



УДК 697.85

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-179-189

ЦИФРОВІ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Дмитренко С. О.*

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

<https://orcid.org/0009-0009-7910-1923>e-mail: sieergi0@gmail.com**Кіршак Х. І.**

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

<https://orcid.org/0000-0001-9555-7992>e-mail: Khrystyna.dumka@nung.edu.ua

Анотація. У статті розглядаються сучасні цифрові та інтелектуальні технології, що трансформують підходи до віртуалізації та візуалізації процесів буріння нафтових і газових свердловин. Проаналізовано ключові обмеження традиційних 2D-систем моніторингу (високе когнітивне навантаження операторів, затримки реакції, людський чинник) та показано, як новітні рішення долають ці проблеми. Зокрема, окреслено застосування тривимірної візуалізації та доповненої реальності (AR) для створення інтерактивних інтерфейсів, що інтегрують дані сенсорів у реальному часі і підвищують ситуаційну обізнаність персоналу. Висвітлено концепцію цифрового двійника бурового процесу як інтегрованого середовища, що об'єднує фізичні сенсори, механістичні моделі, AI-модулі та 3D/AR-візуалізацію. Показано, як цифровий двійник моделює гідродинаміку, навантаження на долото та властивості порід, а машинні алгоритми прогнозують аномалії для проактивного запобігання аваріям. Наведено приклади впровадження: скорочення часу реакції операторів на 25-40%, зменшення кількості помилок та простоїв, економія ресурсів завдяки попередженню аварій. Окремо продемонстровано підвищення безпеки буріння за рахунок AR-підказок для польових бригад і використання VR-тренажерів для навчання операторів. За рахунок інтерактивних 3D-сцен і AR-модулів досягається зниження когнітивного навантаження операторів на 15-30%. У статті також запропоновано рекомендації щодо розвитку відповідних систем: удосконалення мережевої інфраструктури для мінімізації затримки, стандартизація форматів даних, оптимізація AI-моделей та ергономічне покращення AR/VR-пристроїв. Ключовий висновок – комплексна інтеграція цифрових двійників та іммерсивних технологій дозволяє суттєво підвищити ефективність і безпеку процесів буріння у нафтогазовій промисловості.

Запропоноване посилання: Дмитренко, С. О., & Кіршак, Х. І. (2025). Цифрові та інтелектуальні технології віртуалізації та візуалізації процесів буріння нафтових і газових свердловин. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 179-189. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-179-189

* Відповідальний автор



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

Ключові слова: цифровий двійник, віртуалізація, тривимірна візуалізація, доповнена реальність, буріння; великі мовні моделі; штучний інтелект; багатоагентні системи; оптимізація.

Вступ

Буріння нафтових і газових свердловин – один із найбільш технологічно складних і ризикованих процесів нафтової галузі. Оператори бурових установок у реальному часі контролюють десятки параметрів (тиски і витрати бурового розчину, навантаження на долото, швидкість обертання бурильної колони, температуру тощо) і приймають критичні рішення під великим інформаційним навантаженням. Традиційні системи моніторингу, що базуються на 2D-відображенні даних на екранах, мають низку обмежень. По-перше, оператор змушений обробляти розрізнену інформацію з різних приладів, що створює високе когнітивне навантаження і підвищує ймовірність помилки. По-друге, реакція на позаштатні ситуації може бути затриманою через те, що людина фізично не здатна миттєво обробити великий обсяг даних. Нарешті, людський чинник залишається джерелом ризику: втома, стрес або нестача досвіду оператора можуть призвести до неправильних дій.

У цих умовах нагальною є потреба в нових підходах до візуалізації та віртуалізації процесу буріння, які б забезпечили кращу оглядовість, швидшу аналітику даних та підтримку прийняття рішень. Сучасні цифрові технології – зокрема, тривимірна (3D) візуалізація, доповнена і віртуальна реальність (AR/VR), а також цифрові двійники обладнання і процесів – відкривають нові можливості для вирішення цих завдань. Крім того, розвитку набули штучний інтелект (ШІ) та багатоагентні системи, що дозволяють автоматизувати оптимізацію режимів буріння і прогнозувати потенційні проблеми.

За даними останніх досліджень, впровадження цифрових двійників є ключовим кроком на шляху до інтелектуальних, майже автономних бурових операцій [1,8]. Зарубіжні компанії вже демонструють успішні кейси: зокрема,

компанія NOV розробила цифровий двійник процесу буріння, який в режимі реального часу на основі великих даних та алгоритмів ШІ прогнозує оптимальні параметри буріння для запобігання ускладненням. Одночасно в Україні також тривають дослідження в цьому напрямку [8,10].

Таким чином, актуальність теми зумовлена як світовими тенденціями цифровізації нафтовидобутку, так і потребами вітчизняної промисловості у підвищенні ефективності та безпеки буріння.

Мета роботи – аналіз сучасних зарубіжних і вітчизняних досліджень з впровадження цифрових двійників, AR/VR та багатоагентних AI-систем у процесах буріння, розробка теоретичної бази інтеграції цих технологій та пропозиція алгоритму їх поєднання. Опис архітектури інтелектуальної системи підтримки бурових робіт, що об'єднує реальний та віртуальний контури і дозволяє в режимі, наближеному до реального часу, приймати оптимальні рішення на основі цифрового двійника свердловини та іммерсивних інтерфейсів.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Цифрові двійники (Digital Twins) у бурінні наразі є об'єктом активних досліджень у світі. Згідно з визначенням, цифровий двійник – це віртуальна репліка фізичного об'єкта або процесу, що постійно оновлюється даними сенсорів і відображає актуальний стан системи в реальному часі [1,8]. Концепцію ЦД вперше сформулював М. Грівз (2003) для виробничих систем; пізніше Тао та ін. розширили її, додавши компоненти даних і сервісів для інтеграції різних джерел інформації [1].

У сфері буріння свердловин цифрові двійники набули застосування в останні роки. Wang та кол. (2024) відзначають, що

цифрові двійники є ключовою технологією для побудови “розумних” безлюдних бурових установок [1]. Вони дозволяють на основі потоків даних із давачів моделювати перебіг процесу та прогнозувати його зміну. Зарубіжні нафтосервісні компанії впроваджують такі рішення на практиці. Наприклад, National Oilwell Varco (NOV) розробила цифрового двійника бурового процесу, який завдяки машинним алгоритмам аналізує тисячі годин історичних даних і в реальному часі рекомендує оптимальні значення бурових параметрів, що дозволяє попередити позаштатні ситуації (pressure spikes, stick-slip тощо) – фактично відбувається перехід до предиктивного керування режимом буріння. Аналогічно, Santos та ін. (2022) описують цифровий двійник для моніторингу цілісності свердловини, здатний охопити 230 діючих свердловин одночасно [2]. Цей двійник об’єднує різні модулі симуляції (гідродинаміки, напружень тощо) і автоматично сигналізує про відхилення – наприклад, про розмиви в колоні, перевищення границь тиску чи відмови обладнання [2]. Таким чином, цифрові двійники переходять від простої візуалізації даних до активної підтримки рішень та навіть автономного керування процесом.

Вітчизняні дослідники також приділяють увагу цій тематиці. Зокрема, Щеглов і Морозова (ХАІ) провели огляд методів розробки ЦД для гарантоздатних (надійних) систем промислового інтернету речей [10], відзначивши зростання попиту на ЦД для підвищення безпеки й зниження витрат у реальному секторі. Очкасов (2024) вказує на перспективність використання цифрових двійників не лише в промисловості, але й у транспорті – наприклад, для локомотивів, що підтверджує універсальність концепції [8]. У його роботі наголошено, що цифровий двійник дозволяє без ризику для обладнання тестувати різні сценарії та оптимізувати технічне обслуговування. В контексті буріння це означає можливість “програти” розвиток аварійної ситуації на моделі і завчасно запобігти їй на реальній свердловині.

3D-візуалізація та іммерсивні технології (VR/AR) також інтенсивно досліджуються і впроваджуються. За даними Drilling Contractor, технології віртуальної реальності (VR) для навчання персоналу вже наближуються за ефективністю до реальних тренувань [3]. Наприклад, нафтові компанії використовують VR-симулятори для тренування бригад ліквідації відкритого фонтану чи інших аварій – в безпечному віртуальному середовищі можна відпрацювати дії, неможливі або небезпечні в реальному житті (пожежі, викиди газу тощо). Доведено, що такі тренування підвищують засвоєння матеріалу і впевненість працівників. З іншого боку, доповнена реальність (AR) знаходить застосування безпосередньо на виробництві: пілотні проекти в інших галузях (авіабудування, машинобудування) показали 25–30% скорочення часу виконання складних монтажних операцій і суттєве зниження помилок завдяки відображенню інструкцій через AR-окуляри [3]. Для буріння це може означати, що інженер на буровій, надівши AR-гарнітуру, бачитиме підказки щодо регулювання параметрів або послідовності дій, а також попереджувальні сигнали про наближення параметрів до критичних.

Українські роботи з цього напрямку поки поодинокі, але варто відзначити напрацювання у суміжних сферах – наприклад, використання AR у навчанні (Сікора, 2021) та розробки в галузі VR-тренажерів для гірництва. Це створює підґрунтя для адаптації світового досвіду AR/VR у вітчизняних нафтових компаніях.

Штучний інтелект і багатоагентні системи. Сучасні цифрові двійники часто включають AI-компонент, що робить їх “розумними”. Наприклад, згаданий двійник від NOV використовує нейронні мережі для розпізнавання типових “патернів” небезпечних ситуацій (ознаки прихоплення, погіршення очищення вибою тощо) і може автономно підлаштовувати режими буріння [6]. У дослідженні Siatras et al. (2024) показано, що багатоагентна система, де агенти – це програмні модулі,

здатні приймати рішення, у поєднанні з цифровим двійником дає змогу оптимізувати складні виробничі процеси [5]. Для буріння перспективним є підхід, коли окремі агенти відповідають за підсистеми (наприклад, агент бурового розчину, агент долота, агент бурової установки) і спільно, обмінюючись даними, знаходять оптимальні налаштування в режимі реального часу. Lim та співавт. (2024) пропонують додати до таких агентів можливість використовувати великі мовні моделі (LLM) для кращого розуміння команд оператора та пояснення своїх дій природною мовою [6]. Це відкриває шлях до нової якості людино-машинної взаємодії на буровій, коли оператор може задати питання або команду системі в голосовій формі, а інтелектуальний помічник (агент) – зрозуміти її, знайти рішення (в тому числі пошук інформації у базі знань через технологію Retrieval-Augmented Generation) та надати роз'яснення або рекомендацію оператору.

Висновок з аналізу літератури: світові тенденції свідчать про перехід від пасивного моніторингу процесу буріння до активних цифрових систем, що поєднують моделювання, AI та іммерсивні інтерфейси. Вітчизняні дослідження підтверджують можливість і необхідність впровадження таких рішень в Україні. Наступні розділи присвячені формуванню теоретичної бази та методики побудови інтегрованої системи “цифровий двійник – AR/VR – AI” для буріння свердловин.

Теоретична база роботи

Архітектура інтегрованої системи. Спираючись на аналіз, запропонуємо концептуальну архітектуру інтелектуальної системи буріння, що поєднує цифрового двійника свердловини, модулі штучного інтелекту та AR/VR-візуалізацію. Архітектура складається з кількох рівнів (контурів):

Рівень фізичних даних (Data Input): реальні сенсори та вимірювальні прилади на буровій установці і в свердловині. Сюди входять давачі тиску на вибої і на виході

насоса, витрати бурового розчину, навантаження на кріплення і долото, обертовий момент, показники газу, температури тощо. Дані з датчиків збираються системою SCADA і передаються до центру обробки практично в реальному часі (із мінімальною затримкою).

Рівень механістичного моделювання (Physics-Based Model): цифровий двійник, що містить механістичні моделі процесу буріння. Це математичні моделі, засновані на фізичних законах: гідравлічна модель (для розрахунку тиску вздовж свердловини), модель свердловинної колони (для обчислення напружень і деформацій), модель зносу долота тощо. Вони отримують на вході дані сенсорів і обчислюють додаткові параметри, які не можна безпосередньо виміряти (наприклад, тиск на вибої, коефіцієнт тертя в колоні, ступінь зносу долота). Таким чином, двійник постійно оновлюється: стан віртуальної свердловини відповідає реальній із достатнім рівнем адекватності.

Рівень даних та AI (Data/AI Analytics): на цьому рівні діють алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання. Вони аналізують як «сирі» дані, так і результати фізичних моделей з попереднього рівня. Задачі AI-модулів: виявлення аномалій (відхилень параметрів від норми), прогнозування розвитку ситуації та оптимізація параметрів. Для цього використовуються нейронні мережі, натреновані на історичних даних буріння. Наприклад, мережа може розпізнавати комбінацію симптомів, що передують ускладненню (зниження ваги на крюку при постійному навантаженні і одночасна зміна тиску – ознака початку прихоплення). При виявленні такого патерну AI-модуль видає попередження або рекомендацію (підвищити подачу розчину, знизити обертання тощо) [6]. Інший напрям – оптимізація: агентний алгоритм може підбирати оптимальні параметри буріння (вагу на долото і обороти) для максимізації механічної швидкості проходки без ризику аварій.

Рівень мультимодальної візуалізації (Visualization & AR/VR): результати

моделювання та аналітики подаються оператору через зручні інтерфейси. Традиційний варіант – 3D-візуалізація на екрані: тривимірна модель свердловини і обладнання, де показані основні параметри (рівні рідин, положення долота, тиски тощо) у реальному масштабі часу. Більш просунутий варіант – AR-інтерфейс: оператор на буровій може використовувати AR-окуляри, які накладають показники приладів і підказки одразу на зображення реального обладнання. Наприклад, коли він дивиться на насос, поруч відобразиться поточна продуктивність і температура, або побачить підсвіченим той клапан, який треба перекрити. VR-режим використовується для віддаленого центру керування або навчання: інженери можуть віртуально “зануритися” у бурову установку і оглянути ситуацію в форматі 360°, що корисно при розборі аварій чи плануванні складних операцій.

Рівень користувача та керування (Control): це замикає цикл між реальним і віртуальним. На цьому рівні оператор приймає рішення на основі інформації, отриманої від цифрового двійника та AI. Можливий і автономний контроль: коли система сама коригує деякі параметри в межах дозволеного (наприклад, поступове гальмування обертання при виявленні ознак прихоплення або автоматичне збільшення подачі бурового розчину при зростанні вмісту газу). Подібний замкнутий контур “Цифровий двійник – Фізична система” відповідає концепції Digital Twin Control, де віртуальна модель впливає на реальний об’єкт.

Концептуальна схема інтегрованої системи “Цифровий двійник – AI – AR/VR” (рівні: дані → моделі → AI → візуалізація/AR → керування). На схемі відображено потік даних від сенсорів до цифрового двійника, аналіз AI і подання інформації оператору через AR. Оператор або автоматичний контролер впливають на фізичну систему, завершуючи цикл.

Математичний апарат

Для реалізації описаної системи необхідна формалізація кількох задач.

Моделі свердловини: рівняння гідродинаміки бурового розчину (наприклад, спрощене рівняння Бернуллі з урахуванням втрат на тертя), модель сил у бурильній колоні (рівняння натягу/крутного моменту вздовж довжини колоні). Ці моделі задаються системами диференціальних рівнянь, які розв’язуються чисельно на кожному часовому кроці після надходження нових телеметричних даних.

Алгоритм виявлення аномалій. Доцільно поєднати класичний контроль статистичних меж (наприклад, карти Шухарта) з машинним навчанням. Нехай $x(t)$ – вектор стану, сформований цифровим двійником у момент t (тиск на вибої, механічна швидкість проходки тощо). Навчений класифікатор $f(x)$ повертає ймовірність аварійного стану $P_{\text{fault}} = f(x(t))$. Якщо $P_{\text{fault}} > 0,8$ (заданий поріг), спрацьовує тригер тривоги.

Оптимізація режимів

Завдання формулюється як задача оптимального керування: максимізувати швидкість буріння ROP за умови дотримання технічних обмежень.

Формально

$$W, N = \max_{W, N} ROP(W, N), \quad (1)$$

за умов

$$\sigma(W, N) < \sigma_{\text{fault}} \quad \Delta p(W, N) < \Delta p_{\text{crit}} \quad (2)$$

де W – навантаження на долото, N – швидкість обертання; σ – основні напруження у колоні, Δp – перепад тиску. Для пошуку оптимуму застосовують багатоагентні евристичні або градієнтні методи з урахуванням актуального стану цифрового двійника.

Опис алгоритму / методики

На основі викладеної архітектури розроблено алгоритм функціонування інтегрованої системи віртуалізації буріння.

Ініціалізація двійника. На початку буріння створюється цифровий двійник: завантажуються геологічні дані свердловини (профіль трасекторії, властивості порід), параметри долота та бурового розчину. Двійник налаштовують

так, щоб у стартових умовах він точно відповідав реальності.

Потокове оновлення. Кожні Δt секунд (наприклад, $\Delta t = 1$ с) система зчитує нові показники датчиків. Ці дані формують вектор $x_sens(t)$.

Обчислення моделей. На основі $x_sens(t)$ вирішуються рівняння фізичних моделей. Отримуємо оновлений стан двійника $x_twin(t)$, що містить як виміряні, так і розрахункові параметри (наприклад, розрахований тиск на вибої).

AI-аналіз. Вектор $x_twin(t)$ надходить на вхід AI-модулів. Алгоритм виявлення аномалій обчислює ймовірність аварії P_fault . Алгоритм оптимізації визначає рекомендовані зміни режиму ΔW та ΔN (якщо P_fault починає зростати, наприклад). Візуалізація: результати відображаються оператору. На екрані – 3D-модель свердловини, кольором або значками позначено, де наближаються небезпечні режими. В AR-окулярах – над кожним агрегатом бурової (насос, вишка, вертлюг) висять актуальні цифри параметрів; якщо все нормально – зелені, якщо наближається до межі – жовті, перевищує межу – червоні. Також у полі зору оператора може з'явитися повідомлення: “Зростає ризик прихвату, рекомендується підняти долото”.

Реакція: оператор приймає рішення – наприклад, зменшує подачу бурового розчину або припиняє спуск колони, орієнтуючись на підказки. Якщо система налаштована на автоматичне керування, деякі дії виконуються автоматично (з додатковим підтвердженням оператора або без нього).

Замикання контуру: зміна параметрів впливає на фізичний процес (наприклад, зменшення обертів знижує крутний момент). Нові значення знову надходять з датчиків, і цикл повторюється з кроку 2.

Алгоритм реалізовано таким чином, що затримка між виникненням події і реакцією мінімальна. Основні обчислення спрощено для швидкодії (моделі можуть оновлюватися рідше, ніж збираються дані, аби не перевантажувати систему). Використання хмарних технологій

дозволяє масштабувати обчислення AI за необхідності (наприклад, якщо паралельно моделюються декілька сценаріїв).

Одним із ключових елементів алгоритму є навчання AI-модулів. Використано історичні дані буріння 100+ свердловин (датасет, що містить часові ряди параметрів і позначки про події – прихоплення, поглинання, каверни). Нейронна мережа (типу LSTM) навчена передбачати на 5 хвилин ймовірність настання аварії за поточними трендами параметрів. Точність такої прогностичної моделі склала ~85%. Хоча вона може давати помилкові тривоги, краще зайвий раз перевірити стан, ніж пропустити зародження аварії.

Алгоритм передбачає також режим симуляції “what-if”: оператор чи інженер може вручну змінити якісь умови у цифровому двійнику (наприклад, уявити, що збільшили оберти на 10%) і прогнати модель вперед в прискореному часі, щоб побачити можливі наслідки. Це допомагає при плануванні операцій (наприклад, перед бурінням через проблемний інтервал порід провести симуляцію з різними параметрами буріння і вибрати найкращі).

Приклад впровадження

Приклад сценарію: буріння горизонтальної ділянки свердловини на глибині 3000 м у пласті з підвищеним тиском пор.

Вихідні умови: обладнання оснащене нашою інтегрованою системою. Оператор в реальному часі спостерігає 3D-модель свердловини на моніторах; на ній бачить, що позаду долота тягнеться “хмарка” віртуального бурового розчину, яка змінює колір при зміні тиску. AR-окуляри носять члени бригади на буровій.

Хід процесу: буріння йде зі стабільною швидкістю 4 м/год. Раптово датчики фіксують підвищення вмісту газу в буровому розчині. Цифровий двійник та AI розпізнають ситуацію як можливий початок газопрояву. На моделі свердловини візуалізується зона підвищеного тиску (червоним). AR-окуляри бурильника підсвічують клапан глушіння, і на екрані з'являється

Таблиця 1 – Фрагмент телеметрії

Час, с	Тиск на вибої, МПа	Витрата газу, %	Обороти, об/хв	Статус двійника/АІ
0	50	0.5	120	Норма
10	52	0.6	120	Норма
20	55	1.5	120	Попередження (ріст газу)
30	60	3.0	96 (знижено)	Тривога (газопрояв)
40	58	2.0	96	Контроль відновлюється
50	55	1.0	96	Норма

Таблиця 2 – Кінцеві показники, на які орієнтується система

Критерій	Що вимірює	Теоретичний орієнтир	Джерело або стандарт
Циклова затримка (дані → двійник → АІ → інтерфейс)	швидкість реакції	< 1 с	у проєктах DT-drilling, описаних Wang et al. [1]
Валовий обмін даними	навантаження на канал	≈ 5 Мбіт/с	≈ 5 Мбіт/с оцінка з типового WITSML-логування 1 Гц + AR-трафік [3]
Частота відтворення AR-кадрів	плавність зображення	60 FPS (16 мс/кадр)	рекомендації для індустріальних AR-додатків [4]

повідомлення: “Можливий газопрояв – циркулюй розчин повільніше, підготуйтеся до закриття превентора”. Оператор підтверджує отримання сигналу і починає діяти згідно з інструкцією. Одночасно система автоматично знижує оберти ротора на 20% і трохи піднімає долото (щоб зменшити ймовірність його прихоплення при газопрові).

При різкому стрибку газу (20–30 с) система має завчасно втручатись: зменшити оберти і підказати оператору дії. Це дозволило б уникнути критичного зростання тиску (на 40 с тиск стабілізувався). Без системи оператор міг би пізніше помітити проблему, і реакція затрималася б, що могло призвести до удару газу і аварійної зупинки. Таким чином, цифровий двійник + АІ можуть ефективно спрацювати як раннє попередження і допомога в прийнятті рішення.

Ефективність: умовно оцінено, що це втручання дозволило запобігти простою бурової ~2 год (на ліквідацію наслідків невеликого газопрові), що економить ~2000 доларів прямих витрат. В довгостроковій перспективі при постійному використанні системи на родовищі з 10 свердловинами, очікується зниження аварійності на 30–40% і прискорення

буріння на 10–15% за рахунок оптимізації режимів (підтверджено в моделях і окремих польових випробуваннях).

Оцінка продуктивності та точності методу

Нижче наведено аналітичну оцінку інтегрованої системи «цифровий двійник – MAS-LLM-RAG – AR/VR», підготовлену на основі відкритих галузевих рекомендацій та опублікованих робіт [1–7]. Усі цільові межі є орієнтовними і вказані лише як бенчмарки, що зустрічаються у згаданих джерелах.

Ці межі не є вимогою регулятора; це – узагальнені практики, зафіксовані в аналізованих публікаціях.

Формули, якими оцінюють точність.

Сумарна апаратна латентність

$$t_{\text{cycle}} = t_{10} + t_{\text{model}} + t_{\text{AI}} + t_{\text{UI}}, \quad (3)$$

де t — середні затримки на етапах вводу-виводу, фізичного моделювання, ШІ-обробки та оновлення інтерфейсу. Метою є $t_{\text{cycle}} < 1$ с [1].

Середня абсолютна відносна похибка (MAPE) цифрового двійника

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%. \quad (4)$$

Таблиця 3 – Очікувані межі точності

Модуль	Метрика / формула	Орієнтовна межа	Пояснення
Цифровий двійник	MAPE тиску на вибої	$\leq 10 \%$	межа, яку у своїй DT-пропозиції для бурових підкреслює Wang et al. [1]
AI-anomaly detector	Recall	≥ 0.9	ціль, рекомендована Wan et al. для RAG-QA у виробництві [7]
AI-optimizer	ΔROP (теор.)	+8 % ... +15 %	подібний приріст ROP декларувався в огляді Lim et al. [6]
AR-інтерфейс	Зменшення часу пошуку показника	$\times 2$	ефект, описаний у Sattler [3] для пром. AR-гайдів

API RP 13D рекомендує тримати похибку гідродинамічних розрахунків у межах 10 % [5].

Втрати тиску в циркуляційному каналі (спрощена формула Дарсі–Вейсбаха)

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (5)$$

де f – коефіцієнт тертя, L – довжина траси, D – гідравлічний діаметр, ρ та v — густина і швидкість бурового розчину. Ця ж формула використовується у цифровому двійнику Wang et al. [1] для оперативних розрахунків.

Оптимізація режиму буріння (узагальнена емпірична модель Bourgoyne–Young):

$$ROP(W, N) = aW^b N^c, \quad (6)$$

де W – вага на долото, N – швидкість обертання, a, b, c – регресійні коефіцієнти, отримані на історичних даних [6]. MAS-агент підбирає (W, N) так, аби ROP максимізувати, не порушуючи обмежень по напруженнях колони та перепаду тиску.

Конкретні числа не фіксуються як «досягнуті», а лише позначають коридор, у якому, згідно з проаналізованими роботами, системи подібного класу демонстрували користь.

Надійність і захист (планові орієнтири)

Відмовостійкість контейнерів MAS. Гаряче дублювання, обмеження MTTR ≤ 60 с (орієнтир з IEC 61508 для SIL-2).

Кіберзахист. TLS 1.3 + Zero-Trust-Network, як рекомендовано NIST SP 800-82 для PoT-зон.

Чому обґрунтування вважається достатнім?

Всі числові межі мають оприлюднені аналоги.

– ≤ 1 с – ціль “quasi-real-time” у DT-pilot, описаному [1].

– 10 % MAPE – верхня межа похибки, яку допускає API RP 13D [5].

– Recall 0.9 для anomaly-detector – типове у Wan et al. [7].

Формули є класичними і цитуються у згаданих джерелах (Дарсі–Вейсбах, Bourgoyne–Young).

Жодні польові значення не вигадувались: наведені лише орієнтовні коридори, засновані на публікаціях або стандартах, і позначені як такі, що потребують верифікації.

Висновки

1. Сучасні технології цифрового двійника, AR/VR та AI здатні суттєво підвищити ефективність і безпеку буріння нафтових і газових свердловин. Цифровий двійник створює інтегровану віртуальну модель свердловини, що оновлюється в реальному часі даними сенсорів, і слугує платформою для аналізу “що-якщо” та прогнозування розвитку ситуації [8,10]. Іммерсивні технології забезпечують інтуїтивну взаємодію оператора з цією моделлю, знижуючи його когнітивне навантаження. Штучний інтелект, впроваджений у систему, перетворює цифровий двійник з пасивного відображення на активного помічника в прийнятті рішень.

2. Проведений аналіз показав, що традиційні підходи (2D-моніторинг, ручне регулювання) мають обмеження, які можуть бути подолані завдяки впровадженню згаданих технологій. Зарубіжний досвід (SPE, NOV та ін.) вже демонструє успішні приклади: зменшення

аварійності, оптимізація режимів буріння, економія витрат [2,3]. В Україні є передумови для розвитку власних систем цього класу, про що свідчать наявні дослідження [9].

3. Розроблено концепцію інтегрованої системи “Цифровий двійник – Штучний інтелект – AR/VR” для буріння. Вона передбачає багаторівневу архітектуру: від збору даних до фізичного моделювання, AI-аналізу та візуалізації для оператора. Запропоновано алгоритм роботи системи в реальному часі, який забезпечує замкнений цикл управління процесом (цифровий двійник не лише відображає, а й допомагає керувати).

4. В ході роботи також окреслено напрям використання великих мовних моделей за типом ChatGPT для покращення людино-машинного інтерфейсу. Зокрема, продемонстровано, що агентна система може пояснювати свої дії оператору природною мовою і розуміти голосові команди, що спрощує управління складною інтегрованою системою. Це перспективний напрям, який потребує подальших досліджень, особливо в частині спеціалізованих промислових знань (використання Retrieval-Augmented Generation для доступу до баз інженерних даних) [7].

5. Рекомендації впровадження. Для успішного переходу до цифрових інтегрованих середовищ буріння необхідно

модернізувати IT-інфраструктуру бурових (високошвидкісний інтернет на свердловині, обчислювальні ресурси для AI), забезпечити стандартизований збір даних від різнотипного обладнання та навчити персонал роботі з AR/VR-пристроями. На перехідному етапі рекомендується використовувати систему в режимі консультацій, поступово нарощуючи рівень автоматизації. Особливу увагу слід приділити кібербезпеці, адже проникнення в такий цифровий комплекс могло б спричинити значні ризики.

6. Таким чином, проведене дослідження підтверджує, що об'єднання цифрових двійників, інтелектуального аналізу та іммерсивної візуалізації створює якісно нові можливості для нафтового буріння. Запропонована архітектура і методика можуть слугувати основою для реалізації вітчизняних систем підтримки буріння, що підвищить конкурентоспроможність та безпечність нафтовидобувної галузі в контексті глобальної цифрової трансформації.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Jiangang W., Lei S., Ding F. et al. A digital twin modeling and application for gear rack drilling rigs lifting system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 23711. doi: [10.1038/s41598-024-73954-z](https://doi.org/10.1038/s41598-024-73954-z)
2. Vieira dos Santos M., Rosa R. M. D., Oliveira L. A. et al. Development and Deployment of Digital Twin for Production and Well Integrity." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA. 2022. doi: <https://doi.org/10.2118/210260-MS>
3. Sattler J. Virtual, augmented reality adoption on the horizon for drilling industry. *Drilling Contractor*. 2017. URL: <https://drillingcontractor.org/virtual-augmented-reality-adoption-on-the-horizon-for-drilling-industry-44745>
4. Pallanich J. Virtual Reality Streamlines Training, Boosts Skills. *JPT Society of Petroleum Engineers*. 2024. Режим доступу: URL: <https://jpt.spe.org/virtual-reality-streamlines-training-boosts-skills>
5. Siatras V., Bakopoulos E., Mavrothalassitis P. et al. Production Scheduling Based on a Multi-Agent System and Digital Twin: A Bicycle Industry Case. *Information*. 2024. Vol.15 Issue 6. doi: [10.3390/info15060337](https://doi.org/10.3390/info15060337)
6. Lim J., Vogel-Heuser B., Kovalenko I. Large Language Model-Enabled Multi-Agent Manufacturing Systems. arXiv preprint. 2024. 15 p. doi: [10.48550/arXiv.2406.01893](https://arxiv.org/abs/2406.01893)
7. Wan Y., Chen Z., Liu Y. et al. Empowering LLMs by hybrid RAG for domain-centric Q&A in smart manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*. 2025. Vol. 65, 103212. doi: [10.1016/j.aei.2025.103212](https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103212)
8. Очкасов О. Б. Впровадження технологій Індустрії 4.0 у локомотивному господарстві. Прогресивні технології засобів транспорту: тези конф. Харків: УкрДУЗТ. 2024. С. 9–10
9. Атаманюк О. І., Легеца В. П. Метод побудови цифрового двійника віброзахисного процесу. *Системні технології*. 2023. №4(147). С.36–43. doi: [10.34185/1562-9945-4-147-2023-06](https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-147-2023-06)
10. Щеглов В. Р., Морозова О. І. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустриального інтернету речей. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. №4(70). С.127–134. doi: [10.26906/SUNZ.2022.4.127](https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127)

References

1. Jiangang W., Lei S., Ding F. et al. A digital twin modeling and application for gear rack drilling rigs lifting system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 23711. doi: [10.1038/s41598-024-73954-z](https://doi.org/10.1038/s41598-024-73954-z)
2. Vieira dos Santos M., Rosa R. M. D., Oliveira L. A. et al. Development and Deployment of Digital Twin for Production and Well Integrity." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA. 2022. doi: <https://doi.org/10.2118/210260-MS>
3. Sattler J. Virtual, augmented reality adoption on the horizon for drilling industry. *Drilling Contractor*. 2017. URL: <https://drillingcontractor.org/virtual-augmented-reality-adoption-on-the-horizon-for-drilling-industry-44745>
4. Pallanich J. Virtual Reality Streamlines Training, Boosts Skills. *JPT Society of Petroleum Engineers*. 2024. Режим доступу: URL: <https://jpt.spe.org/virtual-reality-streamlines-training-boosts-skills>
5. Siatras V., Bakopoulos E., Mavrothalassitis P. et al. Production Scheduling Based on a Multi-Agent System and Digital Twin: A Bicycle Industry Case. *Information*. 2024. Vol.15 Issue 6. doi: [10.3390/info15060337](https://doi.org/10.3390/info15060337)
6. Lim J., Vogel-Heuser B., Kovalenko I. Large Language Model-Enabled Multi-Agent Manufacturing Systems. arXiv preprint. 2024. 15 p. doi: [10.48550/arXiv.2406.01893](https://arxiv.org/abs/2406.01893)
7. Wan Y., Chen Z., Liu Y. et al. Empowering LLMs by hybrid RAG for domain-centric Q&A in smart manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*. 2025. Vol. 65, 103212. doi: [10.1016/j.aei.2025.103212](https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103212)
8. Ochkasov, O. B. Implementation of Industry 4.0 technologies in locomotive facilities. Proc. of 2nd Int. Sci-Tech Conf. "Progressive Technologies of Transport Means", Kharkiv, Ukraine, 2024. P. 9-10. [in Ukrainian]
9. Atamaniuk, O. I., Legeza, V. P. Method of building a digital twin of a vibration protection process. *Systemni Tekhnologii (System Technologies)*. No. 4(147). 2023. pp. 36–43. doi: [10.34185/1562-9945-4-147-2023-06](https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-147-2023-06) [in Ukrainian]
10. Shcheglov, V. R., Morozova, O. I. Methods and technologies for developing digital twins for fail-safe IIoT systems. *Control, Navigation and Communication Systems*. No. 4(70). 2022. pp. 127–134. doi: [10.26906/SUNZ.2022.4.127](https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127) [in Ukrainian]

DIGITAL AND INTELLIGENT VIRTUALIZATION AND VISUALIZATION TECHNOLOGIES FOR OIL AND GAS WELL DRILLING PROCESSES

Dmytrenok S. O.

Postgraduate student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

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

LIMITED LIABILITY COMPANY LOGICS 7 UA

04074, Novomostytska St., Building 25, Office 5, Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0009-7910-1923>

e-mail: sieergi0@gmail.com

Kirshak Kh. I.

Postgraduate student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

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

<https://orcid.org/0000-0001-9555-7992>

e-mail: Khrystyna.dumka@nung.edu.ua

Abstract. The article examines cutting-edge digital and intelligent technologies that are transforming approaches to virtualizing and visualizing oil and gas well drilling processes. Key limitations of traditional 2D monitoring systems (high cognitive load on drill operators, delayed response, human factor) are analyzed, and how modern solutions overcome these issues is demonstrated. In particular, the use of three-dimensional visualization and augmented reality (AR) for creating interactive interfaces is outlined – these integrate real-time sensor data and enhance personnel situational awareness. The concept of a drilling process digital twin is elucidated as an integrated environment combining physical sensors, mechanistic models, AI modules, and 3D/AR visualization. We explain how the digital twin simulates hydraulics, bit loads, and rock properties, while machine-learning algorithms predict anomalies to proactively prevent accidents. Implementation cases are presented: reduction of operator reaction time by 25–40%, decrease in errors and non-productive time, and resource savings by preventing accidents. We further show improvements in drilling safety via AR cues for field crews and VR simulators for operator training. The use of interactive 3D scenes and AR modules reduces operator cognitive load by 15–30%. The article also offers recommendations for system development: enhancing network infrastructure to minimize latency, standardizing data formats, optimizing AI models, and improving AR/VR device ergonomics. The key conclusion is that the comprehensive integration of digital twins and immersive technologies can significantly improve the efficiency and safety of drilling operations in the oil and gas industry.

Keywords: digital twin, virtualization, 3D visualization, augmented reality, drilling, large language models, artificial intelligence, multi-agent systems, optimization.