

Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

УДК 620.191.33:620.193

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-20(76)-172-186

ГІДРОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ІННОВАЦІЇ СЕРВІСНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НАФТОПРОВОДУ З ДЕФЕКТАМИ

В. Т. Болонний

*Комунальний заклад Львівської обласної ради «Дрогобицький фаховий
коледж нафти і газу»; 82100, Дрогобич, вул. Грушевського, 57;
тел. 0960495566, e-mail: vtb281972@ukr.net*

У статті здійснено аналіз гідродинамічних параметрів нафтопроводу з дефектами криволінійної форми, що виникають внаслідок аварій, із застосуванням сучасних методів математичного моделювання. Для опису потоку нафти через трубопровід використано рівняння Нав'є-Стокса, рівняння маси та рівняння тиску. Метою дослідження є визначення впливу дефектів на основні гідродинамічні параметри нафтопроводу, зокрема на швидкість потоку, перепад тиску, гідравлічні втрати та енергетичні витрати. Для цього розроблено алгоритм чисельного розв'язку задачі, зокрема для тріциноподібних дефектів криволінійної форми, що впливають на розподіл потоку нафти у трубопроводі. Моделювання проведено для трубопроводу з матеріалу 12ГСБ, діаметром 530 мм і товщиною стінки 7 мм, довжиною 40 км. Оцінено вплив різних типів дефектів (від 0% до 10% площі поперечного перерізу) на гідродинамічні характеристики системи. Результати показують, що дефекти труби значно знижують ефективність роботи трубопроводу, збільшуючи гідравлічні втрати та змінюючи швидкість потоку, що впливає на енергетичні витрати. У статті також пропонуються нові наукові підходи до математичних моделей дефектів і методи оптимізації енергетичних витрат. Окрім цього, представлено концепцію системи моніторингу нафтопроводу, яка використовує безпілотні літальні апарати (БПЛА) та інноваційні технології. БПЛА оснащуються міонними сенсорами для виявлення аномалій, а також газоаналізаторами та лідарами для точного збору даних. Інформація з сенсорів передається до обчислювальної системи, де алгоритми машинного навчання виявляють потенційні витoki. Взаємодія з користу-

вачем здійснюється через чат-бота, що надає сповіщення про аномалії. Також розглядаються інноваційні методи ремонту нафтопроводів, зокрема технологія CIPP для відновлення труб без демонтажу, лазерно-акустичне очищення та автоматизоване зварювання для підвищення ефективності ремонтних робіт.

Ключові слова: нафтопровід, гідродинаміка, дефект труби, математичне моделювання, енергетична ефективність, гідравлічні втрати, тріщиноподібний дефект.

Вступ

У сучасному світі забезпечення безпеки та надійності нафтопроводів є важливою складовою енергетичної інфраструктури. Нафтопроводи, які транспортують енергетичні ресурси на великі відстані, часто піддаються різноманітним ризикам, таким як корозія, механічні пошкодження чи вплив екстремальних умов експлуатації. Це може призвести до витоків нафти і нафтопродуктів, аварій і порушень роботи всього комплексу трубопроводів.

В даній роботі розглядається науковий підхід до розв'язання задачі гідродинамічного аналізу нафтопроводу з аварійним дефектом, використовуючи сучасні методи моделювання і програмування для багатоваріантних розрахунків. Задача включає в себе використання диференціальних рівнянь для опису процесу транспортування рідини у трубопроводі з дефектами.

З метою підвищення ефективності моніторингу та діагностики нафтопроводів, особливо в умовах важкодоступних ділянок, значну роль відіграють новітні технології, зокрема безпілотні літальні апарати (БПЛА). Використання БПЛА з міонними сенсорами, газоаналізаторами та лідар-сенсорами дозволяє здійснювати автономний моніторинг лінійної частини нафтопроводу, виявляючи потенційні витoki, аномалії у температурі та інші зміни, що свідчать про наявність проблем.

Ця система також включає застосування чат-бота, через який оператори отримують сповіщення про виявлені витoki або пошкодження трубопроводів, що дає змогу оперативно реагувати та здійснювати подальше обстеження за допомогою іншого БПЛА. Для вдосконалення процесу ремонту трубопроводів застосовуються інноваційні методи, зокрема технологія відновлення CIPP (Cured-In-PlacePipe), яка дозволяє здійснювати ремонт без демонтажу чи заміни труб.

Таким чином, поєднання передових технологій моніторингу та ремонту трубопроводів відкриває нові можливості для забезпечення їхньої безпеки та тривалої експлуатації з мінімальними витратами та ризиками для персоналу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

У статті [1] представлено новий обчислювальний метод для гідравлічної характеристики трубопровідних мереж, який враховує різні фа-

ктори, що впливають на роботу трубопроводів. Це включає аналіз потоків, втрат енергії та тиску в умовах наявності дефектів. Метод дозволяє здійснити точніші прогнозування порівнянні з традиційними підходами, особливо при роботі гідравлічних енергетичних систем з дефектами, що може покращити ефективність гідродинамічних аналізів.

Дослідження представлені у науковій роботі [2] зосереджене на числовому аналізі розповсюдження тріщин у сталевих трубопроводах. Автори використовують методи числового моделювання для дослідження механізмів тріщиноутворення та їх впливу на гідродинамічні характеристики трубопроводів. Робота дозволяє краще розуміти, як дефекти в трубах (особливо тріщини) можуть змінювати швидкість потоку, втрати енергії та знижувати ефективність роботи трубопроводів.

Викладені наукові підходи у [3-6] пропонують комплексний підхід до гідродинамічного аналізу, який дозволяє оцінити вплив різних дефектів на зміну швидкості потоку та тиску у різних ділянках трубопроводів, що дозволяє більш точно прогнозувати витрати енергії та енергоефективності і стабільності роботи трубопроводів, суттєво змінювати енергетичні характеристики трубопроводів.

Наукові роботи [7,8] характеризують впливи різних геометрій дефектів на характеристики потоку в трубопроводах. Ці дослідження дозволяє з'ясувати, як форма і розмір дефектів (наприклад, корозійних порожнин або механічних пошкоджень) впливають на зміну швидкості потоку та гідравлічний опір. Важливість цього дослідження полягає у тому, щоб зрозуміти, які саме дефекти найбільше впливають на гідродинаміку трубопроводів. Вони особливо корисні для створення точних моделей, які можна застосувати до реальних умов експлуатації трубопроводів.

Авторами [9-11] розроблені аналітичні методики витоків продукту з лінійної частини на основі дослідження діагностичних процесів внутрішньої порожнини трубопровідних систем. Наукові дослідження описують гідравлічну ефективність трубопровідних систем нафти і газу з врахуванням нестаціонарності потоку та ускладнені їх усередненими параметрами, що понижує точність обчислень.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Забезпечення надійності та безпеки нафтопроводів є важливим завданням у сучасному енергетичному секторі. Однак для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно вдосконалювати методи гідродинамічного аналізу, особливо в умовах наявності дефектів. Поточні методи числового моделювання потребують подальшого розвитку для точнішого врахування складних експлуатаційних умов трубопроводів, таких як зміни температури, тиску та агресивних середовищ. Сучасні підходи до використання диференціальних рівнянь та спеціалізованих програмних інструментів можуть значно підвищити точність прогнозів витоків і аварій, проте вони потребують додаткових досліджень щодо механізмів дефектів, зокрема корозії, та їхнього впливу на гідродинамічні характеристики.

Впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених сучасними сенсорами, забезпечує нові можливості для моніторингу нафтопроводів у важкодоступних ділянках. Водночас важливо вдосконалити алгоритми обробки даних, зібраних БПЛА, для кращої інтеграції з автоматизованими системами реагування на інциденти. Використання чат-ботів для своєчасного інформування операторів також потребує розвитку для покращення точності виявлення дефектів та оперативності реагування.

Інноваційні технології ремонту трубопроводів, такі як метод CIPP, надають значний потенціал для усунення дефектів без необхідності заміни труб, але їхнє застосування потребує додаткових досліджень, щоб врахувати різні типи дефектів та специфіку експлуатаційних умов. Особливу увагу слід приділяти розвитку нових матеріалів та методів, що дозволяють підвищити ефективність ремонту, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку.

Для покращення точності прогнозування ефективності трубопроводів у випадку дефектів важливим є детальне вивчення геометрії пошкоджень. Це дозволить створювати точні моделі, що будуть коректно відображати реальні умови експлуатації та допоможуть прогнозувати зміну гідродинамічних характеристик трубопроводів у процесі їх експлуатації. Таким чином, постійне вдосконалення методів моделювання, діагностики та ремонту є основою для забезпечення надійності та безпеки трубопроводів у довгостроковій перспективі.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Розглянемо довільну ділянку магістрального нафтопроводу зовнішнім діаметром $D_s \times t = 530 \times 7 \text{ мм.}$, довжиною $L = 40 \text{ км.}$ Лінійна частина нафтопроводу виготовлена з труб низьколегованої сталі 12ГСБ ($\sigma_m = 590 \text{ МПа}$; $\sigma_m = 420 \text{ МПа}$) і здійснює перекачування рідкого енергетичного ресурсу з такими фізичними параметрами: густина $\rho = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ і динамічною в'язкістю $\mu = 0,3 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

У даній роботі розглядається науковий підхід до розв'язання задачі гідродинамічного аналізу нафтопроводу з аварійним дефектом криволінійної форми, використовуючи сучасні методи моделювання і програмування для багатоваріантних розрахунків. Задача включає у себе використання математичної моделі у диференціальній формі для описання процесу руху рідини в трубопроводі з дефектами.

Рівняння Нав'є-Стокса у загальній формі має такий вигляд:

$$\rho \cdot \left(\frac{dv}{dt} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f, \quad (1)$$

де v – швидкість потоку рідини; ρ – густина рідини; p – тиск; μ – динамічна в'язкість рідини; f – зовнішні сили.

Для його вирішення у задачі трубопровідного транспорту робимо такі припущення: приймаємо стаціонарність потоку ($\frac{dv}{dt} = 0$) і передба-

чаємо його лінійність у напрямку осі труби. Також вважаємо, що потік турбулентний, тому до рівняння (1) додаємо коефіцієнт тертя f , а термін $v \cdot \nabla v$ можна представити у вигляді:

$$v \cdot \nabla v = v \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$

де v – швидкість потоку.

Враховуючи наведені припущення і у результаті відповідних математичних перетворень, одержимо таке формулювання рівняння Нав'є-Стокса:

$$\rho \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} = -\frac{dp}{dx} + \mu \cdot \frac{d^2v}{dx^2}, \quad (3)$$

Рівняння тиску для трубопровідного транспорту рідкого енергоносія для заданих умов матиме такий вигляд:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{f \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot d}, \quad (4)$$

де d – внутрішній діаметр нафтопроводу.

Враховуючи, що це рівняння базується на рівнянні Дарсі-Вейсбаха для турбулентного режиму руху і описує зміни тиску по довжині трубопроводу, отримаємо

$$dp = \frac{f \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot d} dx \quad (5)$$

Для визначення перепаду тиску по довжині трубопроводу, обчислюємо інтеграл рівняння (5)

$$\Delta p = \int_0^L \frac{f \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot d} dx, \quad (6)$$

Рівняння маси має такий вигляд:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho \cdot v) = 0, \quad (7)$$

де $\frac{d\rho}{dt}$ – зміна густини рідини по часу (для стаціонарного режиму руху $\frac{d\rho}{dt} = 0$); $\nabla(\rho \cdot v)$ – дивергенція потоку маси, що є відповідною до потоку через ділянки труби.

Отже, математична формула (7) зводиться до наступного співвідношення:

$$\nabla(\rho \cdot v) = 0. \quad (8)$$

Для лінійного потоку у трубопроводі це рівняння можна інтерпретувати як:

$$\frac{d}{dx}(\rho \cdot v \cdot A) = 0, \quad (9)$$

де A – площа поперечного перерізу труби (яка може змінюватися, якщо у трубі є дефекти).

Якщо припустити, що густина рідини стала, то рівняння (9) може бути представлене такою формулою:

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (10)$$

де Q – постійна витрата.

Для тріщиноподібного дефекту з криволінійною поверхнею, яку можна описати дугою з радіусом R . Така форма дефекту обчислюється за формулою:

$$y = R \cdot (1 - \cos\theta), \quad (11)$$

де y – відстань від осі труби; R – радіус дефекту; θ – кут по дузі дефекту.

Враховуючи деформацію трубопроводу через дефект, можна моделювати зміну площі поперечного перерізу труби. Вона залежатиме від параметрів дефекту:

$$A = A_0 - A_{\text{def}}, \quad (12)$$

де A_0 – початкова площа; A_{def} – площа, яку займає дефект.

Енергозбереження в трубопроводах досягається шляхом мінімізації втрат енергії на тертя та оптимізації форми і розміру дефекту. Вплив дефекту можна оцінити за допомогою коефіцієнтів втрат енергії (наприклад, втрати на тертя через нерівності, деформації труб). Від втрат енергії залежить і гідравлічна ефективність лінійної частини, оскільки дефект збільшує втрати на тертя, а відповідно змінює швидкість потоку, що викликає зниження загальної ефективності. Розрахунок ефективності за рахунок енергетичних витрат проводимо за такою математичною формулою:

$$\eta = \frac{Q \cdot (p_1 - p_2)}{\eta_c \cdot Q_{\text{вих}}}, \quad (13)$$

де η – показник ефективності енергозбереження в трубопроводі; p_1 і p_2 – відповідно тиск на вході і виході трубопроводу; η_c – коефіцієнт, який враховує втрати енергії через тертя, дефекти труб і інші чинники, що знижують загальну ефективність перетворення енергії, необхідної для переміщення рідини. Зазвичай η_c менше 1, оскільки завжди будуть певні втрати енергії через тертя та інші механічні фактори; $Q_{\text{вих}}$ – витрата рідини, яка фактично проходить через систему трубопроводів після втрат енергії.

За результатами розрахунків отримані результати представлені у табл. 1, а побудовані графіки (див. рис. 1,2) ілюструють зміну параметрів у залежності від дефектів, що дозволяє зрозуміти, як дефекти труби впливають на основні параметри ефективності трубопроводу.

Загальна похибка результатів розрахунків може коливатися у межах 5-15% залежно від точності вихідних даних (геометрії труби, фізичних параметрів рідини, моделей дефектів) і методів числового аналізу. Для більш точних розрахунків потрібно враховувати додаткові фактори, такі як зміна параметрів потоку по довжині труби, складні форми дефектів, температурні коливання та інші реальні умови експлуатації трубопроводу.

Таблиця 1. Вплив дефектів на гідродинамічні параметри лінійної частини нафтопроводу

Тип дефекту	Площа дефекту, % від поперечного перерізу	Продуктивність, м ³ /год	Тиск до дефекту, МПа	Тиск після дефекту, МПа	Гідравлічний нахил, м/км	Швидкість потоку, м/с	Гідравлічна ефективність, %	Енергетичні витрати, кВт
Без дефекту	0	1000	8,0	7,9	0,015	2,0	100	0
Тріщиноподібний дефект	1	980	7,9	7,8	0,016	2,45	97	15
Тріщиноподібний дефект	3	950	7,8	7,7	0,017	2,35	94	30
Тріщиноподібний дефект	5	920	7,7	7,6	0,019	2,25	91	45
Криволінійний дефект	1	975	7,9	7,85	0,016	2,48	98	20
Криволінійний дефект	3	940	7,8	7,7	0,018	2,4	95	40
Криволінійний дефект	5	910	7,7	7,6	0,020	2,3	92	55
Криволінійний дефект	7	880	7,6	7,5	0,021	2,2	89	70
Криволінійний дефект	10	850	7,5	7,4	0,023	2,1	88	90

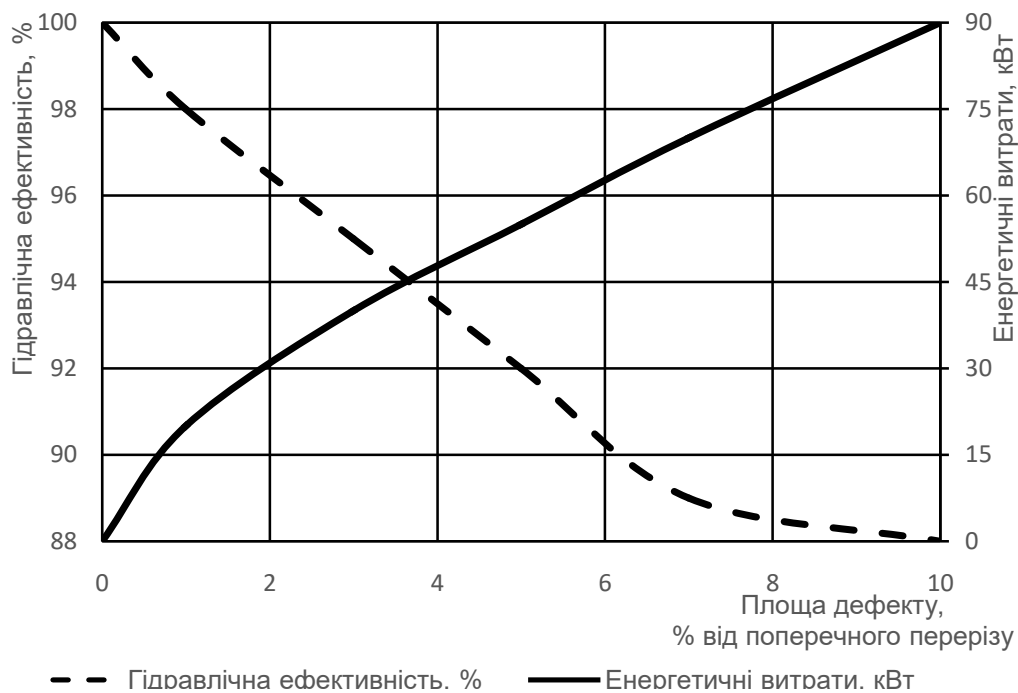


Рис. 1. Залежність гідравлічної ефективності та енергетичних витрат від площі дефекту

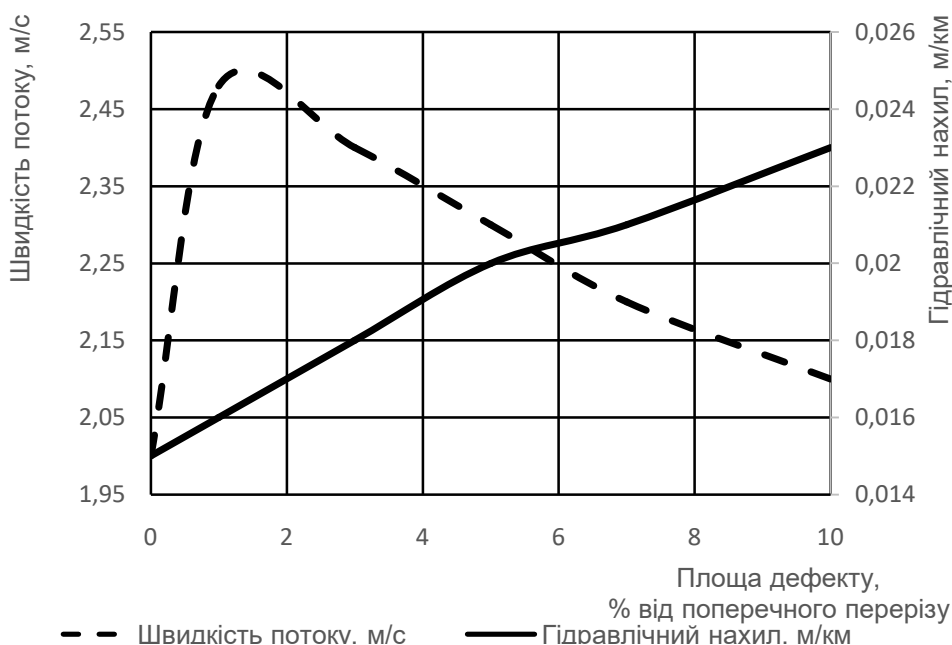


Рис. 2. Залежність швидкості потоку та гідравлічного нахилу від площі дефекту

Для проєктування системи моніторингу лінійної частини нафтопроводу за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з урахуванням використання чат-бота, застосуємо наступну концепцію. Використаємо безпілотні літальні апарати (БПЛА), які оснастимо міонними сенсорами. Міони – це заряджені елементарні частинки, що природньо утворюються внаслідок зіткнення космічних променів з атмосферою. Вони мають високу проникну здатність і можуть проходити через товсті шари матеріалу. Міонні детектори працюють, аналізуючи кількість і траєкторії міонів, що досягають сенсора. Вони працюють стабільно, не реагують на зміну кліматичних умов, відсутня потреба фізично торкатися тіла труби чи ґрунту. Зміни в інтенсивності або траєкторіях можуть сигналізувати про корозійні пошкодження та тріщиноподібні дефекти (рис.3). Також будемо застосовувати газоаналізатори та лідар-сенсори.

Геодезичні дані лінійної частини нафтопроводу закладають у систему управління БПЛА, що забезпечує автономний маршрут. Для аналізу даних використаємо модулі машинного навчання для виявлення витоків на основі сигналів від сенсорів і бази даних [12]. У якості інтерфейса для взаємодії з користувачем використаємо чат-бот. БПЛА літають над трасою нафтопроводу згідно з заданими координатами. Сенсори БПЛА фіксують показники температури, спектральні характеристики поверхні та концентрацію газів. Первинний аналіз сигналів для виявлення потенційних витоків (рис. 4).



Рис. 3. Корозійні пошкодження та тріщиноподібні криволінійні дефекти лінійної частини нафтопроводу

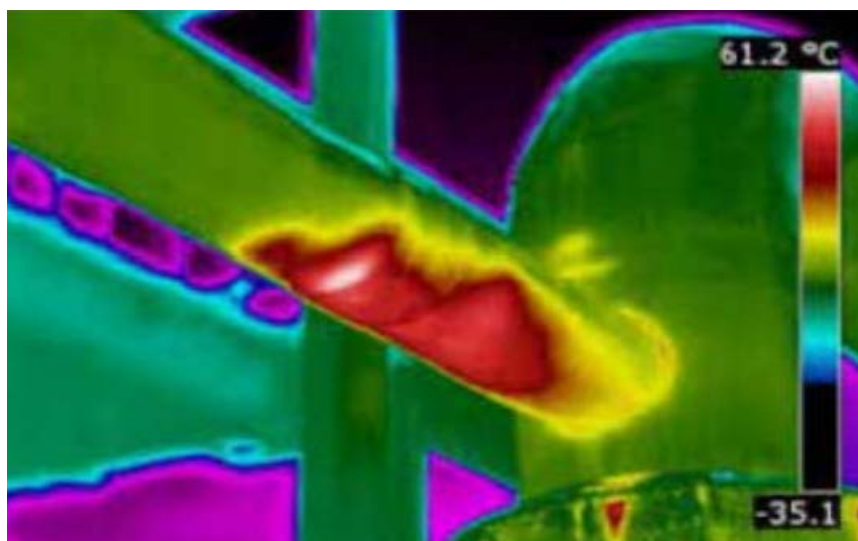


Рис. 4. Тепловий профіль трубопроводу

Інформація з БПЛА надсилається до центральної обчислювальної системи. Алгоритми аналізують дані, визначають аномалії та ідентифікують можливі місця витоків. Сповіщення через чат-бот надсилають повідомлення операторам у разі виявлення витoku (інформація про координати витoku, можливий обсяг втрати, тип аномалії). Для запиту додаткових дій відбувається відправлення іншого БПЛА для додаткового обстеження і тоді приймається рішення про зупинку роботи нафтопроводу. Вимоги до обладнання:

- Дрон:
 - о Вантажопідйомність: до 10 кг (для розміщення сенсорів).
 - о Час польоту: щонайменше 30 хвилин.
 - о Автономна навігація: слідування маршруту трубопроводу.
- Інфрачервоні камери:
 - о Роздільна здатність: не менше 640x512 пікселів.
 - о Температурний діапазон: від -40°C до +100°C.
- Гіперспектральні сенсори:
 - о Діапазон: 400-2500 нм.
 - о Кількість спектральних каналів: ≥ 200 .
- Газоаналізатори:
 - о Чутливість: від 1 ppm для летких органічних сполук.

Нафтопроводи є важливою інфраструктурою, яка транспортує життєво важливі енергетичні ресурси на великі відстані. Однак ці трубопроводи зазнають різних навантажень і втрачають працездатність з часом, що може призвести до витоків, корозії та структурних відмов. Коли виникають проблеми, відновлення трубопроводу стає необхідним для безпеки роботи гідравлічної системи і навколишнього середовища.

Одним із інноваційних рішень для відновлення лінійної частини є технологія *Cured-in-PlacePipe (CIPP)*, яка використовує передову систему відновлення мембранного бар'єра та композитне армування для створення нової труби всередині існуючої.

Нафтопроводи стикаються з численними проблемами, які можуть поставити під загрозу їхню продуктивність і безпеку. Деякі з найбільш поширених проблем включають:

1. Корозія: як внутрішня, так і зовнішня корозія можуть ослабити стінки трубопроводу, що призведе до витоків і аварій.
2. Застаріла інфраструктура: багато трубопроводів експлуатуються вже кілька десятиліть, і їхній вік робить їх більш схильними до спрацювання.
3. Екстремальні умови експлуатації: через трубопроводи часто транспортуються рідини при високих температурах і тисках, що може прискорити їх спрацювання.
4. Фактори навколишнього середовища: стан ґрунту, сейсмічна активність та погодні явища можуть вплинути на цілісність трубопроводу.

Коли ці проблеми призводять до пошкоджень або погіршення стану трубопроводу, необхідно провести відновлювальні роботи, щоб запобігти подальшим проблемам і забезпечити безпечний та ефективний транспорт нафти та газу.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для ремонту пошкоджених трубопроводів є перспективною технологією, здатною значно зменшити витрати, скоротити час виконання робіт та знизити ризики для персоналу. Ремонтні роботи на трубопроводі проводитимуться за допомогою технології *CIPP* (*Cured-In-Place Pipe*), що дозволяє відновлювати його без демонтажу чи повної заміни (рис. 5). Цей інноваційний метод набув широкого застосування у ремонті нафтогазопроводів, каналізаційних та водопровідних систем, а також інших трубопроводів, де важливо мінімізувати час простою та зменшити витрати на будівельні роботи. Процес *CIPP* включає ін'єкцію смол, які застигають під дією тепла або ультрафіолетового випромінювання, утворюючи новий внутрішній шар труби. Це дає змогу відновлювати трубопроводи без їхнього демонтажу.

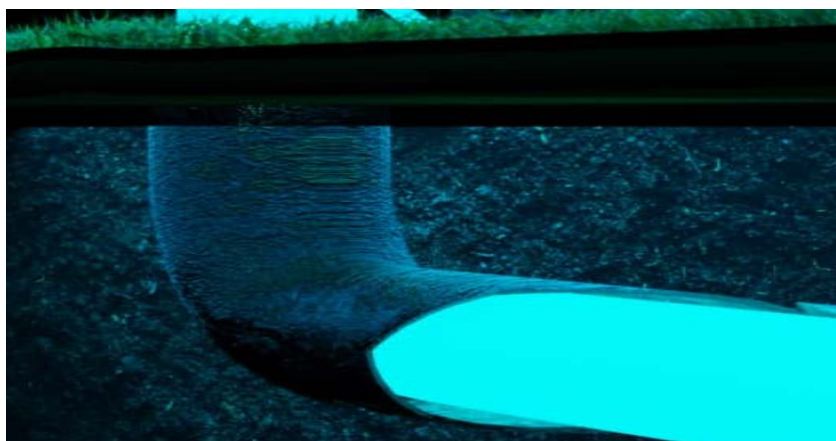
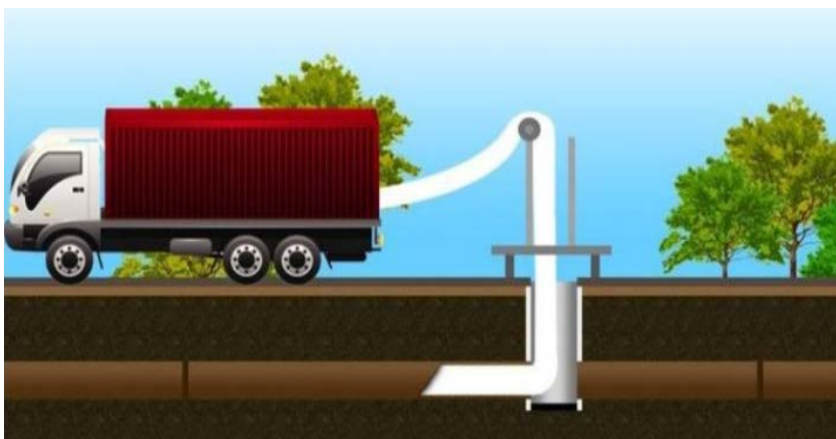


Рис. 5. Технологія CIPP

Підготовчі роботи на нафтопроводі будуть виконуватися за допомогою технології лазерно-акустичного очищення (Laser-Acoustic Cleaning Technology). Цей метод поєднує лазерне випромінювання для розігрівання ізоляційного матеріалу та акустичні хвилі для відділення старої ізоляції від поверхні труби. Перед початком очищення здійснюється перевірка труб на наявність дефектів та пошкоджень. За потреби проводиться попереднє видалення пилу і бруду. Лазерний промінь фокусується на ізоляційному покритті, нагріваючи його та роблячи матеріал більш крихким, що полегшує його відрив від труби. Після цього акустичні хвилі (ультразвукові або механічні) застосовуються для відшаровування ізоляції. Віб्राція, створювана хвилями, дозволяє ефективно усувати навіть найбільш стійкі шари ізоляції.

Усі частки старої ізоляції збираються в спеціальний контейнер за допомогою вакуумної системи або вентиляційної установки, що запобігає забрудненню навколишнього середовища.

Зварювально-відновлювальні роботи здійснюються за інноваційною технологією автоматизованого зварювання з використанням роботизованих систем і лазерної підпірки (Automated Welding with Robotic Systems and Laser-Assisted Support). Цей метод поєднує роботизовані зварювальні установки з лазерною підпіркою для підвищення точності зварювання та зменшення часу на виконання відновлювальних робіт. Спершу труба проходить інспекцію за допомогою роботів, оснащених ультразвуковими датчиками для виявлення тріщин, корозії та інших дефектів. Зварювання пошкоджених ділянок проводиться роботизованою установкою, здатною точно позиціонувати електрод і подавати потрібну кількість матеріалу. Ця система може працювати навіть в умовах обмеженого доступу та на складних ділянках трубопроводів. Лазерне підігрівання зварювальної зони знижує внутрішні напруги та спрощує процес зварювання, покращуючи якість з'єднань і зменшуючи ймовірність дефектів.

Система візуального контролю з камерами та датчиками дозволяє у режимі реального часу оцінювати якість зварного шва, виявляючи можливі дефекти. За допомогою інтегрованих алгоритмів автоматично коригуються параметри зварювання відповідно до отриманих даних.

Висновки

З табл. 1 видно, що з збільшенням дефекту (зменшенням площі перерізу труби), швидкість потоку зростає. При дефекті 5% швидкість потоку підвищується до 2,79 м/с, а при дефекті 10% - до 2,94 м/с. Це пояснюється тим, що зменшення площі труби збільшує швидкість рідини, що рухається через трубопровід, оскільки потік намагається компенсувати втрату простору. Гідравлічні втрати також зростають із збільшенням дефекту. При дефекті 5% втрати складають 2916,3 Па, а при дефекті 10% - 3070,5 Па. Це можна пояснити тим, що швидкість потоку

збільшується в зонах з дефектами, що призводить до підвищення тертя і відповідно до збільшення перепаду тиску (гідравлічних втрат).

При збільшенні дефекту значно підвищується ризик підвищених енергетичних витрат на перекачування нафти через трубопровід. Оскільки швидкість потоку і гідравлічні втрати зростають, ефективність перекачування знижується. Для трубопроводів з дефектами, що мають значний вплив на швидкість потоку та втрати, може виникнути необхідність у додаткових енергетичних витратах для компенсації змін в системі.

З точки зору екологічної безпеки рекомендовано проводити регулярні обстеження трубопроводів для виявлення дефектів і планову заміну труб або застосування ремонтних засобів, які зменшують дефекти та їх вплив на продуктивність. Також важливо враховувати потенційні економічні та енергетичні витрати для гідравлічно-енергетичних систем з дефектами при оцінюванні доцільності їх подальшої експлуатації.

У подальшому більш ефективні результати будуть стосуватись методів оцінки впливу дефектів на ефективність гідравлічних систем. Наступні дослідження будуть спрямовані на оптимізацію матеріалів трубопроводів, що дозволить знизити ймовірність виникнення дефектів і покращити енергетичну ефективність.

Запропоновані інноваційні технології моніторингу і сервісного обслуговування, методи очищення труб від старої ізоляції та зварюально-відновлювальні технології є передовими рішеннями, які поєднують лазерні та акустичні технології з роботизованими зварювальними системами. Вони дозволяють значно підвищити ефективність і якість відновлення трубопроводів, зменшуючи витрати часу та ресурсів. Однак для їх впровадження необхідні значні інвестиції у новітні технології та навчання персоналу.

Література

1. Таварас Т. А. Б. Новий обчислювальний метод для гідравлічного моделювання мереж трубопроводів / Т. А. Б. Таварас // Журнал інженерії трубопроводів. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 185-197.
2. Сміт Р. Х. Аналіз розповсюдження тріщин у сталевих трубопроводах: числове дослідження / Р. Х. Сміт, М. Д. Джонсон // Міжнародний журнал судин під тиском та трубопроводів. – 2022. – Т. 162. – С. 40-52.
3. Лю, Я. Числове моделювання динаміки рідини в трубопроводах з дефектами / Я. Лю, С. Ванг // Журнал обчислювальної гідродинаміки. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 120-134.
4. Варела А. П. Вплив дефектів трубопроводів на гідравлічні характеристики та енергетичну ефективність / А. П. Варела, Х. Г. Лопес // Журнал механіки рідин у машинобудуванні. – 2023. – Т. 60, № 1. – С. 92-105.

5. Тернер Г. Дж. Енергетичні втрати в трубопроводах з локальними дефектами: порівняльне дослідження / Г. Дж. Тернер, Ф. С. Тернер // Журнал енергетики та екологічних наук. – 2024. – Т. 35, № 5. – С. 85-99.
6. Чжан Х. К. Оптимізація цілісності трубопроводів та ефективності потоку за умов дефектів / Х. К. Чжан, Дж. М. Лі // Міжнародний журнал гідравлічного інженерства. – 2024. – Т. 53, № 8. – С. 1234-1247.
7. Міллер, Г. Ф. Дослідження впливу різних геометрій дефектів на характеристики потоку в трубопроводах / Г. Ф. Міллер // Журнал структурної цілісності та надійності. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 210-220.
8. Лі Д. Р. Застосування передових обчислювальних моделей для оцінки роботи трубопроводів з складними дефектами / Д. Р. Лі, С. Г. Харт // Обчислювальна механіка. – 2023. – Т. 58, № 6. – С. 473-486.
9. Салімов М. Т. *Гідродинаміка в трубопроводах: теорія та практичні аспекти* / М. Т. Салімов. – Київ : Наукова думка, 2015. – 312 с.
10. Грудз В.Я. Технічна діагностика трубопроводних систем / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.В. Костів та ін. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 512 с.
11. Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз. – Івано – Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.
12. Козлов В.В., Волянська Л.Г., Отрощенко В.В. Доцільність застосування безпілотного літального апарату на нафтогазопроводах. *Наукові технології*, 2021. – Т. 2, № 50. – С. 177-184.

Стаття надійшла до редакційної колегії 16.04.2025 р.

HYDRODYNAMIC ANALYSIS AND INNOVATIONS IN PIPELINE MAINTENANCE SERVICE WITH DEFECTS

V. T. Bolonny

Municipal Institution of Lviv Regional Council "Drogobych Applied College of Oil and Gas"; 82100, Ukraine, Lviv region, Drohobych, Hrushevskogo St., 57; ph: 0960495566; email: vtb281972@ukr.net

The article presents an analysis of the hydrodynamic parameters of a pipeline with curvilinear shape defects caused by accidents, using modern methods of mathematical modeling. The Navier-Stokes equations, mass equations, and pressure equations were used to describe the oil flow through the pipeline. The objective of the study is to determine the impact of defects on the key hydrodynamic parameters of the pipeline, including flow velocity, pressure drop, hydraulic losses, and energy costs. A numerical solution algorithm has been developed, particularly for crack-like curvilinear defects, which affect the oil flow distribution in the pipeline. The modeling was conducted for a pipeline made of 12GSB material, with a diameter of 530 mm

and a wall thickness of 7 mm, and a length of 40 km. The impact of different defect types (ranging from 0% to 10% of the cross-sectional area) on the hydrodynamic characteristics of the system was evaluated. The results show that defects significantly reduce the efficiency of pipeline operation, increasing hydraulic losses and altering flow velocity, which affects energy consumption. The article also proposes new scientific approaches to mathematical models of defects and methods for optimizing energy costs. Additionally, a concept for a monitoring system for the pipeline using unmanned aerial vehicles (UAVs) and innovative technologies is presented. UAVs are equipped with muon sensors to detect anomalies, as well as gas analyzers and lidars for precise data collection. Information from the sensors is transmitted to a computational system where machine learning algorithms detect potential leaks. Interaction with the user is provided through a chatbot that delivers notifications about anomalies. Innovative pipeline repair methods, including CIPP technology for restoring pipes without disassembly, laser-acoustic cleaning, and automated welding to enhance repair efficiency, are also discussed.

Keywords: *pipeline, hydrodynamics, pipe defect, mathematical modeling, energy efficiency, hydraulic losses, crack-like defect.*