УДК 667.021.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.38

А. М. ЧЕВЕРДА
аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0000-2812-6252

Н. Я. ДАНИЛЮК
аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0003-8916-7690

ВЗАЄМОДІЯ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ З ІСНУЮЧИМИ МЕТОДАМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

У статті висвітлюється роль BIM-технологій (Building Information Modeling) у трансформації традиційних процесів проєктування, будівництва та експлуатації свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) на всіх етапах їх життєвого циклу. Аналізується доцільність поєднання BIM із сучасними цифровими інструментами, серед яких Інтернет речей (IoT), технології великих даних (Big Data), штучний інтелект (AI), а також розширена й віртуальна реальність (AR/VR). Зокрема, розбираються переваги впровадження BIM у сфері нафтогазової промисловості, що охоплюють зменшення кількості проєктних помилок, покращення взаємодії між міждисциплінарними командами та автоматизацію операцій з технічного обслуговування. Окрему увагу приділено технічним і організаційним викликам, які виникають при інтеграції BIM із застарілими системами контролю (SCADA), а також питанням формування комплексної цифрової моделі для багатофакторного аналізу стану обладнання. Стаття містить приклади застосування технологій IoT та Big Data для збору й обробки великих обсягів даних про вібрацію, тиск і температурні режими, що дає змогу переходити від планово-профілактичних до проактивних стратегій обслуговування. Розглянуто переваги AI в побудові прогнозних моделей для зменшення відсотка аварійних ситуацій і підвищення енергоефективності насосних установок. Важливим аспектом є й потенціал AR/VR-рішень для вдосконалення навчання персоналу та оперативної підтримки спеціалістів безпосередньо на місці роботи, що істотно скорочує ймовірність помилок при монтажі та подальшій експлуатації. А матеріалах статті передбачається, що комплексна інтеграція BIM, IoT, Big Data, AI, AR та VR здатна модернізувати виробничі процеси у нафтогазовій галузі за рахунок більш точної візуалізації, надійнішого моніторингу й оптимізації функціонування СШНУ. При цьому акцентується увага на стратегічному значенні висококваліфікованого персоналу, обґрунтованому виборі обладнання та адаптивності інфраструктури для плавного переходу до цифрових платформ.

Потенційно, впровадження вказаних технологій, попри суттєві початкові витрати та необхідність масштабних організаційних змін, у довгостроковій перспективі забезпечує значний економічний ефект, знижує рівень ризиків і закладає основу для подальшої інноваційної еволюції нафтогазових підприємств.

Ключові слова: *BIM, Свердлильні штангові насосні установки (СШНУ), IoT, Big Data, Штучний інтелект (ШІ), AR, Нафтогазова промисловість.*

A. M. CHEVERDA
Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0000-2812-6252

N. YA. DANYLYUK
Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0003-8916-7690

INTERACTION OF BIM-TECHNOLOGIES WITH EXISTING METHODS OF INFORMATION SUPPORT IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

This article highlights the role of BIM-technologies (Building Information Modeling) in transforming the traditional processes of designing, constructing, and operating SVERDLYLNI SHTANHOVI NASOSNI USTANOVKY (SShNU, or sucker rod pumping units) at all stages of their life cycle. It analyzes the feasibility of integrating BIM with modern digital tools, among which are the Internet of Things (IoT), Big Data technologies, Artificial Intelligence (AI), as well as

© Чеверда А. М., Данилюк Н. Я., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Augmented and Virtual Reality (AR/VR). In particular, the article examines the advantages of implementing BIM in the oil and gas industry, covering the reduction of design errors, improved interaction among interdisciplinary teams, and the automation of maintenance operations.

Special attention is paid to the technical and organizational challenges arising when BIM is integrated with legacy control systems (SCADA), as well as to the issue of forming a comprehensive digital model for multifactor analysis of equipment conditions. The article contains examples of the use of IoT and Big Data technologies for the collection and processing of large volumes of data on vibration, pressure, and temperature regimes, enabling a shift from scheduled preventive maintenance to proactive service strategies. The advantages of AI are considered in building predictive models aimed at reducing the percentage of emergency situations and increasing the energy efficiency of pumping units. Another important aspect highlighted is the potential of AR/VR solutions for enhancing personnel training and providing operational support to specialists directly on-site, which significantly reduces the likelihood of errors during installation and subsequent operation.

The article posits that the comprehensive integration of BIM, IoT, Big Data, AI, AR, and VR can modernize production processes in the oil and gas industry through more accurate visualization, more reliable monitoring, and optimization of SShNU performance. At the same time, attention is drawn to the strategic importance of highly qualified personnel, the well-founded selection of equipment, and infrastructure adaptability for a smooth transition to digital platforms. Potentially, despite substantial initial costs and the need for large-scale organizational changes, the implementation of these technologies in the long term provides significant economic benefits, reduces risk levels, and lays the foundation for further innovative evolution in oil and gas enterprises.

Key words: *BIM, SVERDLYLNI SHTANHOVI NASOSNI USTANOVKY (SShNU), IoT, Big Data, Artificial Intelligence (AI), AR, Oil and Gas Industry.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах функціонування нафтогазового сектору одним із ключових викликів залишається підвищення ефективності експлуатації свердловинних штангових насосних установок (СШНУ). Висока частота відмов і аварій обладнання зумовлює істотні фінансові втрати та простої у виробництві. Традиційні підходи до проєктування таких систем, як правило, характеризуються значними часовими витратами та недостатньою точністю отриманих технічних рішень, що ускладнює забезпечення надійності конструкцій.

Крім того, наявні методи технічної діагностики та моніторингу елементів СШНУ мають обмежену здатність до раннього виявлення дефектів і потенційних відмов, що суттєво знижує ефективність систем управління ризиками. У зв'язку з цим виникає необхідність у впровадженні сучасних інформаційних технологій, здатних забезпечити високий рівень керованості витратами та якістю на всіх етапах життєвого циклу насосного обладнання.

Зростаючі вимоги до екологічної відповідальності та принципів сталого розвитку додатково посилюють потребу у трансформації традиційних підходів до технічного обслуговування та управління експлуатацією. У цьому контексті актуальним є створення інноваційних методів, що сприяють мінімізації негативного впливу на довкілля й одночасно підвищують ресурсну ефективність функціонування СШНУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Упродовж останнього десятиліття глобальні нафтогазові компанії активно інтегрують BIM-моделі з сенсорними мережами й аналітичними платформами. Так, ExxonMobil фокусується на поєднанні BIM із системами Big Data для прогнозного аналізу зношування агрегатів; Chevron демонструє пілотні проєкти, де BIM-модель СШНУ синхронізується з поточними вібраційними та температурними даними; Halliburton розробляє AR/VR-тренажери для безпечного навчання персоналу роботі з буровим обладнанням. Попри успіхи, досі лишаються невирішеними щонайменше дві важливі частини загальної проблеми:

Відсутність стандартизованих підходів до інтеграції динамічних IoT-потоків у BIM-середовище СШНУ в реальному часі;

Брак уніфікованих методик, що поєднують BIM і алгоритми машинного навчання для прогнозування залишкового ресурсу колони насосних штанг.

Формулювання мети дослідження

Сформулювати та обґрунтувати концепцію цілісної цифрової платформи, що інтегрує BIM-модель СШНУ з даними IoT-сенсорів, аналітикою Big Data та алгоритмами штучного інтелекту. Мета полягає у доведенні того, що така платформа в перспективі здатна підвищити характеристики роботи установки, знизити частоту аварій і скоротити непродуктивні простої, а також забезпечити прозору інформаційну підтримку рішень на всіх етапах життєвого циклу.

Основи BIM-технологій та їх роль у проєктуванні і управлінні СШНУ

BIM-технології (Building Information Modeling) являють собою комплексний метод створення та управління цифровими моделями об'єктів, що містять не лише геометричну, а й широку негеометричну інформацію про фізичні та функціональні характеристики [1]. У контексті свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) це означає, що в тривимірну модель включаються детальні дані про конструктивні особливості, матеріали та параметри експлуатації обладнання. Такий підхід дає змогу всім учасникам процесу – від інженерів і монтажників до

експлуатаційного персоналу – працювати з єдиним інформаційним середовищем на всіх етапах життєвого циклу СШНУ.

Завдяки BIM-моделі можна з високою точністю враховувати геометричні розміри, типи з'єднань, допустимі навантаження й інші критичні характеристики насосних елементів. Це допомагає зменшити ризик проєктних помилок, адже розбіжності між кресленнями і фактичними умовами виявляються вже на стадії віртуального моделювання. Крім того, BIM створює умови для швидкої взаємодії між інженерами та представниками суміжних дисциплін: наприклад, виробниками окремих компонентів чи фахівцями з монтажу і контролю якості.

Якщо під час моделювання виявляються потенційні колізії або невідповідності, вони можуть бути усунені задовго до того, як розпочнуться реальні будівельні або монтажні роботи.

У післяпроєктній фазі BIM-модель СШНУ інтегрується з іншими цифровими інструментами, про які йдеться в нашій статті: IoT-сенсорами, аналітикою Big Data, алгоритмами штучного інтелекту (AI), а також AR/VR-технологіями. Така інтеграція дає змогу в режимі реального часу відстежувати робочі параметри насосної установки (тиск, вібрацію, температуру тощо), створювати алгоритми прогнозного обслуговування та оперативно реагувати на відхилення від нормального режиму. Взаємозв'язок BIM із системами моніторингу та управління (у тому числі SCADA) полегшує підтримку актуальності цифрової моделі: вносяться уточнення про замінені деталі, модернізовані вузли чи нові показники зносу. Це сприяє переходу від планово-профілактичного обслуговування до проактивного підходу, коли обслуговування проводиться саме тоді, коли його вимагає реальний стан обладнання.

Загалом, впровадження BIM-технологій у сфері СШНУ є фундаментом для подальшої цифрової трансформації нафтогазової промисловості

Проєктування СШНУ

Застосування BIM дозволяє враховувати широкий спектр технічних нюансів на етапі проєктування СШНУ. Тривимірна модель відображає всі ключові компоненти системи, що мінімізує кількість помилок ще до початку фізичного будівництва або монтажу. Крім того, BIM забезпечує єдине джерело актуальної інформації, доступне всім учасникам проєкту – від інженерів і будівельників до замовників і операторів [3].

Управління та експлуатація СШНУ

Після введення в експлуатацію модель BIM може використовуватися для планування та виконання технічного обслуговування, аналізу ефективності роботи СШНУ і швидкого реагування на несправності [2]. Завдяки цифровому опису елементів установки технічний персонал отримує доступ до історії кожного компонента (дата встановлення, останній ремонт, прогнозований ресурс тощо). Таке централізоване середовище потенційно покращує комунікацію між відділами та мінімізує ймовірність дублювання або втрати інформації.

Обмеження BIM у контексті СШНУ

Незважаючи на очевидні переваги, застосування BIM у проєктах СШНУ стикається з низкою обмежень:

• **Складність інтеграції з наявними системами**

Більшість підприємств нафтогазового сектору уже мають розгорнуті SCADA-системи, системи контролю та моніторингу, не завжди сумісні з BIM-платформами. Адаптація BIM під специфічні процеси СШНУ може вимагати додаткових налаштувань, переформатування даних або оновлення програмного забезпечення [4].

• **Високі початкові витрати**

Ліцензійні програми, потужні апаратні засоби та навчання персоналу потребують значних інвестицій. Невеликі компанії або регіональні проєкти нерідко відкладають упровадження BIM саме через фінансові бар'єри.

• **Складність підтримки точних цифрових моделей**

СШНУ є динамічними системами, параметри яких можуть змінюватися з часом (зношування, модернізація, зміна режимів роботи). Для утримання актуальної BIM-моделі потрібен безперервний потік даних і регулярне оновлення, що вимагає додаткових ресурсів і чітко вибудуваних процесів [5].

• **Нестабільність форматів і протоколів**

На ринку існує чимало програмних рішень і форматів даних для BIM. Забезпечення сумісності між різними версіями ПЗ часто ускладнює співпрацю між підрядниками, розташованими в різних регіонах або належними до різних корпорацій.

Таким чином, для успішного впровадження BIM у сфері СШНУ необхідно врахувати організаційні, технічні та фінансові аспекти, а також забезпечити належну підтримку актуальних цифрових моделей упродовж усього життєвого циклу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Подальший текст демонструє концепцію на прикладі повного життєвого циклу СШНУ – від проєктування та виготовлення компонентів до монтажу, експлуатації й планових ремонтів. Показано, як BIM-модель слугує ядром інформаційного обміну між конструкторськими, технологічними та експлуатаційними підрозділами; наведено приклади інтеграції поточних даних моніторингу у цифрову модель установки та як аналіз цих даних дозволяє своєчасно виявляти зони підвищених навантажень. Окрема увага приділена тому, як аналітичні інструменти BIM допомагають оптимізувати графіки обслуговування й підвищувати ефективність роботи системи.

Інтеграція BIM з іншими сучасними технологіями

BIM-технології особливо ефективні в поєднанні з іншими цифровими підходами: Інтернетом речей (IoT), великими даними (Big Data), штучним інтелектом (AI), а також AR/VR-рішеннями. Саме комплексне впровадження дозволяє досягти синергетичного ефекту та підвищити результативність управління СШНУ.

Інтернет речей (IoT)

Впровадження IoT у контексті СШНУ полягає в установці сенсорів для збору даних про ключові параметри (температуру, тиск, вібрацію тощо) у реальному часі. Отримана інформація передається в централізовану систему, інтегровану з BIM-моделлю, де всі дані відображаються у вигляді віртуальної копії установки [6].

- **Моніторинг стану обладнання.** Сенсори оперативно фіксують будь-які відхилення від нормальних режимів роботи. Це дозволяє своєчасно виявляти потенційні поломки та планувати ремонт або технічне обслуговування ще до виникнення аварійної ситуації.
- **Оптимізація обслуговування.** Завдяки поточним показникам у BIM-моделі можна в реальному часі бачити завантаженість кожного елемента системи, що сприяє переходу від планово-профілактичних робіт до ремонту за фактичним станом.
- **Покращення безпеки.** Автоматичний збір і аналіз даних знижує ризик людської помилки, а швидка реакція на аномальні показники сприяє збереженню цілісності обладнання та здоров'я персоналу.

Аналіз даних та великі дані (Big Data): використання великих даних у поєднанні з BIM для оптимізації процесів

Великі дані (Big Data) та відповідні аналітичні інструменти дозволяють обробляти й аналізувати великі обсяги інформації, що надходять від датчиків IoT, історичних записів, експлуатаційних журналів тощо [7].

- **Прогнозне обслуговування.** Завдяки аналізу даних за допомогою спеціалізованих алгоритмів можна ідентифікувати закономірності, що передують збоям. Це дає змогу визначити оптимальні строки для планового обслуговування та зменшити ризик аварій.
- **Оптимізація режимів роботи.** Big Data допомагають виявити «вузькі місця» у СШНУ – наприклад, надмірне навантаження на окремі елементи системи. Аналіз зібраної інформації дозволяє розробити рекомендації для балансування робочих параметрів у реальному часі.
- **Покращене проєктування.** Вивчаючи історичні дані про роботу вже існуючих СШНУ, інженери можуть ефективніше розробляти нові установки з урахуванням реальних режимів експлуатації та виявлених раніше проблем [8].

Рис. 1. Схема компонентів Інтернету Речей (IoT) [9]

Інтелектуальні системи (AI): можливості штучного інтелекту у прогнозуванні і покращенні ефективності СШНУ

Штучний інтелект (AI) дає змогу автоматизувати обробку масивів інформації та формувати прогнози, що ґрунтуються на аналізі історичних і поточних даних [https://www.chevron.com/technology/chevrons-ai- initiatives-for-enhanced- operational-efficiency].

- **Моделі машинного навчання.** Алгоритми ML та глибинного навчання можуть з високою ймовірністю «передбачати» несправності, виявляти аномальні режими роботи й оптимізувати управління СШНУ в режимі реального часу.
- **Планування обслуговування.** AI-системи пропонують найбільш раціональні стратегії обслуговування, спираючись на аналіз тенденцій зношування обладнання та умов експлуатації (навантаження, температурні режими, склад видобутої рідини тощо).

- **Автоматизація управлінських процесів.** Завдяки AI можна налаштувати «розумну» систему керування насосами, що самостійно змінює швидкість або режими роботи залежно від поточних показників (тиску, дебіту свердловини, температури тощо).

Розширена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR): вплив AR та VR на візуалізацію та управління СШНУ

Технології VR та AR відкривають нові можливості для навчання, діагностики, ремонту й управління СШНУ [10].

- **Віртуальна реальність (VR) для проєктування та навчання.** Завдяки VR можна створювати детальні симуляції СШНУ у 3D-просторі, що дозволяє персоналу «попрацювати» з установкою ще до її фактичного монтажу. Це зменшує ризик помилок і прискорює освоєння складного обладнання [11].
- **Розширена реальність (AR) для обслуговування.** Використовуючи AR-окуляри або мобільні пристрої з камерою, фахівці можуть бачити «нашаровані» підказки та інструкції на реальне обладнання під час ремонтних чи налаштувальних робіт. Це знижує ймовірність некоректних дій і скорочує час на пошук необхідної документації.
- **Спільна робота над проєктом.** AR і VR дозволяють різним командам (інженерам, монтажникам, операторам) перебувати «в одній моделі» незалежно від фізичного розташування, що суттєво прискорює процес погодження рішень і дає змогу миттєво вносити зміни у цифрову модель СШНУ.

Переваги та виклики інтеграції

Переваги:

1. Підвищення точності.

Тривимірні BIM-моделі в поєднанні з даними від IoT-сенсорів та аналітикою Big Data створюють повноцінне «цифрове дзеркало» СШНУ, що дає змогу оперативно виявляти навіть незначні відхилення [7].

2. Зменшення витрат.

Використання VR-тренажерів для навчання, прогнозних алгоритмів на базі AI та систем моніторингу IoT дозволяє скоротити нераціональні витрати на обслуговування й уникнути дорогих поломок завдяки вчасній діагностиці [12].

3. Поліпшення управлінських процесів.

BIM забезпечує актуальний єдиний інформаційний простір, IoT підживлює його «свіжими» даними, а Big Data й AI дають змогу швидко й обґрунтовано приймати рішення щодо оптимізації режимів роботи СШНУ. Водночас AR/VR прискорюють навчання персоналу та скорочують час на виконання складних виробничих завдань.

Виклики:

1. Складність інтеграції.

Злиття BIM-платформи з наявними системами контролю (SCADA), сенсорними мережами й аналітичними інструментами часто вимагає доопрацювання інфраструктури, конвертації форматів даних і розробки нового ПЗ.

2. Потреба в додаткових навичках.

Персоналу необхідно освоювати роботу з інструментами AR/VR, алгоритмами AI та аналітичними інструментами Big Data. Це потребує часу й фінансових вкладень у навчальні програми [3].

3. Витрати на впровадження.

Застосування високотехнологічних рішень передбачає витрати на сучасне обладнання, ліцензійне ПЗ, розгортання сенсорних систем, а також довготривалу технічну підтримку, що може бути обтяжливим для компаній зі скромним бюджетом.

Практичні приклади та кейси

У проєкті компанії ExxonMobil на платформі Liza Destiny, що розташована в офшорному регіоні Гаяни, було реалізовано інтеграцію BIM-моделі з мережею IoT-сенсорів, які фіксують ключові параметри насосних систем у режимі реального часу. Це дало змогу оперативно виявляти відхилення від нормальних робочих показників і планувати відповідні ремонтні або профілактичні заходи задовго до появи серйозних збоїв. Докладніше про цей проєкт можна дізнатися з офіційних матеріалів ExxonMobil [13].

Аналогічний підхід застосовується компанією TotalEnergies у межах одного з нафтогазових проєктів у Катарі, де завдяки розташованим на свердлильних штангових насосних установках сенсорам забезпечується постійний моніторинг температури й тиску. Отримані дані інтегруються в BIM- середовище, що дає змогу керівникам швидко візуалізувати стан обладнання і коригувати режими роботи. Відомості про ініціативи TotalEnergies у цифровізації нафтогазової діяльності можна знайти на офіційному ресурсі компанії [14].

У разі нафтогазового проєкту в регіоні Сахари (Алжир) було впроваджено комплексну систему контролю насосів і трубопроводів, де дані від датчиків (у тому числі про вібраційні навантаження та тиск) потрапляють у BIM-модель для спільного аналізу. Така комбінація дає змогу прогнозувати місця найвищого зносу і передбачати профілактичні заміни деталей або вузлів.

Один із публічних звітів щодо використання цифрових технологій у нафтогазових проєктах у Північній Африці доступний за посиланням [15].

Компанія BP реалізує цифрову трансформацію бурових платформ у Північному морі, поєднуючи потоки даних із сенсорів і BIM-моделі. Це дає змогу відстежувати технічний стан обладнання, зокрема СШНУ, в оперативному режимі й одразу виявляти потенційні загрози або ознаки зношення вузлів [16]. У Chevron, натомість, фокус зроблено на AI-ініціативах, що дають змогу аналізувати сигнали з численних сенсорів СШНУ і прогнозувати можливі збої. Такі підходи суттєво знижують загальну вартість ремонтів і мінімізують ризики аварійних зупинок [17].

У свою чергу, Halliburton приділяє значну увагу саме технологіям віртуальної реальності, створюючи тренажери для навчання персоналу роботі з буровим обладнанням і насосними установками в безпечному симульованому середовищі. Цей напрям дає змогу скоротити час на адаптацію співробітників і зменшує ризики помилок під час реальних операцій, про що йдеться в офіційних матеріалах компанії [18]. У підсумку кожен із наведених прикладів підтверджує, що завдяки інтеграції BIM із сучасними цифровими інструментами (IoT, Big Data, AI, AR/VR) нафтогазові компанії отримують дієві механізми для моніторингу, прогнозування й оптимізації роботи свердлильних штангових насосних установок.

Для створення і використання ефективних систем інформаційної підтримки життєвого циклу виробів необхідно застосовуати системний підхід і досягення загальної теорії систем [46]. Такі системи повинні об’єднувати різноманітні інформаційні ресурси (таблиця 1).

В основному знання про СШНУ розташовані в науковій, навчальній та довідковій літературі. Для використання в інформаційній системі необхідна їхня формалізація знань та розташування у базі знань. Для цього можна застосувати логіку предикатів, семантичні мережі, мови RDF/OWL [19][56].

У зв’язку з втомою штанг центральне місце в проектуванні СШНУ займає розрахунок навантажень на штангову колону. Для цього використовуються номограми, формули Міллса, Слонегера, Вірновського. Рішмюллер [57] вказує, що розрахунок СШНУ за методом Міллса-Слонегера дає занадто занижені значення крутного моменту і максимального навантаження на полірований шток. Автори приходять до висновку, що під час розрахунку потрібно враховувати емпіричні дані (практичні динамограми), як це робиться в методі API (стандарт API PR 11L). Це пояснюється складністю і різноманітністю процесів, що відбуваються в СШНУ, і вказує на необхідність постійної обробки динамометричних вимірювань за допомогою комп’ютера. Інтерпретація динамограм дає надзвичайно важливу інформацію про стан СШНУ [58]. Перспективним є застосування машинного навчання для інтерпретації динамограм [59]. Машинне навчаня можна також застосовувати для аналізу спожитої енергії двигуна [58]. Підвищити точність розрахунку можна за допомогою динамічних моделей СШНУ, зокрема моделей СШНУ, які розроблені мовою Modelica. Дуже багато факторів впливає на вибір насосу [59]. У зв’язку з цим необхідним є або реалістичне моделювання гідродинамічних процесів в насосі (з використанням методів CFD) або якісні статистичні моделі, зібрані за великою кількістю емпіричних даних. Усі ці засоби автоматизації проектних рішень можуть бути інтегровані в BIM шляхом створення прикладних компонентів BIM за допомогою інтерфейсів прикладного програмування (API).

Виготовлення насосних штанг – це складний багатофакторний процес, що починається виплавленням сталі і закінчується їхнім пакуванням. Підвищити ефективність проектування таких процесів дозволяють системи автоматизованого проектування технологічих процесів (САПР ТП та CAM-системи). Під час виробництва необхідним є автоматизований контроль якості – контроль структури матеріалу, магнітно-порошкова дефектоскопія, рентгеноскопія зварних штанг. Сучасні технології «Інтернету речей» дозволяють автоматизувати контроль за дотриманням правил поводження зі штангами. Наприклад за допомогою недорогих сенсорів можливо легко контролювати, чи були під час транспортування і спуску недопустимі удари по штангам. Автоматичний контроль якості поверхні штанг можна також реалізувати за допомогою сенсорів, розташованих безпосередньо на гирлі. Досягнення сучасних BIM можуть бути використані для інформаційної підтримки ЖЦ виробничих площ для виробництва насосних штанг.

Центральну роль під час експлуатації повинні відігравати системи автоматичного керування і моніторингу технічного стану, які також можна інтегрувати в BIM. Сучасні методи збору і аналізу даних з різних сенсорів СШНУ дозволяють отримати цілісну картину її технічного стану і приймати ефективні рішення.

Висновки

Інтеграція BIM-технологій із сучасними цифровими рішеннями (IoT, Big Data, AI, AR/VR) відкриває нові можливості для ефективного управління свердлильними штанговими насосними установками у нафтогазовій промисловості. Завдяки BIM-фокусуванню на створенні актуальних та детальних цифрових моделей об’єкта, а також постійному збору даних у реальному часі, компанії можуть краще контролювати стан обладнання, вчасно виявляти та усувати несправності, оптимізувати режими експлуатації й навчати персонал із мінімальними ризиками.

Разом з тим існують і суттєві виклики: технічна складність інтеграції, витрати на впровадження та потреба у висококваліфікованих кадрах. Утім, світовий досвід реальних кейсів (ExxonMobil, BP, Chevron, TotalEnergies та ін.) демонструє, що за умови грамотного планування й належного ресурсного забезпечення впровадження BIM

Таблиця 1

Застосування BIM та інших інформаційних технологій для інформаційної підтримки ЖЦ СШНУ

Етап ЖЦ	Засоби і методи інформаційної підтримки
1. Проектування деталей та вузлів	Інформаційні системи, що акумулюють відомості про дефекти та проблеми якості деталей [19][20][21]
Вибір приводу	Цифрова діаграма Адоніна забезпечує автоматизований підбір насосного обладнання та оптимальних режимів експлуатації залежно від глибини занурення насоса й дебіту свердловини. Використовуються бази даних, що містять технічні характеристики приводів, а також кінематичні моделі їхньої роботи [22][23]
Вибір насосу	Інформаційна база щодо параметрів свердловини дає змогу визначити її клас. Для підбору насосного обладнання використовується цифрова діаграма Адоніна. Автоматизовано процес розрахунку посадкової групи насоса з урахуванням в'язкості рідини, глибини занурення та інших технологічних чинників. Теоретична подача насоса визначається на основі формули Вірновського, а коефіцієнт подачі та гідравлічні втрати в клапанах розраховуються із застосуванням CFD-моделі гідродинамічного аналізу клапанних вузлів [24]
Проектування колони насосних штанг	Автоматизований розрахунок навантажень на головку балансира може виконуватись як за аналітичними залежностями Вірновського, так і з використанням динамічних моделей СШНУ [25][26][27][28][29][30]. Одним із підходів є застосування компонентно-орієнтованої динамічної моделі установки, реалізованої мовою Modelica [31][32]. Для розрахунків використовуються криві Веллера, побудовані на основі експлуатаційних спостережень [33], а також бази даних і статистичні моделі, що відображають відмови насосних штанг [34]
Боротьба з газом і піском, парафіном, інтенсифікація видобування	Оптимізація конструктивних параметрів насосів, а також вибору газових і пісочних якорів здійснюється з урахуванням умов експлуатації. Удосконалення методів інтенсифікації видобутку базується на аналізі емпіричних даних. Застосовуються також прогностичні методики для оцінювання ризику парафінових відкладень у насосно-компресорному обладнанні [35]
2. Виробництво компонентів	Системи автоматизованого проєктування технологічних процесів (САПР ТП), CAM-технології та засоби автоматизованого контролю якості продукції
Технологічний процес виробництва штанг	Процес проєктування технології виготовлення насосних штанг реалізується в автоматизованому режимі. В рамках цього процесу виконується підбір ефективних методів зміцнення матеріалу [36]. Контроль якості штанг здійснюється з використанням автоматизованих систем технічного діагностування [37]
3. Монтаж	BIM-технології використовуються для створення тривимірних інформаційних моделей СШНУ із застосуванням візуалізаційних засобів, що дозволяють детально опрацьовувати схеми монтажу верстатів-качалок. У середовищі BIM реалізується автоматизоване проєктування фундаментів, монтажних вузлів рами, стійки, балансиру, а також забезпечується точне центрування конструкції відносно гирла свердловини
4. Експлуатація	Системи автоматизованого керування роботою свердловинних штангових насосних установок [38][39][40]
Балансуваня приводу, оптимізація режимів	Цифровий двійник СШНУ, створений на основі динамічної моделі, дозволяє виконувати оптимізацію процесів балансування установки [41], а також підбір ефективних режимів відкачування [42][43], у тому числі з використанням динамічних моделей роботи насосної системи
Моніторинг технічного стану	Системи автоматичного контролю продукції забезпечують моніторинг параметрів тиску [44], витрати рідини та температури шляхом збору даних з дистанційних манометрів, витратомірів і температурних сенсорів, встановлених на свердловині. Застосовуються статистичні методи аналізу зібраної інформації для виявлення відхилень у роботі обладнання. Аналіз динамограм, ватметрограм, вібраційних характеристик приводу та редуктора, а також температури і стану мастильних матеріалів у редукторі здійснюється з використанням систем автоматичного контролю якості мастила [45][46][47][48]. Технології моніторингу технічного стану вперше були впроваджені компанією Shell [49].
5.Обслуговування і ремонт	Системи автоматичного контролю дотримання вимог техніки безпеки передбачають перевірку стану захисних огорож, вимкненого режиму обладнання, справності гальмового механізму, наявності попереджувальних написів, а також використання сенсорів для виявлення присутності персоналу в зонах підвищеної небезпеки. Додатково здійснюється контроль функціонування системи заземлення та інших критично важливих елементів безпеки. Для забезпечення належного обслуговування та ремонту СШНУ впроваджуються системи моніторингу технічного стану обладнання. Процес дослідження свердловини автоматизується, зокрема шляхом визначення рівня рідини за допомогою ультразвукових вимірювальних пристроїв (ехолотів). Організація ремонтних майстерень для обслуговування СШНУ та насосів виконується із застосуванням BIM-технологій. Збір інформації про відмови обладнання супроводжується статистичним аналізом відповідних даних [50]. Для проєктування технологічних процесів ремонту використовуються системи автоматизованого проєктування технологій (САПР ТП)
Технічне діагностування	Обробка результатів неруйнівного контролю здійснюється з використанням відповідних аналітичних методів і програмних засобів [51][52][53]. Для ідентифікації критичних сценаріїв відмов застосовується метод аналізу «дерева відмов» [54]. У процесі діагностики використовуються бази знань, що акумулюють інформацію про відмови приводів та свердловинного обладнання [55]

у комплексі з IoT, Big Data, AI та AR/VR істотно підвищує конкурентоспроможність і надійність нафтогазових операцій, забезпечуючи довгострокову економічну й технічну вигоду.

Список використаної літератури

1. Robert J., Kubler S., Kolbe N. Відкрита екосистема IoT для підвищення взаємодії у «розумних» містах: приклад метрополії Ліон // Sensors. 2017. Vol. 17, № 12. С. 2849. Доступно за посиланням: https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2849.
2. IoT для «розумних» міст: систематичний огляд і перспективи розвитку // Sustainable Technology and Entrepreneurship. 2022. Vol. 1, № 2. Стаття 100089. Доступно: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891.
3. Davtalab O., Kazemian A. Перспективи BIM-інтегрованої програмної платформи для роботизованого будівництва методом Contour Crafting // Automation in Construction. 2018. Vol. 89. С. 13–23. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006
4. Огляд застосувань цифрових двійників у виробництві // Computers in Industry. 2020. Vol. 123. Стаття 103216. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103216
5. Цифрова трансформація у виробництві: Індустрія 4.0 та кіберфізичні системи // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, № 2. С. 105–110. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.09.037
6. Блокчейн-орієнтований IoT для «розумних» міст: систематичний огляд і перспективи розвитку // Sustainable Technology and Entrepreneurship. 2022. Vol. 1, № 2. Стаття 100089. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891
7. El-Husseiny A., Vega S., Nizamuddin S. Вплив складності порової структури та історії насичення на зміни акустичної швидкості у карбонатах // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 179. С. 176–190. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.019
8. Li X., Jiang M., Lin C., Chen R. Інтегрована платформа BIM–IoT для оцінювання та відстеження вуглецевих викидів у збірному будівництві // Automation in Construction. 2018. Vol. 89. С. 24–35. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006
9. Wang S-H., Wang H-P., Wang W-C., Huang S-C. Вплив рівнів використання BIM на показники проєкту: публічні будівництва Тайваню // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2024. Стаття 4052899. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824052899.
10. Halliburton. Імерсивні VR-рішення для навчання. Доступно: https://www.halliburton.com/en/news-releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions
11. TotalEnergies. Інновації. https://www.totalenergies.com/innovation
12. ExxonMobil. Новини. https://corporate.exxonmobil.com/news
13. TotalEnergies. Інновації. https://www.totalenergies.com/innovation
14. Shokri R., Theodorakopoulos G., Troncoso C. Ігри конфіденційності уздовж маршрутів місцеположення: ігрова модель оптимізації просторової приватності // ACM Transactions on Privacy and Security. 2016. Vol. 19, № 4. Стаття 11. https://www.researchgate.net/publication/311759480
15. BP. Цифрова трансформація. https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/reimagining-energy/bp-digital-transformation.html
16. Chevron. Ініціативи зі штучного інтелекту для підвищення операційної ефективності. https://www.chevron.com/technology/chevrons-ai-initiatives-for-enhanced-operational-efficiency
17. Halliburton. Імерсивні VR-рішення для навчання. https://www.halliburton.com/en/news-releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions
18. Копей В. Б., Палійчук І. І. Застосування Python для побудови баз знань з надійності ШСНУ // Нафтогазова енергетика. 2011. № 2(15). С. 12–18.
19. Hoffman E. L. Скінченно-елементний аналіз муфт насосних штанг з рекомендаціями щодо підвищення втомної довговічності. Sandia Report. 1997. 66 с.
20. Копей В. Б. Розроблення та аналіз параметричних CE-моделей різьбових з'єднань в Abaqus® // Нафтогазова енергетика. 2010. № 1(12). С. 31–36.
21. Wang S., Rowlan L., Cook D. та ін. Динаміка балансира насосних установок: теорія та експерименти // Upstream Oil and Gas Technology. 2023. Vol. 11. Стаття 100097.
22. Takacs G. Точний кінематичний і крутильний аналіз насосних установок Rotaflex // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2014. Vol. 115. С. 11–16.
23. Копей В. Б. Науково-методологічні основи автоматизованого проєктування обладнання ШСНУ: дис. … д-ра техн. наук. Івано-Франківськ, 2009. 2 ч.
24. Gibbs S. G. Штангове насосне обладнання: сучасні методи проєктування, діагностики та нагляду. 2012. 660 с.

25. Wang S., Rowlan L., Cook D. та ін. Вплив типів з'єднань штанг на динаміку балансира // Petroleum Research. 2024. Стаття 100097.

26. Eisner P., Langbauer C., Fruhwirth R. K. Порівняння нового FEM-підходу для визначення динамометричних карт // Upstream Oil and Gas Technology. 2022. Vol. 9. Стаття 100078.

27. Yin J-J., Sun D., Yang Y-S. Прогнозування багатозонних ШСНУ за аналітичним розв'язком // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 197. Стаття 108115.

28. Lv X., Wang H., Zhang X. та ін. Еквівалентна модель вібрацій для гібридних волоконних штанг // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 207. Стаття 109148.

29. Miska S., Sharaki A., Rajtar J. Модельна оптимізація ШСНУ // Journal of Petroleum Science and Engineering. 1997. Vol. 17, № 3–4. С. 303–312.

30. Копей В. Б., Копей Б. В., Кузьмін О. О. Побудова моделі ШСНУ у MapleSim 7 // Науковий вісник ІФНТУНГ. 2017. № 2(43). С. 42–52.

31. Rischmüller G., Mayer H. Видобування нафт штанговими насосами. Ternitz: Schoeller-Blackman GmbH, 1988. 150 с.

32. Копей В. Б. Прогнозування циклічної довговічності штанг на основі ML // Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 283. Стаття 109161.

33. Tian H., Deng S., Wang C., Ni X. Прогнозування відкладень парафіну у ШСНУ на основі CNN // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 206. Стаття 108986.

34. Zhang O. Контроль дефектів штанг методом витоку магнітного потоку // Journal of Software. 2019. Vol. 11, № 4.

35. Hansen B., Tolbert B., Vernon C., Hedengren J. D. MPC-керування ШСНУ: симуляційне дослідження // Computers & Chemical Engineering. 2019. Vol. 121. С. 265–284.

36. Torres L. H. S., Schnitman L. Моделювання та керування ШСНУ // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Vol. 46, № 24. С. 260–265.

37. Torres L. H. S., Schnitman L., de Souza J. A. M. Адаптивне керування на основі еталонної моделі для ШСНУ // IFAC Proceedings Volumes. 2010. Vol. 43, № 17. С. 231–236.

38. Takacs G., Kis L. Оптимальне зрівноважування насосних установок із розрахунком крутного моменту // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 205. Стаття 108792.

39. Takács G. Критичний аналіз енергетичних умов ШСНУ // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 210. Стаття 110061.

40. Liu X., Qi Y. Сучасний підхід до вибору ШСНУ в вугільних пластах // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011. Vol. 76, № 3–4. С. 100–108.

41. Codas A., Ordoñez B., Moreno U. F. Виявлення та ізоляція несправностей ШСНУ за вибійним тиском // IFAC Proceedings Volumes. 2009. Vol. 42, № 8. С. 1031–1036.

42. Lv X., Feng L., Wang H., Liu Y., Sun B. Кількісна діагностика ШСНУ за механізмом несправностей // Journal of Process Control. 2021. Vol. 104. С. 40–53.

43. Zhang R., Yin Y., Xiao L., Chen D. Оперативна діагностика системи пласт–свердловина–поверхня для Ш

44. Huang Z., Li K., Xu Z., Yin R., Yang Z., Mei W., Bing S. STP-Model: напівконтрольована схема з самонавчанням для діагностики несправностей глибинних систем ШСНУ // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Т. 135. Стаття 108802. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108802

45. Lv X., Wang H., Zhang X., Liu Y., Jiang D., Wei B. Еволюційний метод SVM для діагностики несправностей у системах ШСНУ // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Т. 203. Стаття 108806. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108806

46. Лопатін В. В. Наукові основи розроблення системи контролю технічного стану жорсткого армування шахтних стовбурів: дис. … д-ра техн. наук. Дніпро, 2012. 392 с.

47. Chu X., Wang X., Xie Y., Xing G., Chen L. Виявлення асоціативних правил для довготривалої роботи ШСНУ // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Т. 245. Стаття 110026. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110026

48. Botvina L. R., Tyutin M. R., Sinev I. O., Bolotnikov A. I. Вплив попереднього циклічного навантаження на акустичні параметри та пошкодження сталей // Procedia Structural Integrity. 2020. Т. 28. С. 2118–2125. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.038

49. Zhang O. Контроль дефектів тіла штанги методом витоку магнітного потоку // Journal of Software. 2019. Т. 11, № 4.

50. Копей Б. В., Копей В. Б., Мартинець О. Р., Стефанишин О. І., Стефанишин А. Б. Застосування «дерева відмов» для аналізу ШСНУ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 2(47). С. 62–71.

51. Jiang J., Wan X., Li K., Du J., Liu Y., Jing J., Li J. Огляд методів виявлення та прогнозування руйнування насосних штанг // Engineering Failure Analysis. 2024. Т. 159. Стаття 108119. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108119

52. Копей В. Б., Онисько О. Р., Панчук В. Г. Принципи розроблення PLM-системи для різьбових з'єднань з використанням Python // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1426. Стаття 012033. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012033

53. Rischmüller G., Mayer H. Видобування нафти штанговими насосами. Ternitz : Schoeller-Blackman GmbH, 1988. 150 с.

54. He Y-P., Cheng H-B., Zeng P. та ін. Розпізнавання режимів роботи ШСНУ на основі 4-вимірної ознаки та глибинного навчання // Petroleum Science. 2024. Т. 21, № 1. С. 641– 653. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.08.031

55. He Y-P., Zang C-Z., Zeng P., Wang M-X., Dong Q-W., Wan G-X., Dong X-T. Few-shot розпізнавання режимів роботи ШСНУ // Petroleum Science. 2023. Т. 20, № 2. С. 1142–1154. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.02.017

56. Lv X-X., Wang H-X., Xin Z., Liu Y-X., Zhao P-C. Адаптивна діагностика несправностей ШСНУ на основі оптимального перцептрона // Petroleum Science. 2022. Т. 19, № 2. С. 743– 760. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.012

57. Correia da Silva D., de Araújo C. R. B., de Oliveira Freitas J. C. та ін. Нові мікроемульсійні системи для видалення фільтрувального осаду // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Т. 193. Стаття 107425. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107425

58. Zheng B., Gao X., Li X. Виявлення несправностей ШСНУ за споживаною потужністю двигуна // Control Engineering Practice. 2019. Т. 86. С. 37–47. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.001.

59. Zhang O. Контроль дефектів тіла штанги методом витоку магнітного потоку // Journal of Software. 2019. Т. 11, № 4.

References

1. Robert, J., Kubler, S., & Kolbe, N. (2017). Open IoT ecosystem for enhanced interoperability in smart cities: Example of Métropole de Lyon. Sensors, 17(12), 2849. https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2849

2. Blockchain-driven IoT for smart cities: Systematic review and future directions. (2022). Sustainable Technology and Entrepreneurship, 1(2), 100089. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891

3. Davtalab, O., & Kazemian, A. (2018). Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting. Automation in Construction, 89, 13–23. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006

4. A review of digital twin applications in manufacturing. (2020). Computers in Industry, 123, 103216. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103216

5. Digital transformation in manufacturing: Industry 4.0 and cyber-physical systems. (2020). IFAC- PapersOnLine, 53(2), 105–110. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.09.037

6. Blockchain-driven IoT for smart cities: Systematic review and future directions. (2022). Sustainable Technology and Entrepreneurship, 1(2), 100089. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891

7. El-Husseiny, A., Vega, S., & Nizamuddin, S. (2019). Effect of pore-structure complexity and saturation history on acoustic-velocity variations in carbonates. Journal of Petroleum Science and Engineering, 179, 176–190. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.019

8. Li, X., Jiang, M., Lin, C., & Chen, R. (2018). Integrated BIM–IoT platform for carbon- emission assessment in prefabricated building materialization. Automation in Construction, 89, 24–35. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006

9. Wang, S.-H., Wang, H.-P., Wang, W.-C., & Huang, S.-C. (2024). Impact of BIM usage levels on project performance: Public-construction projects in Taiwan. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 4052899. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824052899

10. Halliburton. (n.d.). Halliburton immersive VR training solutions. https://www.halliburton.com/en/news- releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions

11. TotalEnergies. (n.d.). Innovation. https://www.totalenergies.com/innovation

12. ExxonMobil. (n.d.). News. https://corporate.exxonmobil.com/news

13. TotalEnergies. (n.d.). Innovation. https://www.totalenergies.com/innovation

14. Shokri, R., Theodorakopoulos, G., & Troncoso, C. (2016). Privacy games along location traces: A game-theoretic framework for optimizing location privacy. ACM Transactions on Privacy and Security, 19(4), 11. https://www.researchgate.net/publication/311759480

15. BP. (n.d.). BP digital transformation. https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/reimagining-energy/bp-digital-transformation.html

16. Chevron. (n.d.). Chevron's AI initiatives for enhanced operational efficiency. https://www.chevron.com/technology/chevrons-ai-initiatives-for-enhanced-operational-efficiency

17. Halliburton. (n.d.). Halliburton immersive VR training solutions. https://www.halliburton.com/en/news-releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions

18. Kopei, V. B., & Paliichuk, I. I. (2011). Application of the Python programming language for building knowledge bases on reliability and durability of sucker-rod pumping units. Naftohazova Enerhetyka, 2(15), 12–18.

19. Hoffman, E. L. (1997). Finite element analysis of sucker rod couplings with guidelines for improving fatigue life (Sandia report). Albuquerque: Sandia National Laboratories.

20. Kopei, V. B. (2010). Development and analysis of parametric finite-element models of threaded connections in Abaqus®. Naftohazova Enerhetyka, 1(12), 31–36.

21. Wang, S., Rowlan, L., Cook, D., Conrady, C., King, R., & Taylor, C. A. (2023). Dynamics of pump jacks with theories and experiments. Upstream Oil and Gas Technology, 11, 100097. https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100097

22. Takacs, G. (2014). Exact kinematic and torsional analysis of Rotaflex pumping units. Journal of Petroleum Science and Engineering, 115, 11–16. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.02.008

23. Kopei, V. B. (2009). Scientific and methodological bases for automated design of sucker-rod pumping-unit equipment (Doctoral dissertation, 2 vols.). Ivano-Frankivsk: IFNTUOG.

24. Gibbs, S. G. (2012). Rod pumping: Modern methods of design, diagnosis and surveillance. [B.m.]: Author.

25. Wang, S., Rowlan, L., Cook, D., Conrady, C., King, R., & Taylor, C. A. (2024). Effects of rod-connection types on pump-jack dynamics. Petroleum Research, 100097. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.04.001

26. Eisner, P., Langbauer, C., & Fruhwirth, R. K. (2022). Novel FEM for sucker-rod-pump downhole dynamometer-card determination. Upstream Oil and Gas Technology, 9, 100078. https://doi.org/10.1016/j.upstre.2022.100078

27. Yin, J.-J., Sun, D., & Yang, Y.-S. (2021). Predicting multi-tapered sucker-rod pumping systems with an analytical solution. Journal of Petroleum Science and Engineering, 197, 108115. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108115

28. Lv, X., Wang, H., Zhang, X., Liu, Y., & Chen, S. (2021). Equivalent vibration model for carbon/glass hybrid-fibre sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 207, 109148. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109148

29. Miska, S., Sharaki, A., & Rajtar, J. M. (1997). Computer-aided optimisation of sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 17(3–4), 303–312. https://doi.org/10.1016/S0920-4105(96)00071- X

30. Kopei, V. B., Kopei, B. V., & Kuzmin, O. O. (2017). Building a sucker-rod pumping-unit model in Maplesoft MapleSim 7. Naukovyi Visnyk IFNTUOG, 2(43), 42–52.

31. Rischmüller, G., & Mayer, H. (1988). Oil recovery by sucker-rod pumps (150 pp.). Ternitz : Schoeller-Blackman GmbH.

32. Kopei, V. B. (2023). Machine-learning-based prediction of cyclic durability of sucker rods. Engineering Fracture Mechanics, 283, 109161. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109161

33. Tian, H., Deng, S., Wang, C., & Ni, X. (2021). CNN-based paraffin-deposit prediction in sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 206, 108986. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108986

34. Zhang, O. (2019). Magnetic-flux-leakage testing for defects of sucker-rod bodies. Journal of Software, 11(4). http://dx.doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201804036

35. Hansen, B., Tolbert, B., Vernon, C., & Hedengren, J. D. (2019). Model-predictive automatic control of sucker-rod-pump systems: Simulation case study. Computers & Chemical Engineering, 121, 265–284. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.08.018

36. Torres, L. H. S., & Schnitman, L. (2013). Modelling and control of sucker-rod pumping systems. IFAC Proceedings Volumes, 46(24), 260–265. https://doi.org/10.3182/20130911-3-BR- 3021.00052

37. Torres, L. H. S., Schnitman, L., & Felippe de Souza, J. A. M. (2010). Model-reference adaptive control for sucker-rod-pump systems. IFAC Proceedings Volumes, 43(17), 231–236. https://doi.org/10.3182/20100908-3-PT- 3007.00045

38. Takacs, G., & Kis, L. (2021). Optimum counterbalancing of sucker-rod pumping units. Journal of Petroleum Science and Engineering, 205, 108792. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108792

39. Takács, G. (2022). Critical analysis of power conditions in sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 210, 110061. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110061

40. Liu, X., & Qi, Y. (2011). Selecting sucker-rod pumping systems in CBM wells. Journal of Petroleum Science and Engineering, 76(3–4), 100–108. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.01.012

41. Codas, A., Ordoñez, B., & Moreno, U. F. (2009). Fault detection and isolation in sucker-rod pumping systems using bottom-hole pressure. IFAC Proceedings Volumes, 42(8), 1031–1036. https://doi.org/10.3182/20090630-4-ES-2003.00170

42. Lv, X., Feng, L., Wang, H., Liu, Y., & Sun, B. (2021). Quantitative diagnosis of sucker-rod pumping systems via inversion algorithms. Journal of Process Control, 104, 40–53. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.06.001

43. Zhang, R., Yin, Y., Xiao, L., & Chen, D. (2021). Real-time diagnosis of reservoir–wellbore– surface conditions in sucker-rod-pump wells. Journal of Petroleum Science and Engineering, 198, 108254. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108254

44. Huang, Z., Li, K., Xu, Z., Yin, R., Yang, Z., Mei, W., & Bing, S. (2024). STP-Model: Semi- supervised downhole fault diagnosis for sucker-rod pumping systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 135, 108802. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108802

45. Lv, X., Wang, H., Zhang, X., Liu, Y., Jiang, D., & Wei, B. (2021). Evolutionary SVM for fault diagnosis in sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 203, 108806. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108806

46. Lopatin, V. V. (2012). Scientific principles for developing a condition-monitoring system for rigid mine-shaft reinforcement (Doctoral dissertation). Dnipro: NTU Dnipro.

47. Chu, X., Wang, X., Xie, Y., Xing, G., & Chen, L. (2024). Association-rules mining for long- uptime sucker-rod pumping units. Reliability Engineering & System Safety, 245, 110026. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110026

48. Botvina, L. R., Tyutin, M. R., Sinev, I. O., & Bolotnikov, A. I. (2020). Acoustic-emission parameters after cyclic loading of structural steels. Procedia Structural Integrity, 28, 2118–2125. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.038

49. Zhang, O. (2019). Magnetic-flux-leakage testing for defects of sucker-rod bodies. Journal of Software, 11(4). http://dx.doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201804036

50. Kopei, B. V., Kopei, V. B., Martynets, O. R., Stefanyshyn, O. I., & Stefanyshyn, A. B. (2013). Fault-tree analysis for sucker-rod pumping units. Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Hazovykh Rodovyshch, 2(47), 62–71

51. Jiang, J., Wan, X., Li, K., Du, J., Liu, Y., Jing, J., & Li, J. (2024). Fracture-detection and prediction models for sucker-rod systems: A review. Engineering Failure Analysis, 159, 108119. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108119

52. Kopei, V. B., Onysko, O. R., & Panchuk, V. G. (2020). Product life-cycle management for threaded connections using Python. Journal of Physics: Conference Series, 1426, 012033. https://doi.org/10.1088/1742- 6596/1426/1/012033

53. Rischmüller, G., & Mayer, H. (1988). Oil recovery by sucker-rod pumps (150 pp.). Schoeller- Blackman GmbH.

54. He, Y.-P., Cheng, H.-B., Zeng, P., Zang, C.-Z., Dong, Q.-W., Wan, G.-X., & Dong, X.-T. (2024). Deep-learning-based working-condition recognition in sucker-rod pumping systems. Petroleum Science, 21(1), 641–653. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.08.031

55. He, Y.-P., Zang, C.-Z., Zeng, P., Wang, M.-X., Dong, Q.-W., Wan, G.-X., & Dong, X.-T. (2023). Few-shot working-condition recognition for sucker-rod pumping systems. Petroleum Science, 20(2), 1142– 1154. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.02.017

56. Lv, X.-X., Wang, H.-X., Xin, Z., Liu, Y.-X., & Zhao, P.-C. (2022). Adaptive fault diagnosis of sucker-rod pump systems via optimal perceptron. Petroleum Science, 19(2), 743–760. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.012

57. Correia da Silva, D., de Araújo, C. R. B., de Oliveira Freitas, J. C., Rodrigues, M. A. F., & de

58. Oliveira Wanderley Neto, A. (2020). Micro-emulsion systems for removing olefin-based drilling-fluid filter cake. Journal of Petroleum Science and Engineering, 193, 107425. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107425

59. Zheng, B., Gao, X., & Li, X. (2019). Fault detection for sucker-rod pumps based on motor power. Control Engineering Practice, 86, 37–47. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.001

60. Zhang, O. (2019). Magnetic-flux-leakage testing for defects of sucker-rod bodies. Journal of Software, 11(4). http://dx.doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201804036

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025