

## ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ СШНУ НА ОСНОВІ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ

А. М. Чеверда\*, В. І. Артим

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: Cheverda.andriy@gmail.com, viartym@gmail.com

Стаття присвячена вивченню аспекту впровадження технології BIM для інформаційної підтримки життєвого циклу (ЖЦ) свердловинних штангових насосних установок (СШНУ). У дослідженні висвітлюється роль BIM-технологій у вирішенні широкого спектра проблем, що виникають на різних етапах життєвого циклу СШНУ, починаючи від планування та проектування, і закінчуючи експлуатацією та обслуговуванням. У статті розглядаються особливості застосування BIM для підтримки інформаційних процесів, пов'язаних з ЖЦ, зокрема, в контексті будівельних технологій, що використовуються при проектуванні та плануванні СШНУ. Такий підхід сприяє виявленню потенційних проблем і ризиків на ранніх стадіях проекту, забезпечуючи можливість їхнього усунення до початку активних робіт. Окрім цього, у статті аналізуються інноваційні методи управління даними та інформаційні технології, засновані на BIM, для забезпечення ефективного моніторингу за станом обладнання протягом усього життєвого циклу. Це включає постійне оновлення та аналіз даних, що допомагає вчасно виявляти несправності та планувати ремонтні роботи, мінімізуючи простой та знижуючи витрати на обслуговування. У роботі підкреслюється важливість інтегрованості між фахівцями різних галузей, таких як інженери, архітектори, будівельники, та IT-спеціалісти. Використання системного підходу до впровадження BIM дозволяє враховувати різні аспекти впливу на довкілля та економіку, що сприяє створенню більш збалансованих та стійких рішень. Це допомагає не лише знизити негативний вплив на навколишнє середовище, але й покращити економічну ефективність проектів. Результати дослідження показують, що інтеграція BIM у процеси управління та обслуговування СШНУ дозволяє значно покращити якість прийнятих рішень на різних етапах життєвого циклу. Це включає підвищення точності проектування, зниження ризиків помилок та оптимізацію ресурсів. Таким чином, впровадження BIM-технологій є ключовим фактором успішної реалізації сучасних проектів у галузі видобутку та обслуговування нафтогазових ресурсів.

Ключові слова: BIM (Building Information Modeling), нафтогазова промисловість, свердловинні штангові насосні установки (СШНУ), CALS-технології, PLM, цифровий двійник

The article is devoted to the study of the aspect of implementing BIM technology for information support of the life cycle (LC) of downhole rod pumping units (DRPU). The study highlights the role of BIM technologies in solving a wide range of problems arising at different stages of the BOP LC, from planning and design to operation and maintenance. The article discusses the specifics of using BIM to support information processes related to housing and community services, particularly in the context of construction technologies used in the design and planning of SBS. This approach helps to identify potential problems and risks in the early stages of the project, ensuring that they can be eliminated before active work begins. In addition, the article analyzes innovative data management methods and BIM-based information technologies to ensure effective monitoring of asset condition throughout the lifecycle. This includes continuous data updating and analysis, which helps to identify faults and plan repairs in a timely manner, minimizing downtime and reducing maintenance costs. The paper emphasizes the importance of interdisciplinary collaboration between professionals from different disciplines, such as engineers, architects, - uilders, and IT specialists. Using a systematic approach to BIM implementation allows different aspects of environmental and economic impacts to be considered, which helps to create more balanced and sustainable solutions. This not only helps reduce negative environmental impacts, but also improves the economic efficiency of projects. The results of the study show that integrating BIM into the management and maintenance of the SSNS can significantly improve the quality of decisions made at various stages of the life cycle. This includes improving - esign accuracy, reducing the risk of errors, and optimizing resources. The introduction of BIM technologies is therefore a key factor in the successful implementation of modern oil and gas production and maintenance projects.

Keywords: BIM (Building Information Modeling), oil and gas industry, downhole rod pumping units, CALS technologies, PLM, digital twin.

## **Вступ**

Сучасна нафтогазова промисловість стикається з рядом складних викликів, пов'язаних із ефективним використанням свердловинних штангових насосних установок (СШНУ). Часті випадки аварій та збоїв у роботі обладнання призводять до значних втрат часу та коштів.

Проблемою є неефективність традиційних методів проектування, що вимагає значних витрат часу, проте дає неякісні проектні рішення. Додатковою проблемою є обмеженість традиційних методів діагностики та моніторингу елементів СШНУ, що ускладнює своєчасне виявлення потенційних проблемних ситуацій та управління ризиками.

Актуальність теми полягає в необхідності розробки нових інформаційних підходів та технологій, спрямованих на керування якістю і витратами на різних етапах ЖЦ СШНУ.

Додатково реалізація високих стандартів екологічної безпеки та сталого розвитку вимагає постійного вдосконалення процесів технічного обслуговування та управління експлуатацією СШНУ. Таким чином, розробка нових методів та технологій, спрямованих на оптимізацію процесів ЖЦ обладнання та зменшення впливу на навколишнє середовище, є критично важливою.

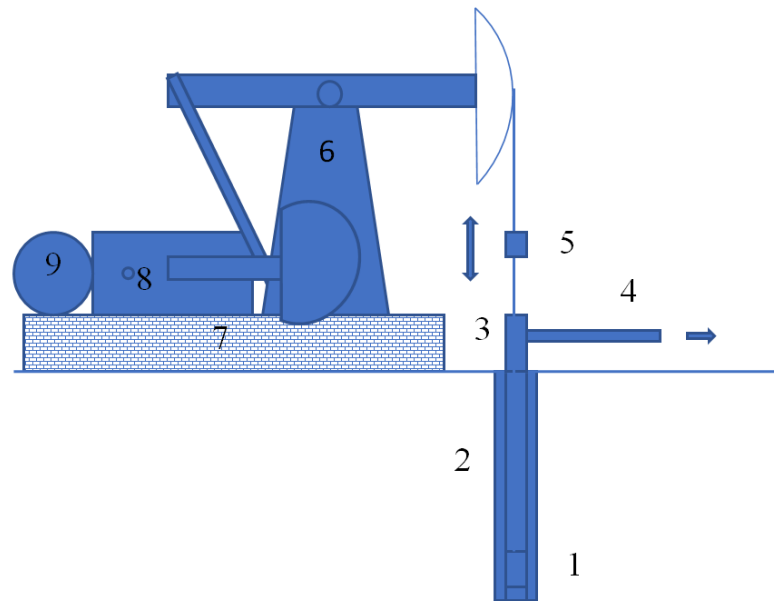
## **Огляд концепції BIM**

Building Information Modeling (BIM) – це процес створення і управління цифровими моделями будівель та інфраструктури, який підвищує ефективність, точність та взаємодію між різними дисциплінами в будівництві та проектуванні [1]. Концепція BIM – це цифрове представлення фізичних та функціональних характеристик об'єкта. Вона слугує спільною базою даних інформації про об'єкт протягом усього його життєвого циклу, включаючи оновлення, аналіз та управління інформаційною моделлю і надання надійної основи для прийняття рішень [2].

BIM дозволяє створювати точні цифрові моделі інфраструктури за допомогою сучасних картографічних інструментів, аерофотознімків та лазерних сканувань, що спрощує підготовку проектів [1]. Ці моделі об'єднують великі обсяги даних, роблячи процес проектування гнучкішим та інформативнішим порівняно з традиційними кресленнями. Використання спільних моделей знижує потребу в переробках і дублюванні креслень, дозволяючи кожній дисципліні додавати анотації та підключати дані до проекту [3]. Автоматичне оновлення кількості та розмірів компонентів економить час і ресурси.

Цифровий робочий процес BIM забезпечує економії та підключення до історії проектів, підвищуючи надійність збереження даних і запобігаючи втратам або пошкодженню файлів. Хмарні рішення, такі як Autodesk BIM 360, покращують співпрацю між різними дисциплінами, дозволяючи командам ефективно координувати свої дії та обмінюватися моделями [2]. BIM також надає можливість моделювання та візуалізації різних аспектів проекту, таких як сезонне освітлення та енергоефективність, що спрощує складні інженерні розрахунки. Автоматизація виявлення конфліктів між системами за допомогою BIM дозволяє уникнути вартісних помилок на будівельному майданчику і забезпечує точність монтажу. BIM зменшує фрагментацію проектів, об'єднуючи всі документи в єдиний цифровий простір, що покращує співпрацю і комунікацію між учасниками проекту, забезпечуючи ефективне управління на всіх етапах його реалізації. Інтеграція BIM значно покращує будівельні процеси, підвищує точність та ефективність, сприяючи кращій координації між усіма учасниками проекту [3].

В сучасних роботах [4] акцентується на важливості інтеграції інформаційних систем у процеси ЖЦ нафтогазового обладнання. Одним з прикладів застосування BIM-технологій є компанія ExxonMobil [5] – піонер в застосуванні автономного буріння в глибоких водах, що використовує систему консультування з штучним інтелектом для оптимізації параметрів буріння в Гаяні. Ця технологія дозволяє автоматизувати процес буріння без людського втручання, що забезпечує стабільність і повторюваність операцій. Використання цієї автоматизованої системи, яка поєднує десятиліття досвіду з новими технологіями, покращує безпеку і ефективність буріння, усуваючи рутинні завдання для персоналу [5]. ExxonMobil співпрацює з Microsoft для впровадження технологій BIM в Пермійській котловині, що дозволяє моніторинг та оптимізацію майнових активів за допомогою хмарних технологій з великою мережею датчиків. Додаткове використання штучного інтелекту та машинного навчання в операціях Пермійської котловини є першим кроком до повного автоматизованого циклу, що дозволяє системам реагувати на події без втручання людини. Проект Інтернету речей ExxonMobil об'єднує мільярди точок даних для аналізу та оптимізації виробничих процесів [5].



1 – свердловинний насос, 2 – колонна штанг і НКТ, 3 – обладнання гирла, 4 – викидна лінія, 5 – підвіска, 6 – верстат-качалка, 7 – фундамент, 8 – редуктор, 9 – електродвигун

Рисунок 1 – Принципова схема СШНУ

### Проблема підвищення ефективності СШНУ

В Україні широко використовуються СШНУ для експлуатації нафтових свердловин, що становлять понад 70% від загального числа діючих свердловин [6]. СШНУ включає верстат-качалку, обладнання гирла свердловини, насосні штанги, насосно-компресорні труби та свердловинний штанговий насос [7] (рис. 1). Рух плунжера насоса забезпечується зворотно-поступальними рухами від електродвигуна через редуктор та кривошипно-шатунний механізм верстака-качалки. Глибина підвіски насосів може досягати 3500 м, а їх продуктивність варіюється від 0,1 т/добу до 400 т/добу. Тип і розмір насоса, верстака-качалки, діаметр НКТ та штанг визначаються залежно від складу і в'язкості рідини, дебіту та глибини свердловини. Свердловинні насоси занурюються під рівень рідини. Невставні насоси монтується у свердловині частинами, тоді як вставні спускаються у зібраному вигляді. Для відокремлення нафти від газу і піску на прийомі насоса встановлюють фільтр. Наземне обладнання включає верстат-качалку і обладнання гирла свердловини [6].

Багато вчених та дослідників працювали над проблематикою підвищення ефективності СШНУ. Серед найбільш відомих дослідників в цій області: Вірновський А. С., Адонін А. Н., Драготеску Н. Д., Гіббс С. Г., Копей Б. В.

Чимало методів підвищення ефективності СШНУ опираються на сучасні інформаційні

технології. В праці [4] на основі математичної моделі СШНУ обґрунтовано роботу штангової колони в білярезонансних режимах для підвищення її ефективності. Проблеми ефективного і робастного автоматичного керування СШНУ досліджені в працях [8, 9]. В працях [4, 10-18] описано застосування сучасних методів машинного навчання для діагностування несправностей СШНУ. В праці [4], опираючись на досягнення теорії систем та сучасних інформаційних технологій, запропоновано науково-методологічні принципи створення інформаційної системи для проектування обладнання та підтримки життєвого циклу СШНУ та розроблено компоненти цієї системи.

В статті [19] досліджено вплив інтеграції ВІМ на надійність та ефективність СШНУ. Дослідження показали значний потенціал технології ВІМ у цій галузі, зокрема щодо використання віртуальних моделей для аналізу стану обладнання, прогнозування можливих аварій, а також планування ремонтних робіт. Однак, до цього часу залишаються невирішеними деякі аспекти, зокрема питання ефективності використання ВІМ в реальних умовах експлуатації, а також необхідність розробки стандартів та методів інтеграції цієї технології з існуючими системами управління [13]. Проте, незважаючи на ці обмеження, публікації вказують на перспективи подальших досліджень у цьому напрямку та показують важливість подальшого розвитку цієї області.

**Мета роботи** – проаналізувати, як ефективно впровадження ВІМ-технологій може допомогти вирішити ці проблеми. Ми також зобов'язані з'ясувати, які перешкоди та виклики виникають під час впровадження ВІМ-технологій у нафтогазовому секторі та як їх можна подолати. Для досягнення мети необхідно виконати теоретичний та практичний аналізи інтеграції ВІМ в систему інформаційної підтримки ЖЦ СШНУ.

### Теоретичний аналіз

Щоб зрозуміти унікальні можливості ВІМ, важливо проаналізувати інші інформаційні технології для підтримки ЖЦ СШНУ, такі як цифрові двійники, методи системної інженерії, CALS-технології та концепція PLM (Product Lifecycle Management).

**Цифровий двійник** – це віртуальна копія фізичного об'єкта, створена з метою моніторингу та оптимізації його роботи в реальному часі. Цифровий двійник можна визначити, в основному, як еволюційний цифровий профіль історичної та поточної поведінки фізичного об'єкта або процесу, який допомагає в процесах оптимізації [20]. ВІМ може використовувати цифрові двійники та надає більш комплексний підхід до управління даними протягом всього життєвого циклу будівельної структури [1].



Рисунок 2 – Використання цифрового двійника (ЦД) СШНУ

Розташовані на СШНУ сенсори створюють сигнали, які дозволяють двійнику фіксувати експлуатаційні та екологічні дані. Ці дані об'єднуються з даними підприємства, такими як специфікації та креслення. Сенсори передають дані в цифровий світ через інтеграційні технології. Аналітика використовується для обробки даних і отримання висновків. Цифровий двійник створює майже реальну цифрову модель фізичного світу для виявлення відхилень від оптимальних умов. Такою моделлю може бути компонентно-орієнтована модель СШНУ, розроблена мовою Modelica [4, 21]. За необхіднос-

ті, цифровий двійник здійснює дію через приводи, що активують фізичний процес [20].

**Концепція інформаційної підтримки життєвого циклу виробу (PLM)** орієнтована на управління даними та процесами протягом всього життєвого циклу виробу. Вона зазвичай застосовується в машинобудівних галузях для керування даними про вироби від концепції до вилучення з використання [4]. ВІМ використовує концепцію PLM, але надає більш спеціалізований підхід до управління будівельними інженерними проектами. Він включає не лише управління даними будівельної структури, а й її ефективне тривимірне моделювання та візуалізацію, що полегшує спільну роботу та координацію між учасниками проекту [22].



PDM – управління даними про продукт;  
 CAD – автоматизоване проектування;  
 CAE – комп'ютерний інженерний аналіз;  
 CAM – комп'ютеризоване виробництво;  
 ERP – планування ресурсів підприємства;  
 CDM – управління цифровими даними

Рисунок 3 – Екосистема PLM

У сучасному індустріальному середовищі системи управління життєвим циклом виробів (PLM-системи) та будівельно-інформаційне моделювання (ВІМ) є ключовим інструментом для оптимізації процесів управління проектами та ресурсами. Ці дві технології відіграють важливу роль у підтримці цифрової трансформації у відповідних галузях, але вони мають свої відмінності та унікальні переваги.

PLM традиційно використовується в виробничих галузях для керування інформацією про вироби, починаючи з концепції і закінчуючи вилученням з експлуатації [23]. Концепція PLM передбачає використання гетерогенних інформаційних ресурсів на різних етапах життєвого циклу продукту, спільна робота яких дозволяє користувачеві ефективно вирішувати проблеми якості продукту та різноманітних витрат [24]. Відповідно до принципу ізоморфізму закономірностей складних систем, ефективна PLM-система повинна мати ці закономірності [24]. Ця система забезпечує інтегрований підхід до

управління різними аспектами виробничого процесу, включаючи проектування, виробництво, технічне обслуговування та утилізацію. ВІМ може бути більш інтегрованою та вдосконаленою альтернативою PLM у нафтогазовій галузі, якщо проблеми СШНУ розглядати з будівельної точки зору. ВІМ не тільки забезпечує управління даними, а й включає у себе спеціалізоване тривимірне моделювання та візуалізацію інфраструктури, що робить його потужним інструментом для спільної роботи та координації між учасниками будівельного проекту.

**CALS** (Computer-Aided Acquisition and Logistics Support) технології, які тісно пов'язані з концепцією PLM, забезпечують інтеграцію даних і процесів протягом всього життєвого циклу виробу, зосереджуючись на стандартизації та автоматизації управління даними. Спільне використання CALS та ВІМ разом може забезпечити повніше управління даними та процесами протягом життєвого циклу СШНУ [25]. CALS – це набір технологій, спрямованих на інтеграцію даних та процесів протягом життєвого циклу виробу. Ці технології можуть бути використані для управління даними та документацією від початкового проектування до експлуатації та обслуговування об'єктів [26].

Порівняно з ВІМ, яке також може бути використане у нафтогазовій промисловості, CALS-технології зазвичай концентруються на аспектах виробництва та логістики, таких як управління запасами, плануванням ресурсів та моніторингом обладнання. Однак ВІМ має більш спеціалізовані можливості, включаючи тривимірне моделювання, візуалізацію та управління будівельними проектами. Отже, в контексті нафтогазової промисловості ВІМ може виступати як більш потужний інструмент для управління даними та процесами, забезпечуючи більш ефективне управління проектами та інженерними рішеннями протягом життєвого циклу об'єктів у порівнянні з CALS-технологіями з точки зору будівництва.

**Системна інженерія** – це методологія проектування та управління складними системами протягом їхнього життєвого циклу. ВІМ доповнює системну інженерію, надаючи інструменти для спеціалізованого тривимірного моделювання та інтеграції даних, що дозволяє створювати більш точні та надійні моделі об'єктів. Системна інженерія акцентує на узгодженому підході до архітектури, дизайну та управління системами, що включають компоненти, процеси та інтерфейси. Системна інженерія зазвичай використовується в промисловості, авіації, автомобільній галузі та інших галузях для

оптимізації роботи складних технічних систем [27]. Методологію системної інженерії можна використовувати і для СШНУ [4].

У порівнянні з системною інженерією, ВІМ може бути її доповненням, розширюючи можливості управління проектами і ресурсами, зокрема в будівельній галузі. Хоча обидві технології спрямовані на управління складними системами, ВІМ надає додаткові спеціалізовані інструменти для тривимірного моделювання та візуалізації, які можуть бути корисними при проектуванні та спорудженні СШНУ.

### Практичний аналіз

Практичний аналіз включає вивчення перспективних прикладів впровадження ВІМ-технологій у нафтогазовій промисловості. За допомогою ВІМ-моделювання було здійснено оптимізацію процесів моніторингу та діагностики обладнання нафтогазових свердловинних штангових насосних установок, що дозволило підвищити їхню надійність та знизити ризик аварій [28].

Одним з яскравих прикладів є проект компанії Shell у Нідерландах, де було впроваджено ВІМ-технології для управління та обслуговування своєї нафтогазової інфраструктури [28]. Компанія Shell використала ВІМ для проектування та управління штанговими свердловинними насосними установками у Нідерландах на родовищі Schoonebeek [29]. Це родовище було заново відкрите у 2011 році з використанням сучасних технологій видобутку нафти, включаючи горизонтальне буріння та інноваційні методи обслуговування обладнання. Використання ВІМ дозволило Shell створити детальну тривимірну модель кожної установки, яка включала всі необхідні компоненти, починаючи від механічних частин до електричних систем. Це значно підвищило якість проектування та дозволило інженерам виявляти і усувати потенційні проблеми ще на етапі розробки [28, 30].

Практичний аспект відображає конкретні застосування ВІМ на різних етапах життєвого циклу СШНУ, включаючи проектування, виробництво, монтаж, експлуатацію та технічне обслуговування. Особлива увага приділяється покращенню координації та ефективності процесів управління об'єктами завдяки застосуванню ВІМ-технологій, серед яких:

**Проектування та інженерія.** Використання ВІМ у процесі проектування дозволяє створювати віртуальні моделі СШНУ, які відображають всі аспекти будівництва та експлуатації, включаючи структури, обладнання, системи комунікацій, електропостачання та інше.

Це допомагає забезпечити більшу точність та ефективність у проектуванні. [22, 31].

В основному знання про проектування СШНУ розташовані в науковій, навчальній та довідковій літературі. Для використання в інформаційній системі необхідна їхня формалізація та розташування у базі знань [4]. Для цього можна застосувати логіку предикатів, семантичні мережі, мови RDF/OWL [32, 33].

У зв'язку з втотою штанг центральне місце в проектуванні СШНУ займає розрахунок навантажень на штангову колону. Для цього використовуються номограми, формули Міллса, Слонегера, Вірновського [6]. Рішмюллер [34] 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 АРІ (стандарт АРІ PR 11L). Це пояснюється складністю і різноманітністю процесів, що відбуваються в СШНУ, і це вказує на необхідність постійної обробки роботи динамометричних вимірювань за допомогою комп'ютера. Інтерпретація динамограм дає надзвичайно важливу інформацію про стан СШНУ [34]. Перспективним є застосування машинного навчання для інтерпретації динамограм [10, 11, 35]. Машинне навчання можна також застосовувати для аналізу спожитої енергії двигуна [36]. Підвищити точність розрахунку можна за допомогою динамічних моделей СШНУ, зокрема моделей СШНУ, які розроблені мовою Modelica [4, 21]. Дуже багато факторів впливає на вибір насоса [34]. У зв'язку з цим необхідним є або реалістичне моделювання гідродинамічних процесів у 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 ВІМ шляхом створення прикладних компонентів ВІМ за допомогою інтерфейсів прикладного програмування (API).

**Координація та управління проектами.** ВІМ-технології дозволяють здійснювати ефективну координацію між різними підрядниками та виконавцями на всіх етапах проекту, що сприяє зниженню конфліктів та забезпечує вчасне завершення проектів в термін та в межах бюджету [22, 37].

**Виробництво та монтаж.** ВІМ може використовуватися для оптимізації процесів виробництва СШНУ та монтажу, включаючи

планування робіт, розкладання матеріалів, управління ресурсами та контроль якості [38].

Виготовлення насосних штанг – це складний багатофакторний процес, що починається виплавленням сталі і закінчується їхнім пакуванням [34]. Підвищити ефективність проектування таких процесів дозволяють системи автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП та САМ-системи). Під час виробництва необхідним є автоматизований контроль якості – контроль структури матеріалу, магнітно-порошкова дефектоскопія, рентгеноскопія зварних штанг [34]. Сучасні технології «Інтернету речей» [5] дозволяють автоматизувати контроль за дотриманням правил поведінки зі штангами. Наприклад, за допомогою недорогих сенсорів можливо легко контролювати, чи були під час транспортування і спуску штанги недопустимі удари. Автоматичний контроль якості поверхні штанг можна також реалізувати за допомогою сенсорів, розташованих безпосередньо на гирлі. Досягнення сучасних ВІМ можуть бути використані для інформаційної підтримки ЖЦ виробничих площ для виробництва насосних штанг.

**Експлуатація та технічне обслуговування.** Відомості, зібрані під час проектування та будівництва за допомогою ВІМ, можуть бути використані для оптимізації процесів експлуатації та технічного обслуговування СШНУ. Це включає планування ремонтних робіт, моніторинг стану обладнання та прогнозування необхідності заміни деталей [38].

Центральну роль під час експлуатації повинні відігравати системи автоматичного керування і моніторингу технічного стану, які також можна інтегрувати в ВІМ. Сучасні методи збору і аналізу даних з різних сенсорів СШНУ дозволяють отримати цілісну картину її технічного стану і приймати ефективні рішення [39]. Такі сенсори можуть бути розташовані на різних частинах СШНУ (рис. 1), зокрема на підвісці 5 (динамограф), балансірі (сенсор кута повороту, сенсори вібрації), двигуні 9 (сенсор спожитої потужності), редукторі 8 (сенсори вібрацій, рівня мастила, якості мастила, температури), обладнанні гирла 3 (ехолоти, сенсори тиску і температури), колоні штанг 2 (глибинні динамографи).

**Аналіз та вдосконалення.** ВІМ дозволяє проводити різноманітний аналіз даних для підвищення ефективності та зменшення витрат. Це може включати аналіз витрат, оцінку ризиків, моделювання робочих процесів та виявлення можливостей для вдосконалення [22, 38].

Таблиця 1 – Застосування ВІМ та інших інформаційних технологій для інформаційної підтримки ЖЦ СШНУ

Етап ЖЦ	Засоби і методи інформаційної підтримки
<b>1.Проектування деталей та вузлів</b>	Бази знань з проблем якості деталей [32], САПР, FEA-моделі верстата-качалки, штанг, різьбових з'єднань насосних штанг та НКТ [40, 41].
Вибір привода	Цифрова діаграма Адоніна, яка дозволяє автоматизувати вибір насосного обладнання і режимів відкачування в залежності від глибини опущення насоса і дебіту свердловини. Бази даних з технічними характеристиками приводів. Кінематичні моделі приводів [42, 43].
Вибір насоса	База даних з інформацією про свердловину дозволяє визначити клас свердловини. Цифрова діаграма Адоніна для вибору насоса. Автоматизація розрахунку групи посадки насоса в залежності від в'язкості рідини, глибини спуску насоса та інших факторів. Розрахунок теоретичної подачі насоса за формулою Вірновського, коефіцієнта подачі та втрат тиску в клапанах за допомогою CFD-гідродинамічної моделі клапана [4].
Проектування колони насосних штанг	Автоматизація розрахунку навантажень на головку балансира за формулами Вірновського або шляхом використання динамічних моделей СШНУ [42, 44-48]. Динамічна компонентно-орієнтована модель СШНУ мовою Modelica [4, 21]. Криві Веллера штанг, які були отримані за експлуатаційними результатами [34]. Бази даних, статистичні дані про відмови штанг, статистичні моделі відмов [4]. Прогнозування циклічної довговічності штанг за допомогою машинного навчання [49]
Боротьба з газом і піском, парафіном, інтенсифікація видобування	Оптимізація конструкції насосів і підбору газових і піщаних якорів. Оптимізація методів інтенсифікації за емпіричними даними. Методи прогнозування відкладень парафіну [15].
<b>2.Виробництво компонентів</b>	САПР ТП, САМ, автоматизований контроль якості виробів.
Технологічний процес виробництва насосних штанг	Автоматизоване проектування технологічного процесу виробництва насосних штанг. Вибір методів зміцнення [34]. Автоматизований контроль якості штанг [50].
<b>3.Монтаж</b>	ВІМ-технології, тривимірні моделі СШНУ, засоби візуалізації в ВІМ та схеми монтажу верстатів-качалок [6], автоматизоване проектування фундаменту, монтаж рами, стійки, балансиру, центрування відносно гирла свердловини.
<b>4.Експлуатація</b>	Автоматичне керування СШНУ [9, 51, 52].
Балансування привода, оптимізація режимів	Цифровий двійник СШНУ на основі динамічної моделі [4]. Оптимізація балансування [53]. Оптимізація режимів відкачування [54, 55], у тому числі за допомогою динамічних моделей СШНУ [4].
Моніторинг технічного стану	Автоматичний контроль продукції, моніторинг тиску [56], витрати рідини і температури. Збір даних з дистанційних свердловинних манометрів, витратомірів, сенсорів температури. Статистичні методи обробки цих даних. Динамограми, ватметрограми, дані вібрацій привода, редуктору і температури оливи, автоматичний контроль якості мастила в редукторі [18, 57-59]. Системи моніторингу за технічним станом [39], які вперше було впроваджено фірмою Шелл [34].
<b>5.Обслуговування і ремонт</b>	Автоматичний контроль за дотриманням техніки безпеки (контроль огорожі, вимкненого стану, стану гальма, наявності написів, що попереджують про небезпеку, сенсори присутності людини в небезпечних місцях, контроль роботи за замкнення та інше.) [6]. Моніторинг технічного стану обладнання для обслуговування і ремонту СШНУ. Автоматизація дослідження свердловини, зокрема виявлення рівня рідини за допомогою ехолотів. Організація майстерень для ремонтів СШНУ і насосів за допомогою ВІМ [6]. Збір даних про відмови та статистична обробка цих даних [4, 60]. САПР ТП для проектування технологічних процесів ремонту.
Технічне діагностування	Оброблення даних неруйнівного контролю [50, 61]. Застосування методу «дерева відмов» [62]. Бази знань про відмови приводів і свердловинного обладнання [63].



Для створення і використання ефективних систем інформаційної підтримки життєвого циклу виробів необхідно застосовувати системний підхід і досягнення загальної теорії систем [4, 24]. Такі системи повинні об'єднувати різноманітні інформаційні ресурси, у тому числі ресурси ВІМ (табл. 1). Наведені в таблиці ресурси можуть також бути інтегровані в ВІМ-системи.

### Висновки

Впровадження ВІМ-технологій для інформаційної підтримки життєвого циклу обладнання в нафтогазовій промисловості показує великий потенціал. ВІМ-технології мають величезні досягнення в галузі інформаційної підтримки будівельних об'єктів. Якщо СШНУ розглядати як будівельний об'єкт, то ці технології можуть значно покращити процеси проектування, будівництва, експлуатації та обслуговування СШНУ, що, в свою чергу, може призвести до зменшення різноманітних витрат часу і коштів.

Аналіз показує, що ВІМ-технології можуть бути найбільш ефективними на етапі проектування та монтажу СШНУ, у першу чергу її наземного привода. Їх також можна ефективно використати для організації майстерень для ремонтів насосів та інших деталей СШНУ. Для цілісної інформаційної підтримки ЖЦ СШНУ ВІМ-технології обов'язково повинні бути доповнені іншими інформаційними ресурсами, а сама ВІМ-система повинна ефективно інтегруватись в інформаційну систему вищого рівня (PLM-систему). ВІМ-технологія є, швидше за все, доповненням до вже існуючих систем, не здатною повноцінно замінити вже існуючу інформаційну підтримку ЖЦ СШНУ. Для досягнення повного потенціалу використання ВІМ необхідно здійснювати подальші дослідження. Це включає інтеграцію описаних в статті методів у існуючі ВІМ-системи та розроблення нових методів і методик на основі ВІМ-технологій.

### Література / References

1. What Is BIM. Building Information Modeling. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/ae/solutions/bim> (date of access 20.06.2024).
2. Zheng L., Lu W., Wu L., Zhou Q. A review of integration between BIM and CFD for building outdoor environment simulation. *Building and Environment*. 2023. 228. 109862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109862>.

3. Smith D. K., Tardiff M. Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers. Wiley, 2009. DOI: [10.1002/9780470432846](https://doi.org/10.1002/9780470432846).

4. Kopei V.B. Naukovo-metodolohichni osnovy avtomatyzovanoho proektuvannia obladnannia shtanhovoi sverdlovyynnoi nasosnoi ustanovky : v 2 ch. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.12. Ivano-Frankivsk, 2020. Ch. 1. 428 p. [in Ukrainian]

5. Exxon Mobil Corporation | ExxonMobil. URL: <https://corporate.exxonmobil.com> (date of access: 19.06.2024)

6. Махмудов С.А. Монтаж, експлуатація и ремонт скважинных штанговых насосных установок: Справочник мастера. Москва : Недра, 1987. 208 с.

7. Федорович Я.Т. Машины та обладнання для видобутку нафти і газу : навчальний посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 344 с.

8. Peterson R., Smigura T., Brunings C., Quijada W., Gomez A. Production Increases at PDVSA Using an Improved SRP Control. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, September 2006. DOI: <https://doi.org/10.2118/103157-MS>.

9. Torres L. H.S., Schntman L. Sucker-Rod Pumping System of Oil Wells: Modelling, Identification and Process Control. *IFAC Proceedings*. 2013. Vol. 46(24). P. 260-265. DOI: <https://doi.org/10.3182/20130911-3-BR-3021.00052>.

10. He Y.-P., Cheng H.-B., Zeng P., Zang C.-Z., Dong Q.-W., Wan G.-X., Dong X.-T. Working condition recognition of sucker rod pumping system based on 4-segment time-frequency signature matrix and deep learning. *Petroleum Science*. 2024. 21(1). P. 641-653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.08.031>.

11. Lv X.-X., Wang H.-X., Xin Z., Liu Y.-X., Zhao P.-C. Adaptive fault diagnosis of sucker rod pump systems based on optimal perceptron and simulation data. *Petroleum Science*. 2022. Vol. 19(2). P. 743-760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.012>.

12. Li J., Shao J., Wang W., Xie W. An evolutionary deep learning method based on multi-feature fusion for fault diagnosis in sucker rod pumping system. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 66. P. 343-355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.11.028>.

13. Han Y., Li K., Ge F., Wang Y., Xu W. Online fault diagnosis for sucker rod pumping well by optimized density peak clustering. *ISA Transactions*. 2022. 120. P. 222-234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.03.022>.



14. Zhang A., Gao X. Supervised dictionary-based transfer subspace learning and applications for fault diagnosis of sucker rod pumping systems. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 338. P. 293-306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.02.013>.
15. Tian H., Deng S., Wang C., Ni X., Wang H., Liu Y., Ma M., Wei Y., Li X. A novel method for prediction of paraffin deposit in sucker rod pumping system based on CNN indicator diagram feature deep learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 206. 108986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108986>.
16. Chen L., Gao X., Li X. Using the motor power and XGBoost to diagnose working states of a sucker rod pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 199. 2021. 108329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108329>.
17. Aliev T.A., Rzayev A.H., Guluyev G.A., Alizada T.A., Rzayeva N.E. Robust technology and system for management of sucker rod pumping units in oil wells. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 99. P. 47-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.06.010>.
18. Lv X., Wang H., Zhang X., Liu Y., Jiang D., Wei B. An evolutionary SVM method based on incremental algorithm and simulated indicator diagrams for fault diagnosis in sucker rod pumping systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 203. 108806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108806>.
19. Kozlovska M., Petkanic S., Vranay F., Vranay D. Enhancing Energy Efficiency and Building Performance through BEMS-BIM Integration. *Energies*. 2023. 16(17). 6327. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176327>.
20. Parrott A., Warshaw, L. Industry 4.0 and the Digital Twin: Manufacturing Meets Its Match. New York : Deloitte University Press. 2017. URL: <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
21. Kopei V.B., Kopei B.V., Kuzmin O.O. Pryntsyropy pobudovy modeli sverdlovyynnoi shtanhovoi nasosnoi ustanovky dlia seredovyshcha Maplesoft MapleSim 7. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2017. No 2(43). P. 42-52. [in Ukrainian]
22. Teicholz P., Sacks R., Lee G., Eastman C. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, 3rd Edition. Hoboken, New Jersey : Wiley. 2018. 688 p.
23. Saaksvuori A., Immonen A. Product lifecycle management. Third Edition. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. 268 p.
24. Kopei V., Onysko O., Barz C., Dašić P., Panchuk V. Designing a Multi-Agent PLM System for Threaded Connections Using the Principle of Isomorphism of Regularities of Complex Systems. *Machines*. 2023. 11(2). 263. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11020263>.
25. Hobgood A. CALS Implementation - Still a Few Questions. *Advanced Imaging*, April 1990. P. 24-25.
26. NATO CALS Handbook. Version 2. June 2000. Brussel: NATO CALS Office, 2000. 342 p.
27. Shamieh C. Systems Engineering For ?ummies, IBM Limited Edition. Wiley, 2012. 76 p.
28. Oil and natural gas | Shell Global. URL: <https://www.shell.com/what-we-do/oil-and-natural-gas.html> (date of access: 19.06.2024).
29. Van Dijk C. Steam-Drive Project in the Schoonebeek Field, The Netherlands. *J Pet Technol*. 1968. Vol. 20(03). P. 295-302. DOI: <https://doi.org/10.2118/1917-PA>.
30. Wilson A. Schoonebeek Heavy-Oil Redevelopment Requires Complex Chemistry Management. *J Pet Technol*. 2012. Vol. 64 (12). P. 116-119. DOI: <https://doi.org/10.2118/1212-0116-JPT>.
31. Mordue S., Swaddle P., Philp D. Building Information Modeling For Dummies. John Wiley & Sons. 2015. 416 p.
32. Kopei V. B., Paliichuk I. I. Zastosuvannia movy prohramuvannia Python dlia pobudovy baz znan z problem nadiinosti i dovhovichnosti shtanhovykh sverdlovyynnykh nasosnykh ustanovok. *Naftohazova enerhetyka*. 2011. No 2(15). P. 12-18. [in Ukrainian]
33. Kopei V.B., Onysko O.R., Panchuk V.G. Principles of development of product lifecycle management system for threaded connections based on the Python programming language. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. 1426. 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012033>.
34. Rischmüller G., Mayer H. Oil Recovery by Sucker-Rod Pumps, Ternitz : Schoeller-Blackman GmbH, 1988. 150 p.
35. He Y-P., Zang C-Z., Zeng P., Wang M-X., Dong Q-W., Wan G-X., Dong X-T. Few-shot working condition recognition of a sucker-rod pumping system based on a 4-dimensional time-frequency signature and meta-learning convolutional shrinkage neural network. *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20(2). P. 1142-1154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.02.017>.
36. Zheng B., Gao X., Li X. Fault detection for sucker rod pump based on motor power. *Control Engineering Practice*. 2019. 86. P. 37-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.001>.

37. Eastman C. An Outline of the Building Description System. Research Report No. 50. Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, PA. Inst. of Physical Planning, 1974. 23 p. URL: <https://eric.ed.gov/?id=ED113833>.
38. Crotty R. The Impact of Building Information Modelling: Transforming Construction. Routledge, 2016. 232 p.
39. Lopatin V. V. Naukovi osnovy rozroblennia systemy kontroliu tekhnichnoho stanu zhorstkoho armuvannia shakhtnykh stovburiv : dys. ... d-ra tekhn. nauk : spets. 05.11.13 "Prylady i metody kontroliu ta vyznachennia skladu rechovyh" : Data zakhystu 21.02.13. Dnipropetrovsk, 2012. 392 p. [in Ukrainian]
40. Hoffman E. L. Finite Element Analysis of Sucker Rod Couplings with Guidelines for Improving Fatigue Life: Sandia report. Sandia National Laboratories, 1997. 66 p.
41. Kopei V.B. Rozroblennia ta analiz parametrychnykh skinchenno-elementnykh modelei rizbovykh ziednan v Abaqus®. *Naftohazova enerhetyka*. No 1(12). 2010. P.31-36. [in Ukrainian]
42. Wang S., Rowlan L., Cook D., Conrady C., King R., Taylor C. A. Dynamics of pump jacks with theories and experiments. *Upstream Oil and Gas Technology*. 2023. 11. 100097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100097>.
43. Takacs G. Exact kinematic and torsional analysis of Rotaflex pumping units. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2014. Vol. 115. P. 11-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.02.008>.
44. Gibbs S. G. Rod Pumping: Modern Methods of Design, Diagnosis and Surveillance. Publisher: Author, 2012. 660 p.
45. Eisner P., Langbauer C., Fruhwirth R.K. Comparison of a novel finite element method for sucker rod pump downhole dynamometer card determination based on real world dynamometer cards. *Upstream Oil and Gas Technology*. 2022. 9. 100078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2022.100078>.
46. Yin J.-J., Sun D., Yang Y. Predicting multi-tapered sucker-rod pumping systems with the analytical solution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 197. 108115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108115>.
47. Lv X., Wang H., Zhang X., Liu Y., Chen S. An equivalent vibration model for optimization design of carbon/glass hybrid fiber sucker rod pumping system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 207. 109148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109148>.
48. Miska S., Sharaki A., Rajtar J.M. A simple model for computer-aided optimization and design of sucker-rod pumping systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1997. Vol. 17, Iss. 3-4. P. 303-312. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(96\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(96)00071-X).
49. Wu Yuandeng, Liu Shaohu, Ma Weiguo, Ran Xiaofeng, Qu Baolong. Machine learning method for predicting the fatigue life of sucker rods. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023. 282. 109161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109161>.
50. Zhang Ou, Wei Xueye, Wang Pei, Yan Shuxin. Finite Element Analysis of Magnetic Flux Leakage Detection for Transverse Cracks of Sucker Rod. *Journal of System Simulation*. 2018. Vol. 30(4). P.1504-1510. URL: <https://www.china-simulation.com/EN/10.16182/j.issn1004731x.joss.201804036>.
51. Hansen B., Tolbert B., Vernon C., Hedengren J.D. Model predictive automatic control of sucker rod pump system with simulation case study. *Computers & Chemical Engineering*. 2019. Vol. 121. P. 265-284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.08.018>.
52. Torres L.H.S., Schnitman L., de Souza, J.A.M.F. Model Reference Adaptive Control Applied to the Improvement of the Operational Conditions of a Sucker Rod Pump System. *IFAC Proceedings*. 2010. Vol. 43(17). P. 231-236. DOI: <https://doi.org/10.3182/20100908-3-PT-3007.00045>.
53. Takacs G., Kis L. A new model to find optimum counterbalancing of sucker-rod pumping units including a rigorous procedure for gearbox torque calculations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 205. 108792. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108792>.
54. Takács G. A critical analysis of power conditions in sucker-rod pumping systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. 210. 110061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110061>.
55. Liu X., Qi Y. A modern approach to the selection of sucker rod pumping systems in CBM wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2011. Vol. 76(3-4). P. 100-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.01.012>.
56. Cudas A., Ordoñez B., Moreno U.F. Sucker-Rod Pumping System Fault Detection and Isolation Method Using Bottom Hole Pressure Measurement. *IFAC Proceedings Volumes*. 2009. Vol. 42(8). P. 1031-1036. DOI: <https://doi.org/10.3182/20090630-4-ES-2003.00170>.
57. Lv X., Feng L., Wang H., Liu Y., Sun B. Quantitative diagnosis method of the sucker rod pump system based on the fault mechanism and inversion algorithm. *Journal of Process Control*.

2021. Vol. 104. P. 40-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.06.001>.

58. Zhang R., Yin Y., Xiao L., Chen D. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. 198. 108254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108254>.

59. Huang Z., Li K., Xu Z., Yin R., Yang Z., Mei W., Bing S. STP-Model: A semi-supervised framework with self-supervised learning capabilities for downhole fault diagnosis in sucker rod pumping systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. 135. 108802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108802>.

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

61. Botvina L.R., Tyutin M.R., Sinev I.O., Bolotnikov A.I. The effect of preliminary cyclic loading on acoustic emission parameters and damage of structural steels. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 2118-2125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.038>.

62. Kopei B.V., Kopei V.B., Martynets O.R., Stefanyshyn O.I., Stefanyshyn A.B. Vykorystannia "dereva vidmov" yak metodu strukturnoho analizu shtanhovoi nasosnoi ustanovky. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2013. No 2(47). P.62-71. [in Ukrainian]

63. Jiang J., Wan X., Li K., Du J., Liu Y., Jing J., Li J. Research progress of sucker rod fracture detection and prediction model. *Engineering Failure Analysis*. 2024. 159. 108119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108119>.