



Інформаційні програми та комп'ютерно-інтегровані технології

Прийнято 17.11.2025. Прорецензовано 20.12.2025. Опубліковано 30.12.2025.

УДК 622.692.4:004.93

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-144-155

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗАДАЧАХ ТРАНСПОРТУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ – СЬОГОДЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ

Козак О. Ф.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

<https://orcid.org/0009-0008-5663-4295>

e-mail: oleksii.kozak@nung.edu.ua

Анотація. У статті досліджено актуальність, сучасний стан і перспективи застосування інтелектуальних інформаційних технологій (ІІТ) у задачах транспортування природного газу. У світлі глобального зростання попиту на енергоресурси, необхідності декарбонізації паливно-енергетичного комплексу та підвищення вимог до ефективності й безпеки, ІІТ набувають особливого значення для забезпечення надійного функціонування газотранспортних систем (ГТС). Проведено аналіз стану ГТС України, її технічних потужностей і ролі у формуванні європейської енергетичної безпеки, особливо в умовах трансформації ринку природного газу та припинення транзиту російського газу. Узагальнено досвід сучасних досліджень, у яких ІІТ застосовуються для моделювання потоків газу, оптимізації режимів транспортування, прогнозування попиту на газ, виявлення витоків, запобігання аварійним ситуаціям, забезпечення кіберзахисту інфраструктури та ін. Особливу увагу приділено цифровим двійникам, системам диспетчерського керування і збору даних SCADA, методам машинного навчання та алгоритмам штучного інтелекту, які інтегруються для досягнення синергетичного ефекту в управлінні складними інженерними об'єктами. Висвітлено перспективи впровадження нейронних мереж і методів глибокого навчання для підвищення безпеки експлуатації, а також потенціал використання ІІТ для інтеграції ГТС із системами транспортування водню в межах політики декарбонізації ЄС. Зазначено, що поєднання інтелектуальних алгоритмів із економіко-математичними моделями дозволяє одночасно розв'язувати задачі технічної надійності, екологічної стійкості та економічної доцільності. Метою дослідження є розроблення наукових підходів до застосування ІІТ у задачах транспортування природного газу з урахуванням сучасних викликів, зокрема посилення енергетичної безпеки та інтеграції ГТС України в європейський енергетичний простір.

Ключові слова: газотранспортна система; моделювання газових потоків; оптимізація трубопровідної мережі; прогнозування попиту на газ; чисельне моделювання; цифрові двійники.

Запропоноване посилання: Козак, О. Ф. (2025). Інтелектуальні інформаційні технології в задачах транспортування природного газу – сьогодення і перспективи. Науковий вісник ІФНТУНГ, 2(59), 144-155. doi: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-144-155

* Відповідальний автор



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

Вступ

Зростання світового населення і економіки в поєднанні зі швидкою урбанізацією призводить до значного збільшення попиту на енергію. За оцінками ООН населення світу зросте із 7,8 мільярдів у 2020 році до приблизно 8,5 мільярдів у 2030 році та 9,7 мільярдів до 2050 року. Разом із цим, до 2050 року приблизно дві третини людей на земній кулі житимуть у містах (проти 55% зараз). У «Сценарії заявленої політики» WEO 2021 («STEPS») глобальні потреби в енергії зростуть приблизно на 26% до 2050 року, а світовий попит на електроенергію майже подвоїться [1].

Невпинне виснаження природних джерел енергії супроводжується одночасним збільшенням забруднення навколишнього середовища. Так, у 2019 році глобальні викиди діоксиду вуглецю (CO_2), пов'язані з енергетикою, зросли до 33,3 Гт, що є найвищим за всю історію спостережень, і приблизно на 45% більше, ніж у 2000 році (23,2 Гт). У 2020 році через реакцію на пандемію коронавірусу попит на первинну енергію впав майже на 4%, а викиди CO_2 знизились на 5,8%. У 2021 році викиди CO_2 повернулися на допандемічний рівень, підвищившись на 5% – до 33 Гт [1].

Забезпечення енергетичної незалежності України передбачає нарощування власного видобутку вуглеводнів, розширення географії джерел їхнього постачання і маршрутів транспортування, використання відновлювальних та нетрадиційних джерел енергії і енергоощадних технологій, широке запровадження декарбонізації енергетичних палив. Згідно з даними Державної служби статистики України в загальному постачанні первинної енергії за період 2007 - 2021 років частка природного газу складала (39,9 - 27,6)% і була найбільшою серед усіх джерел постачання [2]. Тому для України природний газ відігравав та відіграватиме до 2050 року роль пріоритетного енергоресурсу [3].

Україна володіє однією з найпотужніших і найрозгалуженіших у світі систем транспортування та зберігання природного газу. До складу газотранспортної системи (ГТС) ТОВ «Оператор ГТС України» входять газогони загальною довжиною 37,0 тис. км, з них 22,2 тис. км – магістральні газопроводи, 72 компресорні станції. При цьому 281 млрд м^3 /рік – потужність ГТС на вході, 146 млрд м^3 /рік – потужність на виході [4]. Компанія АТ «Укртрансгаз» володіє 12 підземними сховищами газу (ПСГ), розташованими по всій Україні. Їхня загальна місткість складає 31 млрд м^3 , що

співрозмірно з обсягами ПСГ Франції, Італії, Австрії і Угорщини разом взятими. Українські ПСГ за обсягом зберігання займають перше місце в Європі та третє у світі [5]. Разом з цим, припинення з 1 січня 2025 року транзиту російського газу вітчизняною ГТС зумовило нові виклики щодо її надійного функціонування і перспективи подальшої інтеграції в енергетичний сектор Європейського Союзу [6].

Мета роботи

Проаналізувати та систематизувати відомі теоретичні і практичні наукові підходи до застосування інтелектуальних інформаційних технологій (ІТ) у задачах транспортування природного газу та визначити перспективні напрями подальших досліджень, спрямованих на забезпечення надійного функціонування ГТС України в умовах сучасних викликів.

Основна частина (критичний і системний огляд праць)

Впродовж останніх двох десятиріч опубліковано низку наукових праць, що стосуються використання ІТ у задачах транспортування і зберігання природного газу.

Окремий масив досліджень спрямований на застосування цих технологій для керування як ГТС у цілому, так і її окремими ділянками. Так, у роботах [7, 8, 9] висвітлюється широкий спектр питань, що охоплюють передові ІТ, розробку систем, структур та функцій програмно-технічних комплексів управління трубопроводами і трубопровідними мережами протягом їхнього життєвого циклу з урахуванням економічних та екологічних аспектів. Праця [7] містить системний огляд ключових технологій інтелектуальних трубопроводів на усіх стадіях їхнього життєвого циклу: від проектування до експлуатації, включаючи IoT, big data, оптимізаційні моделі. Зокрема проаналізовані проблеми інтеграції гетерогенних даних, цифрових двійників, багатокритеріальної оптимізації. Праця [10] присвячена розробці системи оперативного керування режимами газопроводу з метою забезпечення оптимальних значень вихідного параметра методами математичного й динамічного програмування. У роботі [11] подано інтегрований програмно-технічний комплекс (ШТК) для управління ГТС. Він складається з чотирьох окремих програмно-технічних комплексів (ПТК), призначених для автоматизації управління за певними напрямками роботи. Усі ПТК об'єднані спільним інтерфейсом користувача та єдиними інформаційними ресурсами. Системна оболонка ШТК

створює для кожного користувача власне віртуальне середовище, у якому він може отримувати доступ до всіх обчислювальних та інформаційних ресурсів і користуватися функціями будь-якого з ПТК залежно від своїх завдань.

Низка наукових досліджень зосереджена на сучасних ІТ для моделювання, аналізу й оптимізації роботи ГТС. Зокрема, розглядається технологія цифрових двійників (digital twins) як нова концепція, що стала центром уваги в промисловості, а за останні роки – і в академічних колах [12, 13]. Моделювання є основною технологією цифрового двійника. Його місія полягає в об'єктивному, точному описі і прогнозуванні стану та поведінки реальної фізичної системи. У праці [14] наведено огляд впровадження цифрових двійників у трубопровідних системах. Новий підхід до оптимізації мережі магістральних газопроводів, який поєднує методи глибокого підкріпленого навчання (Deep Reinforcement Learning) із моделями газотранспортної мережі, запропонований авторами статті [15]. Робота [16] присвячена застосуванню алгоритмів оптимізації на основі поведінки мурах (Multi-Objective Ant Colony Optimization, MOACO – багатоцільова оптимізація колонії мурах). У роботах [17, 18, 19] розглядаються питання моделювання та оптимізації технологічних процесів, маршрутів транспортування в ГТС. У працях [20, 21] застосовано скінченно-елементний підхід до чисельного моделювання динаміки руху газу в трубопроводах і трубопровідних мережах. Цей підхід реалізовано у програмному комплексі SIMONE, призначеному для моделювання і оптимізації в газовій промисловості. Комплекс створений компанією SIMONE Research Group (Чеська республіка) [22], що співпрацює з німецькою фірмою LIWACOM Information-technik GmbH. Співпраця стосується переважно маркетингових заходів і впровадження програмних засобів у реальне використання, а також сервісного обслуговування користувачів. Крім того, LIWACOM розробляє власні частини програмного забезпечення, зокрема, інтерфейс користувача, контроль функцій реального часу та інтерфейс для інтеграції систем диспетчерського контролю і збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA). Програмний комплекс SIMONE встановлено в понад 100 газових компаніях, серед яких ТОВ «Оператор ГТС України», і 10 університетах у 49 країнах світу.

Ряд праць присвячено ІТ для виявлення аварійних ситуацій і запобігання їх виникненню в ГТС. Так, у роботі [23] запропоновано

метод виявлення витоків газу у трубопроводах із використанням просторово-часової уваги (Spatial-Temporal Attention Network), що поєднує графові мережі (Graph Attention Network) для моделювання просторових залежностей між сенсорами (вузлами) системи та мережі з тимчасовою увагою (Temporal Attention) для моделювання часових змін у серіях даних сенсорів, забезпечуючи високу точність діагностики, навіть за малих отворів і складної топології мережі. У статті [24] пропонується метод глибокого навчання, що включає дві нейронні мережі – термодинамічно-інформовану та булеву мережу компресора, щоб забезпечити інтелектуальну диспетчеризацію трубопроводів природного газу та водню для їхньої безпечної експлуатації і прогнозування енергопостачання споживачів. Праця [25] описує методи оцінки загроз для трубопроводів із використанням систем інтелектуального діагностування. У роботі [26] розглядається використання новітніх ІТ для забезпечення експлуатації, моніторингу безпеки, прогнозування залишкового ресурсу та виявлення несправностей нафтових і газових трубопроводів. Автори публікації [27] поєднують технологію цифрового двійника з фізичним моделюванням і алгоритмами машинного навчання, щоб підвищити безпеку, точність виявлення аномалій та ефективність технічного обслуговування трубопроводів нафтогазової промисловості в режимі реального часу. У праці [28] наведено огляд робототехнічних пристроїв для інспекції трубопроводів із акцентом на інтелектуальні системи навігації і аналізу даних. У роботах [29, 30] досліджується застосування машинного навчання для оцінки цілісності трубопроводів і планування необхідних заходів для їх обслуговування. У науковій публікації [31] розглядається проблема діагностики витоків газу на ділянках газопроводів, що тісно пов'язана з оцінкою і нормуванням втрат газу через негерметичність газопровідної мережі. Праці [32, 33] демонструють високу ефективність комбінування цифрового моделювання газопроводів із методами машинного навчання, що забезпечує підвищену точність виявлення витоків, можливість роботи в перехідних режимах, практичну придатність для складних і протяжних трубопровідних систем. Статті [34, 35] пропонують науковий підхід, що має високий потенціал для практичного застосування в ГТС: підвищує безпеку, зменшує ризики втрат, дає змогу ефективно реагувати на витoki. Зазначені праці є важливим внеском в ІТ – вони поєднують ма-

шинне навчання, цифровий двійник і візуалізацію в реальному часі.

Низка наукових робіт висвітлює комплексне уявлення про те, як ІТ використовуються для посилення кібербезпеки при транспортуванні природного газу. Зокрема, у роботі [36] досліджуються промислові системи керування (Industrial Control Systems, ICS), що включають системи диспетчерського контролю та збору даних SCADA, розподілені системи управління і програмовані логічні контролери, які відіграють вирішальну роль в управлінні промисловими процесами та їх регулюванні. Крім того, у праці досліджується інтеграція методів машинного навчання для підвищення кібербезпеки ICS, що включають системи транспортування газу. У роботі [37] розглядається використання методів машинного навчання для підвищення безпеки ICS, які включають системи транспортування нафти та газу. Праця охоплює виявлення загроз, аномалій і прогнозне обслуговування ICS. У роботах [38, 39] досліджується інтеграція ІТ, таких як хмарні обчислення, великі дані, Інтернет речей і штучний інтелект (ШІ) для безпечної експлуатації та обслуговування систем видобутку нафти і газу, включаючи захист від кіберзагроз.

Аналіз праць [40, 41] доводить необхідність системного підходу до вирішення проблем впровадження ІТ в ГТС. В оглядовій статті [40] на основі аналізу сучасних трендів 2020–2025 років виконано систематичний огляд технологій штучного інтелекту (машинне навчання, глибоке навчання) у забезпеченні безпеки й ефективності роботи газових трубопроводів. Проаналізовані методи виявлення витоків, оптимізації транспортування, прогнозування відмов, цифрові двійники, SCADA, генеративні нейронні мережі та ін. Оглядова стаття [41] аналізує застосування ШІ протягом усіх етапів життєвого циклу трубопроводів (проектування, експлуатації, обслуговування), оцінює можливості та ризики впровадження ШІ, включно з глибинним навчанням та фізичними моделями, надає системне узагальнення підходів для підвищення надійності та ефективності енергетичних мереж. Дослідники часто підкреслюють: складність інтеграції та синхронізації гетерогенних даних для побудови інтелектуальних моделей; нестачу якісних тренувальних наборів даних; складність моделювання нелінійної мультифізичної системи та її багатокритеріальної оптимізації; труднощі інтеграції з існуючою інфраструктурою; ризики повністю автоматизованого керування і кіберзагроз.

Дискусія

Наведений вище огляд закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій дає підстави акцентувати увагу на наступному. Застосування ІТ у задачах транспортування природного газу є вкрай актуальним. Воно не лише відповідає національним потребам України в забезпеченні енергетичної незалежності та безпеки, але й сприяє інтеграції нашої держави в глобальні енергетичні процеси, забезпечуючи сталий розвиток та інновації в галузі енергетики. Транспортування природного газу – це складний процес, що потребує ефективного і надійного планування, моніторингу та керування [42], особливо з урахуванням перспектив використання потужностей європейських операторів ГТС, включно з ТОВ «Оператор ГТС України», для транспортування зеленого водню до Європейського Союзу з акцентом на технічну та фінансову підтримку політики декарбонізації в секторах теплопостачання/охолодження і транспорту [6, 43]. ІТ відіграють дедалі важливішу роль у цьому процесі. Використання ІТ може допомогти покращити ефективність, безпеку та надійність транспортування природного газу, що є критично важливим в умовах сучасних викликів і зростаючих вимог до енергетичної інфраструктури. Разом із цим, використання ІТ – багатогранна наукова проблема, оскільки поєднує в собі питання енергетики, інформатики, логістики, екології, економіки та кібербезпеки.

Попри певні досягнення у сфері застосування ІТ у задачах транспортування природного газу, низка важливих аспектів залишається недостатньо дослідженою і потребує подальшого наукового опрацювання. Ось кілька ключових напрямків, на яких доцільно зосередитися в межах зазначеної проблематики:

– *керування ГТС*: ІТ можуть використовуватися для збору й аналізу даних, керування в реальному часі потоками природного газу в мережі, щоб забезпечити мінімізацію витрат на транспортування природного газу та задовольнити попит споживачів на блакитне паливо. Керування ГТС доцільно поділити на чотири напрями:

- а) керування транспортуванням газу;
- б) керування інформаційними процесами;
- в) керування експлуатацією споруд ГТС;
- г) керування бізнес-процесами.

При цьому варто зазначити, що якісне оперативно-диспетчерське керування ГТС можливе лише за умови адекватного математичного опису газотранспортних процесів, що охоплюють як лінійні, так і вузлові об'єкти

мережі. У лінійних об'єктах довжина ділянки трубопроводу багаторазово перевищує його діаметр, а течію газу в них описують рівняннями з частинними похідними, що залежні від просторової координати та часу. Вузлові об'єкти – це елементи трубопровідної мережі малої протяжності, течію газу в яких описують за допомогою звичайних диференціальних рівнянь, залежних від часу;

– *моделювання та оптимізація технологічних процесів, маршрутів транспортування в ГТС*: ІТ-системи можуть моделювати й аналізувати режими роботи ГТС, пропускну здатність газопроводів, запас газу в ГТС, ціну на газ, погодні умови, попит на газ та інші фактори, щоб визначити найефективніші маршрути транспортування. Для розв'язання проблемних аспектів розглядуваного напрямку перспективним є використання цифрових двійників, які дозволяють створити віртуальну копію фізичної системи, що допомагає в її моніторингу та керуванні в реальному часі. Поряд із цим, застосування алгоритмів оптимізації на основі поведінки мурах МОАСО буде корисним для пошуку шляхів мінімізації витрат на експлуатацію мережі газопроводів та оптимізації маршрутів транспортування. Це дозволить оптимізувати використання газотранспортної інфраструктури для економії енергоресурсів і зменшення викидів CO₂ та парникових газів. Разом із цим слід, зауважити, що згадане вище чисельне моделювання, безсумнівно, є важливою частиною ІТ. Застосування чисельного моделювання, з одного боку, дозволяє оптимізувати технологічні процеси в газопроводах, враховуючи різні змінні параметри цих процесів і умови експлуатації. Це може включати, наприклад, моделювання потоків, тиску, температури тощо для забезпечення максимальної ефективності та надійності ГТС. Також чисельні моделі можуть обробляти великі обсяги даних для аналізу та виявлення закономірностей, що є ключовим елементом ІТ. Результатом є підвищення точності прогнозування режимів роботи, своєчасне виявлення потенційних несправностей і прийняття обґрунтованих управлінських рішень. З іншого боку, чисельне моделювання не характеризується властивостями самонавчання, адаптивності до нових умов або здатності до нестандартного мислення, які традиційно пов'язуються із ШІ. Однак інтеграція з методами ШІ та машинного навчання відкриває можливості для більш ефективного прогнозування і оптимізації складних систем, зокрема ГТС. Так, використання чисельного

моделювання у створенні цифрових двійників є прикладом такої інтеграції;

– *виявлення аварійних ситуацій і запобігання їх виникненню*: ІТ можуть використовуватися для управління аварійними ситуаціями, такими як витoki газу або переривання постачання. Одним із перспективних шляхів подолання проблемних аспектів цього напрямку є впровадження нейронних мереж. Самоадаптованість цієї мережевої структури в поєднанні з методами глибокого навчання дозволяє розширити їхнє застосування для широкого діапазону інженерних сценаріїв із змінним фазовим станом транспортованого середовища. Кількість фаз, що утворюються під час транспортування, прогнозується за допомогою зазначеної моделі у вигляді індексу, що характеризує безпеку експлуатації з урахуванням впливу компонентного складу транспортованого газу, температури та тиску навколишнього середовища. Такий підхід сприятиме зменшенню шкоди від аварійних ситуацій і швидшому відновленню штатного функціонування ГТС;

– *моніторинг стану трубопроводів*: ІТ можуть використовуватися для моніторингу стану трубопроводів та інших компонентів системи транспортування природного газу, щоб виявляти потенційні проблеми та запобігати аваріям. Це допомагатиме покращити безпеку та надійність роботи ГТС;

– *прогнозування попиту на газ*: ІТ-системи можуть використовуватися для прогнозування попиту на газ з урахуванням таких факторів, як-от сезонні коливання, погода, економічні умови та ціни на енергоносії. Ця інформація може бути використана для планування видобутку та транспортування газу, а також для запобігання його дефіциту або надлишку;

– *інтеграція з іншими енергетичними системами*: ІТ дозволяють інтегрувати ГТС з іншими енергетичними мережами, такими як електричні або теплові. Це сприятиме більш гнучкому та ефективному управлінню енергоресурсами;

– *кібербезпека*: гарантування безпеки ГТС є надзвичайно важливим через потенційно серйозні наслідки кібератак. У зв'язку з цим ІТ-системи можуть використовуватися для захисту газотранспортної інфраструктури від кіберзагроз. Включно із сегментацією мережі, контролем доступу, керуванням виправленнями та моніторингом безпеки це дозволить виявляти і блокувати шкідливе стороннє втручання, шифрувати дані й обмежувати доступ до критично важливих компонентів ГТС;

– *зниження шкідливого впливу на довкілля*: ІТ можуть допомогти зменшити викиди парникових газів та інших забруднювачів довкілля під час експлуатації ГТС шляхом використання зеленого водню і впровадження політики декарбонізації енергетичних палив. Це відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки та сталого розвитку енергетичного сектору;

– *економічні аспекти*: ІТ-системи можуть використовуватися для аналізу ринку природного газу і прогнозування його розвитку на основі великих даних. Ефективність впровадження ІТ у задачах транспортування природного газу оцінюють за допомогою відповідних економіко-математичних моделей.

Висновки

ІТ мають широке застосування і значний потенціал у задачах транспортування природного газу, що підвищує ефективність, безпеку та надійність ГТС. Очікується, що використання ІТ у цій сфері продовжуватиме зростати в

найближчі роки. Подальші дослідження в зазначеній галузі сприятимуть інноваціям, розвитку нових рішень і технологій, зокрема «зеленої стратегії» безкарбонового майбутнього європейського континенту, зміцненню енергетичної безпеки України, а також інтеграції нашої держави в глобальні енергетичні процеси в умовах нагальних викликів сьогодення.

Ключові проблеми потребують міждисциплінарного і системного підходу, оскільки полягають у неоднорідності елементів системи, цифровій роз'єднаності, складності моделювання реальних динамічних процесів та неузгодженості між технічними, організаційними та нормативними вимогами.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. World Energy Needs and Nuclear Power. *World Nuclear Association. Current and Future Generation*. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/world-energy-needs-and-nuclear-power> (дата звернення: 05.02.2025).
2. Енергетичний баланс України. *Державна служба статистики України. Економічна статистика / Економічна діяльність / Енергетика*. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/energ/en_bal/arh_2012.htm (дата звернення: 05.02.2025).
3. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування. *Національний інститут стратегічних досліджень*. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-12/sukhodolia_energy_security_sayt-1.pdf (дата звернення: 05.02.2025).
4. Технічні дані. *ТОВ «Оператор ГТС України». Можливості ГТС*. URL: <https://tsoua.com/gts-infrastruktura/mozhlyvosti-gts/tehnichni-dani/> (дата звернення: 05.02.2025).
5. Підземні сховища газу. *АТ «Укртрансгаз». Клієнтам ПСГ*. URL: <https://utg.ua/utg/psg/underground-gas-storages/> (дата звернення: 05.02.2025).
6. Стратегія ЄС з інтеграції енергетичної системи: можливості для України. *ГО «Діксі Груп»*. URL: https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2021/03/PB_Energy-System-Integration-Strategy.pdf (дата звернення: 05.02.2025).
7. Review on intelligent pipeline technologies: A life cycle perspective / Z. Li et al. *Computers & Chemical Engineering*. 2023. Vol. 175. 108283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108283> (дата звернення: 05.02.2025).
8. Advanced Intelligent Pipeline Management Technology / ed. by H. Su et al. Singapore : Springer Singapore, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-19-9899-7> (дата звернення: 05.02.2025).
9. An Intelligent Energy Management Information System with Machine Learning Algorithms in Oil and Gas Industry / J. Li et al. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2023. Vol. 2023. 3385453. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/3385453> (дата звернення: 05.02.2025).
10. Грудз В., Михалків В., Рудко В., Тимків Д. Розробка системи оперативного керування режимами газопроводу. *Нафтова і газова промисловість*. 1996. № 4. С. 31–32.
11. Чекурін В. Ф., Припула М. Г., Химко О. М. Структура та функції інтегрованого програмно-технічного комплексу для автоматизації управління газотранспортною системою. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Львів, 2013. № 774 : Автоматика, вимірювання та керування. С. 51–60. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/6427ea91-e1e2-4baa-b483-cc60f0b76ec7/content> (дата звернення: 05.02.2025).

12. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358> (дата звернення: 05.02.2025).

13. Framework for Optimal and Autonomous Decision-Making in Cyber-Physical Systems: Enhancing Reliability and Adaptability in the Oil and Gas Industry / C. M. Rebello et al. 2023. 27 p. (Preprint. arXiv:2311.12755). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.12755> (дата звернення: 05.02.2025).

14. Li B., Gai J., Xue X. The Digital Twin of Oil and Gas Pipeline System. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53, iss. 5 : 3rd IFAC Workshop on Cyber-Physical & Human Systems CPHS 2020. P. 710–714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.162> (дата звернення: 05.02.2025).

15. A novel optimization framework for natural gas transportation pipeline networks based on deep reinforcement learning / Z. E. Liu et al. *Energy and AI*. 2024. P. 100434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100434> (дата звернення: 05.02.2025).

16. Arya A. K. Optimal operation of a multi-distribution natural gas pipeline grid: an ant colony approach. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021. Vol. 11. P. 3859–3878. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01266-3> (дата звернення: 05.02.2025).

17. Чекурін В. Ф. До побудови програмної системи для моделювання та оптимізації процесів транспортування природного газу. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2007. № 5. С. 158–169.

18. Чекурін В., Притула М., Химко О. Математична модель структури газотранспортної системи. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 771. С. 187–196.

19. Химко О., Чекурін В. Моделювання структури програмного комплексу для управління газотранспортними системами. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 15–20 травня 2017 р. / Голіней, 2017. С. 28–31.*

20. Kralik J., Stiegler P., Vostry Z., Zavorka J. Modelling the Dynamics of Flow in Gas Pipelines. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*. 1984. Vol. 14, no. 4. P. 586–596.

21. Kralik J., Stiegler P., Vostry Z., Zavorka J. A Universal Dynamic Simulation Model of Gas Pipeline Networks. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*. 1984. Vol. 14, no. 4. P. 597–606.

22. COMPANY | About Company. *SIMONE Research Group s.r.o. Solutions For Simulation And Optimisation In The Gas Industry*. URL: <https://www.simone.eu/simone-company-about.asp> (дата звернення: 05.02.2025).

23. Research on Detection Methods for Gas Pipeline Networks Under Small-Hole Leakage Conditions / Y. Zhao et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 3. P. 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25030755> (дата звернення: 05.02.2025).

24. Zhang T., Bai H., Sun S. Intelligent Natural Gas and Hydrogen Pipeline Dispatching Using the Coupled Thermodynamics-Informed Neural Network and Compressor Boolean Neural Network. *Processes*. 2022. Vol. 10, no. 2. 428. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020428> (дата звернення: 05.02.2025).

25. AI-Based Energy Transportation Safety: Pipeline Radial Threat Estimation Using Intelligent Sensing System / C. Zhu et al. 2023. 9 p. (Preprint. arXiv:2312.11583). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.11583> (дата звернення: 05.02.2025).

26. Intelligent Methods for Pipeline Operation and Integrity / Y. Yang et al. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2023. Vol. 15, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1490> (дата звернення: 05.02.2025).

27. Wang Y. Digital Twin-Based Real-Time Monitoring and Intelligent Maintenance System for Oil and Gas Pipelines. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2025. Vol. 10, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.2478/amns-2025-0849> (дата звернення: 05.02.2025).

28. Robots for pipeline inspection tasks—A survey of design philosophy and implementation technologies / M. Wang et al. *2021 5th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT)*, Haikou, China, 29–31 October 2021. IEEE, 2021. P. 427–432. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACAIT53529.2021.9731152> (дата звернення: 05.02.2025).

29. Rachman A., Zhang T., Ratnayake R. M. C. Applications of machine learning in pipeline integrity management: A state-of-the-art review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021. Vol. 193. 104471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104471> (дата звернення: 05.02.2025).

30. Herrera R. H., Christensen P., Elvers A. Machine Learning in Pipeline Inspection: Applications of supervised learning in non-destructive evaluation. *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2019. Vol. 24, no. 10. URL: <https://www.ndt.net/?id=24701> (дата звернення: 05.02.2025).

31. Химко О., Гринів О., Притула Н., Притула М. Алгоритмічний метод діагностики витоків газу на ділянках магістральних газопроводів. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. Львів, 2015. № 826. С. 404–412.
32. Oshingbesan A. Leak Detection in Natural Gas Pipeline Using Machine Learning Models. 2022. 82 p. (Preprint. arXiv:2209.10121). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.10121> (дата звернення: 05.02.2025).
33. Gas Pipeline Leak Detection by Integrating Dynamic Modeling and Machine Learning Under the Transient State / J. Kim et al. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 21. P. 5517. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17215517> (дата звернення: 05.02.2025).
34. Development of Digital/Visual Twin for Real-Time Leak Detection in Gas Pipelines Under Multiphase Flow Conditions / W. A. Al-Ammari et al. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/ghg.2379> (дата звернення: 05.02.2025).
35. Research on gas pipeline leakage model identification driven by digital twin / D. Wang et al. *Systems Science & Control Engineering*. 2023. Vol. 11, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2023.2180687> (дата звернення: 05.02.2025).
36. Nankya M., Chataut R., Akl R. Securing Industrial Control Systems: Components, Cyber Threats, and Machine Learning-Driven Defense Strategies. *Sensors*. 2023. Vol. 23, iss. 21 : Neural Insights in Smart Factories. 8840. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23218840> (дата звернення: 05.02.2025).
37. Machine learning in industrial control system (ICS) security: current landscape, opportunities and challenges / A. M. Y. Koay et al. *Journal of Intelligent Information Systems*. 2023. Vol. 60. P. 377–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10844-022-00753-1> (дата звернення: 05.02.2025).
38. Zhang L., Wang J. Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: Connotations and key technologies. *Natural Gas Industry B*. 2023. Vol. 10, iss. 3. P. 293–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2023.05.006> (дата звернення: 05.02.2025).
39. Nemec R. Artificial Intelligence and Pipelines – A Smart Way to Go. *P&GJ Online*. 2022. Vol. 249, no. 1. URL: <https://pgjonline.com/magazine/2022/january-2022-vol-249-no-1/features/artificial-intelligence-and-pipelines-a-smart-way-to-go> (дата звернення: 05.02.2025).
40. Magdin M. Literature review: Current trends and advances in the use of artificial intelligence for ensuring the safety and efficiency of gas pipeline operations. *Results in Engineering*, 2025, 28, 107309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107309>
41. Lu Hongfang, Frank Cheng Y. Artificial Intelligence in Energy Pipelines: Opportunities and Risks. *Engineering*, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.08.032>
42. Трубопровідний транспорт газу / М. П. Ковалко та ін. Київ : АренаЕКО, 2002. 600 с.
43. The Role Of Natural Gas In Europe Towards 2050. *Norwegian University of Science and Technology. Energy Transition Initiative*. URL: <https://www.ntnu.edu/energytransition/the-role-of-natural-gas-in-europe-towards-2050> (дата звернення: 05.02.2025).

References

1. World Nuclear Association. (n.d.). *World energy needs and nuclear power. Current and future generation*. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/world-energy-needs-and-nuclear-power>
2. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). *Enerhetychnyi balans Ukrainy. Ekonomichna statystyka / Ekonomichna diialnist / Enerhetyka* [Energy balance of Ukraine. Economic statistics / Economic activity / Energy]. https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/energ/en_bal/arh_2012.htm [in Ukrainian]
3. National Institute for Strategic Studies. (2020). *Enerhetychna bezpeka Ukrainy: metodolohiia systemnoho analizu ta stratehichnoho planuvannia* [Energy security of Ukraine: Methodology of system analysis and strategic planning]. https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-12/sukhodolia_energy_security_sayt-1.pdf [in Ukrainian]
4. Gas TSO of Ukraine. (n.d.). *Tekhnichni dani. Mozhlyvosti HTS* [Technical data. GTS capabilities]. <https://tsoua.com/gts-infrastruktura/mozhlyvosti-gts/tehnichni-dani/> [in Ukrainian]
5. Ukrtransgaz. (n.d.). *Pidzemni skhovyshcha hazu. Kliientam PSH* [Underground gas storages. For UGS clients]. <https://utg.ua/utg/psg/underground-gas-storages/> [in Ukrainian]

6. DiXi Group. (2021). *Stratehiia YeS z intehtratsii enerhetychnoi systemy: mozhlyvosti dlia Ukrainy* [EU strategy on energy system integration: Opportunities for Ukraine]. https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2021/03/PB_Energy-System-Integration-Strategy.pdf [in Ukrainian]
7. Li, Z., et al. (2023). Review on intelligent pipeline technologies: A life cycle perspective. *Computers & Chemical Engineering*, 175, 108283. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108283>
8. Su, H., et al. (Eds.). (2023). *Advanced intelligent pipeline management technology*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-9899-7>
9. Li, J., et al. (2023). An intelligent energy management information system with machine learning algorithms in oil and gas industry. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2023, 3385453. <https://doi.org/10.1155/2023/3385453>
10. Hrudz, V., Mykhalkiv, V., Rudko, V., & Tymkiv, D. (1996). Rozrobka systemy operatyvnoho keruvannia rezhymamy hazoprovodu [Development of a system for operational control of gas pipeline modes]. *Naftova i hazova promyslovist*, (4), 31–32. [in Ukrainian]
11. Chekurin, V. F., Prytula, M. H., & Khymko, O. M. (2013). Struktura ta funksiintehrovenoho prohranno-tekhnichnoho kompleksu dlia avtomatyzatsii upravlinnia hazotransportnoiu systemoi [Structure and functions of an integrated software and hardware complex for automation of gas transportation system management]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Seriia: Avtomatyka, vymyriuvannia ta keruvannia*, (774), 51–60. <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/6427ea91-e1e2-4baa-b483-cc60f0b76ec7/content> [in Ukrainian]
12. Fuller, A., et al. (2020). Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>
13. Rebello, C. M., et al. (2023). *Framework for optimal and autonomous decision-making in cyber-physical systems: Enhancing reliability and adaptability in the oil and gas industry* (Preprint). arXiv:2311.12755. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.12755>
14. Li, B., Gai, J., & Xue, X. (2020). The digital twin of oil and gas pipeline system. *IFAC-PapersOnLine*, 53(5), 710–714. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.162>
15. Liu, Z. E., et al. (2024). A novel optimization framework for natural gas transportation pipeline networks based on deep reinforcement learning. *Energy and AI*, 100434. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100434>
16. Arya, A. K. (2021). Optimal operation of a multi-distribution natural gas pipeline grid: An ant colony approach. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11, 3859–3878. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01266-3>
17. Chekurin, V. F. (2007). Do pobudovy prohrannoi systemy dlia modeliuvannia ta optymizatsii protsesiv transportuvannia pryrodnoho hazu [Towards the construction of a software system for modeling and optimization of natural gas transportation processes]. *Fizyko-matematychne modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii*, (5), 158–169. [in Ukrainian]
18. Chekurin, V., Prytula, M., & Khymko, O. (2013). Matematychna model struktury hazotransportnoi systemy [Mathematical model of the gas transportation system structure]. *Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii*, (771), 187–196. [in Ukrainian]
19. Khymko, O., & Chekurin, V. (2017). Modeliuvannia struktury prohrannoho kompleksu dlia upravlinnia hazotransportnyimi systemamy [Modeling the structure of a software complex for managing gas transportation systems]. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterne modeliuvannia*, 28–31. [in Ukrainian]
20. Kralik, J., Stiegler, P., Vostry, Z., & Zavorka, J. (1984). Modelling the dynamics of flow in gas pipelines. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 14(4), 586–596.
21. Kralik, J., Stiegler, P., Vostry, Z., & Zavorka, J. (1984). A universal dynamic simulation model of gas pipeline networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 14(4), 597–606.
22. SIMONE Research Group s.r.o. (n.d.). *About company. Solutions for simulation and optimisation in the gas industry*. <https://www.simone.eu/simone-company-about.asp>
23. Zhao, Y., et al. (2025). Research on detection methods for gas pipeline networks under small-hole leakage conditions. *Sensors*, 25(3), 755. <https://doi.org/10.3390/s25030755>

24. Zhang, T., Bai, H., & Sun, S. (2022). Intelligent natural gas and hydrogen pipeline dispatching using the coupled thermodynamics-informed neural network and compressor boolean neural network. *Processes*, 10(2), 428. <https://doi.org/10.3390/pr10020428>
25. Zhu, C., et al. (2023). *AI-based energy transportation safety: Pipeline radial threat estimation using intelligent sensing system* (Preprint). arXiv:2312.11583. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.11583>
26. Yang, Y., et al. (2023). Intelligent methods for pipeline operation and integrity. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15(1). <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1490>
27. Wang, Y. (2025). Digital twin-based real-time monitoring and intelligent maintenance system for oil and gas pipelines. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2025-0849>
28. Wang, M., et al. (2021). Robots for pipeline inspection tasks – A survey of design philosophy and implementation technologies. *2021 5th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT)*, 427–432. <https://doi.org/10.1109/ACAIT53529.2021.9731152>
29. Rachman, A., Zhang, T., & Ratnayake, R. M. C. (2021). Applications of machine learning in pipeline integrity management: A state-of-the-art review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 193, 104471. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104471>
30. Herrera, R. H., Christensen, P., & Elvers, A. (2019). Machine learning in pipeline inspection: Applications of supervised learning in non-destructive evaluation. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 24(10). <https://www.ndt.net/?id=24701>
31. Khymko, O., Hryniv, O., Prytula, N., & Prytula, M. (2015). Alhorytmichnyi metod diahnost - ky vytokiv hazu na dilianakh mahistralnykh hazoprovodiv [Algorithmic method for diagnosing gas leaks in sections of main gas pipelines]. *Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii*, (826), 404–412. [in Ukrainian]
32. Oshingbesan, A. (2022). *Leak detection in natural gas pipeline using machine learning models* (Preprint). arXiv:2209.10121. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.10121>
33. Kim, J., et al. (2024). Gas pipeline leak detection by integrating dynamic modeling and machine learning under the transient state. *Energies*, 17(21), 5517. <https://doi.org/10.3390/en17215517>
34. Al-Ammari, W. A., et al. (2025). Development of digital/visual twin for real-time leak detection in gas pipelines under multiphase flow conditions. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/ghg.2379>
35. Wang, D., et al. (2023). Research on gas pipeline leakage model identification driven by digital twin. *Systems Science & Control Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/21642583.2023.2180687>
36. Nankya, M., Chataut, R., & Akl, R. (2023). Securing industrial control systems: Components, cyber threats, and machine learning-driven defense strategies. *Sensors*, 23(21), 8840. <https://doi.org/10.3390/s23218840>
37. Koay, A. M. Y., et al. (2023). Machine learning in industrial control system (ICS) security: Current landscape, opportunities and challenges. *Journal of Intelligent Information Systems*, 60, 377–405. <https://doi.org/10.1007/s10844-022-00753-1>
38. Zhang, L., & Wang, J. (2023). Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: Connotations and key technologies. *Natural Gas Industry B*, 10(3), 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2023.05.006>
39. Nemec, R. (2022). Artificial intelligence and pipelines – A smart way to go. *P&GJ Online*, 249(1). <https://pgjonline.com/magazine/2022/january-2022-vol-249-no-1/features/artificial-intelligence-and-pipelines-a-smart-way-to-go>
40. Magdin, M. (2025). Literature review: Current trends and advances in the use of artificial intelligence for ensuring the safety and efficiency of gas pipeline operations. *Results in Engineering*, 28, 107309. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107309>
41. Lu, H., & Cheng, Y. F. (2025). Artificial intelligence in energy pipelines: Opportunities and risks. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.08.032>
42. Kovalko, M. P., et al. (2002). *Truboproviznyi transport hazu* [Pipeline transportation of gas]. ArenaEKO. [in Ukrainian]
43. Norwegian University of Science and Technology. (n.d.). *The role of natural gas in Europe towards 2050*. Energy Transition Initiative. <https://www.ntnu.edu/energytransition/the-role-of-natural-gas-in-europe-towards-2050>

INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGIES FOR NATURAL GAS TRANSPORTATION: CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS

Kozak O. F.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-5663-4295>
e-mail: oleksii.kozak@nung.edu.ua

Abstract. The article examines the relevance, current state, and prospects of applying intelligent information technologies (IIT) in natural gas transportation. In view of the global increase in energy demand, the need for decarbonization of the fuel and energy sector, and growing requirements for efficiency and safety, IITs play a significant role in ensuring the reliable operation of gas transmission systems (GTS). The analysis covers the condition of Ukraine's GTS, its technical capacities, and its role in strengthening European energy security, particularly under the transformation of the natural gas market and the cessation of Russian gas transit. The experience of recent studies is summarized, where IITs are applied for gas flow modeling, transportation optimization, gas demand forecasting, leak detection, accident prevention, and infrastructure cybersecurity. Special attention is paid to digital twins, SCADA supervisory control and data acquisition systems, machine learning methods, and artificial intelligence algorithms, which are integrated to achieve a synergistic effect in managing complex engineering systems. The prospects for introducing neural networks and deep learning methods to improve operational safety are outlined, as well as the potential of IITs for integrating GTS with hydrogen transportation systems within the EU decarbonization policy. It is emphasized that combining intelligent algorithms with economic and mathematical models enables the simultaneous solution of tasks related to technical reliability, environmental sustainability, and economic efficiency. The purpose of the study is to develop scientific approaches to the application of IIT in natural gas transportation, considering current challenges, in particular the strengthening of energy security and the integration of Ukraine's GTS into the European energy space.

Key words: gas transmission system; gas flow modeling; pipeline network optimization; gas demand forecasting; numerical simulation; digital twins.