.

Для зниження ризику руйнування колон застосовується адаптивне регулювання навантажень, що базується на аналізі поточних умов

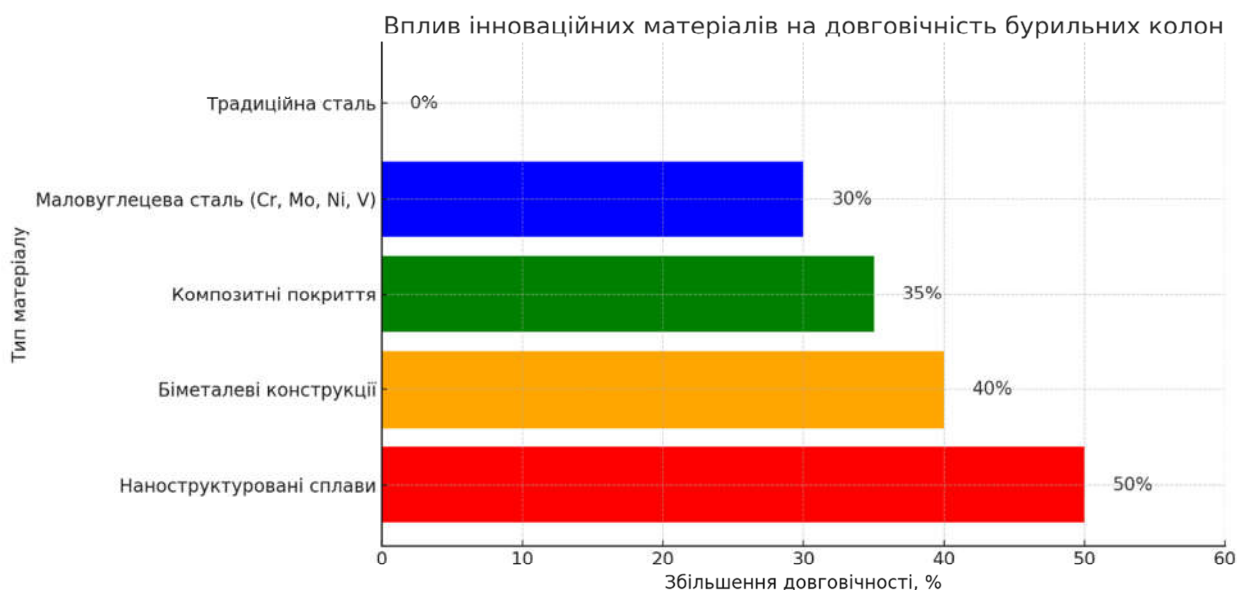


Рисунок 5 – Вплив типу матеріалу на збільшення довговічності бурильних колон за результатами моделювання та аналізу літературних джерел [24,25]

Таблиця 9 – Фактори, що впливають на зношування бурильних колон та методи оптимізації режимів буріння [25]

Чинник	Механізм впливу на бурильну колону	Метод оптимізації
Осьове навантаження	Спричиняє контактні напруження між трубою та стінками свердловини, підвищує ризик локального зношення	Адаптивне регулювання навантаження залежно від геологічних умов і глибини буріння
Швидкість обертання	Викликає динамічні навантаження, осьові та радіальні вібрації, прискорене втомне зношування	Контроль оптимальної частоти обертання, застосування антивібраційних модулів
Гідравлічний режим	Визначає ефективність очищення свердловини та ерозійне навантаження на колону	Динамічне налаштування тиску та витрати бурового розчину для мінімізації гідроерозії

буріння. Зокрема, використання автоматизованих систем контролю режимів дозволяє [25]:

- підтримувати оптимальне співвідношення швидкості обертання та осьового навантаження для мінімізації втомних пошкоджень;
- динамічно змінювати гідравлічний режим для запобігання ерозійному зношуванню;
- здійснювати оперативний контроль вібрацій, що дозволяє запобігти утворенню резонансних коливань у колоні.

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 платфо-

рму, що забезпечує комплексний аналіз їхнього стану на всіх етапах життєвого циклу [15].

Основними перевагами використання BIM у процесі експлуатації бурильних колон є [15]:

- створення цифрових двійників, що відображають напружено-деформований стан колон у режимі реального часу [21,22].
- 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.

Таблиця 10 – Використання BIM-технологій у моніторингу бурильних колон [21,22]

Функціональний модуль BIM	Опис функції	Ключові переваги
Цифрові двійники (Digital Twins)	Відображення реального технічного стану колон у режимі реального часу на основі сенсорних даних	Можливість прогнозування пошкоджень, оперативне реагування, покращене планування ремонту
Моделювання деградації матеріалу	Використання історичних та поточних даних для прогнозування розвитку дефектів	Зниження аварійних ризиків, підвищення надійності експлуатації
Оптимізація технічного обслуговування	Автоматизований аналіз стану колон з формуванням рекомендацій щодо обслуговування	Мінімізація витрат, запобігання надлишковому ремонту або простою обладнання
Інтеграція з IoT та AI	Об'єднання даних із сенсорних систем та алгоритмів штучного інтелекту для прийняття рішень	Підвищення ефективності управління, автоматизація процесів моніторингу і діагностики

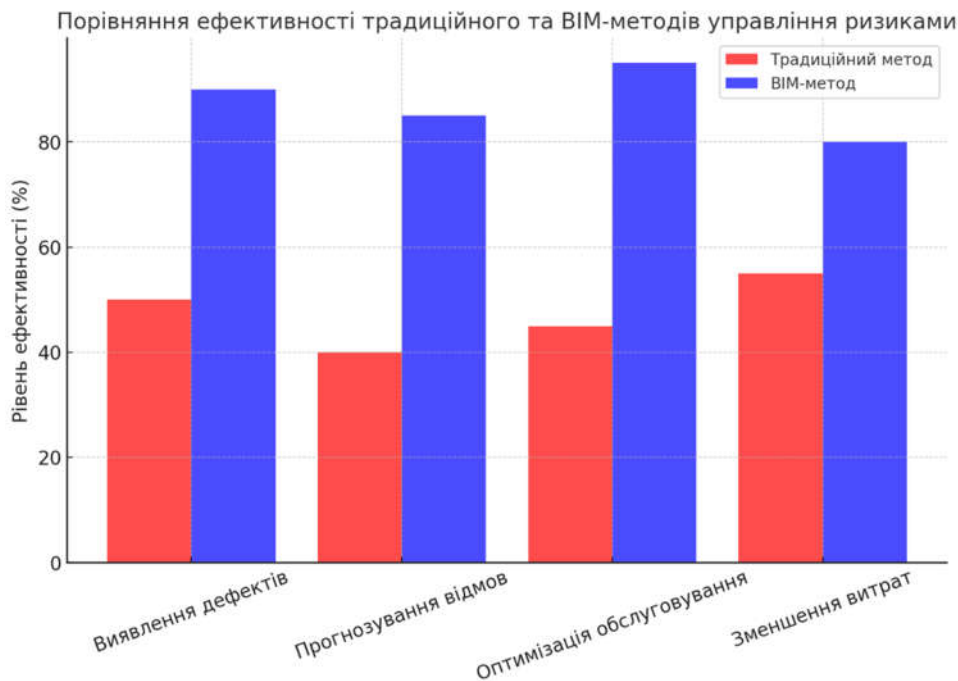


Рисунок 6 – Порівняння ефективності традиційного управління ризиками та BIM-методу при експлуатації бурильних колон

На рисунку 6 наведено порівняльну оцінку ефективності традиційних методів управління ризиками та підходу, заснованого на використанні BIM-технологій. Вихідні дані отримані на основі аналізу численних наукових джерел [15, 21, 22] та узагальнення практичного досвіду цифрової трансформації в управлінні технічним станом бурильного обладнання.

Графік демонструє, що за всіма ключовими показниками BIM-підхід переважає традиційні методи. Зокрема:

1. Ефективність виявлення дефектів зростає з ~50% до понад 90%;

2. Можливість прогнозування відмов зростає з 40% до 85%;

3. Оптимізація обслуговування підвищується з 45% до 95%;

4. Зменшення витрат на експлуатацію та ремонту зростає з 55% до ~80%.

Таке суттєве зростання ефективності пояснюється широкими можливостями BIM-платформи щодо створення цифрових двійників, візуалізації стану елементів, аналізу історичних даних та інтеграції з іншими цифровими інструментами (аналітика, штучний інтелект, IoT).

Таким чином, впровадження ВІМ-методів дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління ризиками, що особливо важливо в умовах високих навантажень, змінного середовища та великої вартості простоїв бурових систем.

Застосування ВІМ-технологій у буровій галузі дозволяє значно підвищити ефективність управління ризиками та забезпечити максимальну надійність бурильних колон у складних умовах експлуатації [15].

Комплексний підхід до зниження ризиків виходу з ладу бурильних колон базується на впровадженні проактивного моніторингу, використанні інноваційних матеріалів, оптимізації режимів буріння та застосуванні ВІМ-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 бурильного обладнання.

Практичні рекомендації для нафтогазової галузі. Ефективне впровадження технологій моніторингу є критично важливим для забезпечення довговічності бурильних 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 бурильної колони. Впровадження таких систем дозволяє оперативно реагувати на критичні зміни, зменшуючи ризик раптових відмов обладнання [26].

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 під-

хід забезпечує значне підвищення безпеки бурових операцій і мінімізацію непродуктивного часу, який може коштувати компаніям сотні тисяч доларів на добу [27].

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 [27]. 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 [28].

Одним із ключових аспектів економічної ефективності впровадження запропонованих заходів є застосування ВІМ-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 [29]. Наприклад, у рамках спільного проєкту компаній ExxonMobil та Halliburton було доведено, що використання ВІМ-моделювання для оптимізації конструкції бурильних труб дозволило скоротити середню тривалість буріння свердловини на 8%, що еквівалентно економії понад 3 мільйони доларів на кожній свердловині [30].

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 [30].

Висновки

Результати проведеного дослідження підтверджують, що інтеграція сучасних методів інженерного моніторингу, цифрових техноло-

гій 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 ВІМ-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.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Яциняк І. І. Прогнозування довговічності елементів бурильної колони з урахуванням критерію подібності втомного руйнування. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2018. № 4. С. 49–56. DOI: [10.31471/1993-9973-2018-4\(50\)-49-56](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2018-4(50)-49-56).
2. 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 (61). С. 25–33. DOI: [10.31471/1993-9973-2016-4\(61\)-25-33](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2016-4(61)-25-33).
3. Wang J., Shi L., Feng D. et al. A digital twin modeling and application for gear rack drilling rigs lifting system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article number 23711. DOI: [10.1038/s41598-024-73954-z](https://doi.org/10.1038/s41598-024-73954-z).
4. Han B., Guan H., Yao J. та ін. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable. *IEEE Sensors Journal*. 2020. P. 1–1. DOI: [10.1109/JSEN.2020.3035002](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3035002).
5. Galagedarage Don M. P. A digital twin development framework for fatigue failure prognosis of a vertical oil well drill string: дис. ... д-ра філософії (PhD). Memorial University of Newfoundland, 2023. DOI: [10.48336/DG91-6121](https://doi.org/10.48336/DG91-6121).
6. 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: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.31838>.
7. 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. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1\(44\)-38-47](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1(44)-38-47)
8. Артим В. І. Оцінка пошкоджуючої дії асиметричного навантаження на елементи бурильних і штангових колон. *Нафтогазова енергетика*. 2009. № 4. С. 26–32.
9. 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.
10. 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.
11. Кийко Л. М. Методи та засоби контролю різьбових з'єднань трубних колон : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 2002.

12. Івасів В. М. Методи та засоби управління бурильною колоною для забезпечення її надійності : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 1999.
13. 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.
14. Данилюк Н. Я., Артими В. І. Огляд методів і засобів інформаційної підтримки життєвого циклу бурильних установок на основі ВІМ-технології. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2024. № 1(56). С. 34–48. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-34-48](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-34-48)
15. Крижанівський Є. І., Витязь О. Ю., Грабовський Р. С. Оцінювання та прогнозування роботоздатності тривало експлуатованих труб бурильних колон. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2020. № 2(49). С. 7–17. DOI: [10.31471/1993-9965-2020-2\(49\)-7-17](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-2(49)-7-17).
16. 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.
17. Данилюк Я. М. Прогнозування довговічності бурильних колон з використанням засобів геометричного контролю труб. *Методи та прилади контролю якості*. 2002. № 8. С. 6–10.
18. Wang J., Shi L., Feng D. та ін. A digital twin modeling and application for gear rack drilling rigs lifting system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article number 23711. DOI: [10.1038/s41598-024-73954-z](https://doi.org/10.1038/s41598-024-73954-z).
19. Galagedarage Don M. P. A digital twin development framework for fatigue failure prognosis of a vertical oil well drill string: дис. ... д-ра філософії (PhD). Memorial University of Newfoundland, 2023. DOI: [10.48336/DG91-6121](https://doi.org/10.48336/DG91-6121).
20. Industrial Internet Consortium. Цифрові двійники для промислового застосування. АТЕР КРІ, 2020. URL: https://atep.kpi.ua/wpcontent/uploads/2021/12/iic_digital_twins_industrial_apps_white_paper_2020-02-18-ukr.pdf (дата звернення: 18.09.2024).
21. Цифрові двійники: що це за технологія і як вона допоможе відновити Україну, 2023. URL: <https://psm7.com/uk/technology/cifrovye-dvojniki-hto-eto-za-technologiya-i-kak-ona-pomozhet-vostanovit-ukrainu-analitika.html> (дата звернення: 18.09.2024).
22. 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.
23. 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.
24. 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). С. 98–102.
25. Markom A. M., Saharudin S., Hisham M. H. Systematic Review of Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing: Advancements, Applications, and Challenges. *SSRN*. 2025 DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5111575>.
26. Wei J., Gong W., Xing J., Xu H. Distributed acoustic sensing technology in marine geosciences. *Intelligent Marine Technology and Systems*. 2024. Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00039-y>.
27. Яциняк І. І. Прогнозування довговічності елементів бурильної колони з урахуванням критерію подібності втомного руйнування. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2018. № 1(47). С. 42–50.
28. He Z., Liu Q. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review. *Journal of Lightwave Technology*. 2021. Vol. 39, No. 12. P. 3671–3686. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3059771>.
29. Han B., Guan H., Yao J., Rao Y., Ran Z., Gong Y., Li Q., Li M., Zhang R., An S., Yu G., Wang X. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable. *IEEE Sensors Journal*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3035002>
30. Витязь О. Ю. Розвиток наукових основ оцінки роботоздатності колон бурильних та гнучких труб : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.12 «Машини нафтової та газової промисловості». Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. 180 с.

References

1. Yatsyniak I. I. Prohnozuvannia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony z urakhuvanniam kryteriiu podobnosti vtomnoho ruynuvannia. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2018. No 4. P. 49–56. DOI: [10.31471/1993-9973-2018-4\(50\)-49-56](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2018-4(50)-49-56). [in Ukrainian]

2. Rachkevych R. V., Slobodian V. I., Ivasiv V. M., Artym V. I. Dohovichnist trubnykh kolon za skladnoho napruzhenno-deformovanoho stanu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch.* 2016. No 4 (61). P. 25–33. DOI: [10.31471/1993-9973-2016-4\(61\)-25-33](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2016-4(61)-25-33). [in Ukrainian]
3. Wang J., Shi L., Feng D. ta in. A digital twin modeling and application for gear rack drilling rigs lifting system. *Scientific Reports.* 2024. Vol. 14. Article number 23711. DOI: [10.1038/s41598-024-73954-z](https://doi.org/10.1038/s41598-024-73954-z).
4. Han B., Guan H., Yao J. ta in. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable. *IEEE Sensors Journal.* 2020. P. 1–1. DOI: [10.1109/JSEN.2020.3035002](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3035002).
5. Galagedarage Don M. P. A digital twin development framework for fatigue failure prognosis of a vertical oil well drill string: dys. ... d-ra filosofii (PhD). Memorial University of Newfoundland, 2023. DOI: [10.48336/DG91-6121](https://doi.org/10.48336/DG91-6121).
6. Ivasiv V. M., Hrydzjuk Ya. S., Yurych L. I. Analysis of destruction causes of drill string elements. *Technology audit and production reserves.* 2014. No 6. P. 15. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.31838>. [in Ukrainian]
7. Vytiaz O. Yu., Hrabovskiy R. S., Tyrlych V. V., Artym V. I. Otsinka vplyvu dynamichnykh navantazhen na umovy ruinuвання trub burylnykh kolon pid chas spusko-pidiimalnykh operatsii. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu.* 2018. P. 38–47. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1\(44\)-38-47](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1(44)-38-47) [in Ukrainian]
8. Artym V. I. Otsinka poskodzhuiuchoi dii asymetrychnoho navantazhennia na elementy buryl'nykh i shtanhovykh kolon. *Naftohazova enerhetyka.* 2009. No 4. P. 26–32. [in Ukrainian]
9. Kryzhanivskiy Ye. I. Vplyv asymetrii tsykladu na opir korozii vtomnykh ziednan burylnykh trub. *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv.* 1990. T. 26, No 4. P. 87–89. [in Ukrainian]
10. Dzhus A. P., Lyskanych M. V. Vplyv asymetrii navantazhennia na kharakterystyky vtomnoho ruinuвання elementiv burylnoi kolony. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch.* 2010. No 2. P. 54–58. [in Ukrainian]
11. Kyiko L. M. Metody ta zasoby kontroliu rizbovykh ziednan trubnykh kolon : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 2002. [in Ukrainian]
12. Ivasiv V. M. Metody ta zasoby upravlinnia burylnoi kolonoiu dlia zabezpechennia yii nadiinosti : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 1999. [in Ukrainian]
13. 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. [in Ukrainian]
14. Danyliuk N. Ya., Artym V. I. Ohliad metodiv i zasobiv informatsiinoi pidtrymky zhyttievoho tsykladu burylnykh ustanovok na osnovi BIM-tekhnolohii. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu.* 2024. No 1(56). P. 34–48. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-34-48](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-34-48). [in Ukrainian]
15. Kryzhanivskiy Ye. I., Vytiaz O. Yu., Hrabovskiy R. S. Otsiniuvannia ta prohnozuvannia robotozdatnosti tryvalo ekspluatovanykh trub burylnykh kolon. *Naukovyi visnyk IFNTUNH.* 2020. № 2(49). S. 7–17. DOI: [10.31471/1993-9965-2020-2\(49\)-7-17](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-2(49)-7-17). [in Ukrainian]
16. Hrydzjuk Ya. S. Prohnozuvannia dohovichnosti elementiv burylnoi kolony pry vibratsiionomu navantazhenni : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.05.12. *Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu.* Ivano-Frankivsk, 2013. 20 p. [in Ukrainian]
17. Danyliuk Ya. M. Prohnozuvannia dohovichnosti burylnykh kolon z vykorystanniam zasobiv heometrychnoho kontroliu trub. *Metody ta pryklady kontroliu yakosti.* 2002. No 8. P. 6–10. [in Ukrainian]
18. Wang J., Shi L., Feng D. ta in. A digital twin modeling and application for gear rack drilling rigs lifting system. *Scientific Reports.* 2024. Vol. 14. Article number 23711. DOI: [10.1038/s41598-024-73954-z](https://doi.org/10.1038/s41598-024-73954-z). [in Ukrainian]
19. Galagedarage Don M. P. A digital twin development framework for fatigue failure prognosis of a vertical oil well drill string: dys. ... d-ra filosofii (PhD). Memorial University of Newfoundland, 2023. DOI: [10.48336/DG91-6121](https://doi.org/10.48336/DG91-6121).
20. Industrial Internet Consortium. Цифрові двійники для промислового застосування. АТЕР КРІ, 2020. URL: https://atep.kpi.ua/wpcontent/uploads/2021/12/iic_digital_twins_industrial_apps_white_paper_2020-02-18-ukr.pdf (data zvernennia: 18.09.2024). [in Ukrainian]
21. Tsyfrovii dviinyky: shcho tse za tekhnolohiia i yak vona dopomozhe vidnovyty Ukrainu, 2023. URL: <https://psm7.com/uk/technology/cifrovye-dvojniki-cto-eto-za-tekhnologiya-i-kak-ona-pomozhet-vosstanovit-ukrainu-analitika.html> (data zvernennia: 18.09.2024). [in Ukrainian]
22. Vytiaz O. Yu. Rozvytok naukovykh osnov otsinky robotozdatnosti kolon burylnykh ta hnuch'nykh trub : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk : Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu, 2021. 350 p. [in Ukrainian]

23. Rachkevych R. V. Rozvytok naukovykh osnov zabezpechennia pratsezdatsnosti kolon burylnykh i nasosno-kompresornykh trub na diliankakh pokhylo-skerovanykh i horyzontalnykh sverdlovyh iz urakhuvanniam prostorovoi zhorstkosti : dys. kand. tekhn. nauk : 05.15.10. Ivano-Frankivsk : Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu, 2016. 200 p. [in Ukrainian]
24. Chernov B. O., Simkiv M. Ye., Chernov V. B. Metody pidvyshchennia dohovichnosti elementiv burylnoi kolony. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch.* 2008. No 4(29). P. 98-102. [in Ukrainian]
25. Markom A. M., Saharudin S., Hisham M. H. Systematic Review of Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing: Advancements, Applications, and Challenges. SSRN. 2025 DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5111575>.
26. Wei J., Gong W., Xing J., Xu H. Distributed acoustic sensing technology in marine geosciences. *Intelligent Marine Technology and Systems.* 2024. Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00039-y>.
27. Yatsyniak I. I. Prohnozuvannia dohovichnosti elementiv burylnoi kolony z urakhuvanniam kryteriiu podobnosti vtomnoho ruinuvannia. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu.* 2018. No 1(47). P. 42–50. [in Ukrainian]
28. He Z., Liu Q. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review. *Journal of Lightwave Technology.* 2021. Vol. 39, No. 12. P. 3671–3686. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3059771>.
29. Han B., Guan H., Yao J., Rao Y., Ran Z., Gong Y., Li Q., Li M., Zhang R., An S., Yu G., Wang X. Distributed Acoustic Sensing With Sensitivity-Enhanced Optical Cable. *IEEE Sensors Journal.* 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3035002>
30. Vytiaz O. Iu. Rozvytok naukovykh osnov otsinky robozdatnosti kolon burylnykh ta hnuchkykh trub : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.05.12 «Mashyny naftovoi ta hazovoi promyslovosti». Ivano-Frankivsk : IFNTUNH, 2021. 180 p. [in Ukrainian]

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

Danyliuk N. Ya.

Post-graduate student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0003-8916-7690>

e-mail: d.nazarii97@gmail.com

Abstract. In the modern oil and gas industry, enhancing the durability of drilling rigs is a key factor in ensuring the efficiency and economic viability of resource extraction. Operations in harsh environments lead to intensive equipment wear, necessitating the use of advanced technologies for protection. One of the promising directions in this context is the implementation of Building Information Modeling (BIM) technologies, which contribute to improved lifecycle management of equipment, optimization of maintenance processes, and wear prediction. This article presents a comprehensive analysis of the impact of corrosive environments on drilling rig materials, identifies the main factors leading to the degradation of structural components, and examines current protection methods. Special attention is given to the use of anti-corrosion coatings, modified materials, and cathodic protection. Additionally, the article explores the potential of BIM technologies for real-time monitoring of drilling equipment, enabling timely defect detection, minimizing the risk of accidents, and extending equipment service life. The study demonstrates that integrating BIM models with predictive analytics and maintenance systems can significantly reduce repair costs and equipment downtime. This, in turn, enhances the overall efficiency of oil and gas enterprises and supports their sustainable development. The authors emphasize the importance of further research in digital modeling to increase the durability of drilling rigs and to develop new standards for equipment condition management. The findings may be useful for engineers involved in the design and operation of drilling equipment, as well as researchers exploring advanced material protection methods in the oil and gas sector. Further studies in this field have the potential to significantly improve equipment reliability and reduce operational costs, which is a critical factor for energy security and the economic stability of the industry.

Key words: failure risks; engineering monitoring; optimization; predictive technologies; Internet of Things; drilling operation safety.