

Техніка і технології

УДК 620.692.4

DOI: 10.31471/1993-9973-2023-3(88)-7-14

ІНТЕГРОВАНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ КОРОЗІЙНИМИ РИЗИКАМИ В ПРОМИСЛОВИХ ТРУБОПРОВОДАХ

А. В. Грицанчук*, В. В. Грицанчук, Г. Ф. Рябко, О. Г. Семисюк, А. І. Станецький

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: andrii.hrytsanchuk@nung.edu.ua

Корозійні процеси в технічних системах мають визначальне значення для їх тривалості та надійності. Стабільність інженерних конструкцій і ефективність технічних систем залежать від успішного управління корозійною активністю. У зв'язку з цим виробники та дослідники активно працюють над розвитком математичних моделей для прогнозування та контролю корозійних процесів. Математичні моделі стали ключовим інструментом для точного передбачення корозійної активності та оцінки ризиків, пов'язаних з нею. Це відкриває можливості для раціонального використання ресурсів та запобігання аваріям, що може значно підвищити довговічність технічних конструкцій. Основна мета наукових досліджень полягає в розробці ефективних моделей, які б враховували основні фактори, що впливають на корозію. Врахування цих факторів у математичних моделях дозволяє створити комплексний підхід до проблеми, що адаптується до різних умов та особливостей технічних систем. Акцент на математичних моделях визначається їхньою можливістю забезпечувати точні прогнози корозійної активності, а також контролювати та попереджувати негативні наслідки для технічних систем. Дослідження фокусується на ідентифікації ключових факторів, розробці високоточних моделей та врахуванні різноманітних умов і особливостей технічних систем. Загальна мета полягає в створенні ефективних інструментів для передбачення корозійної активності та запобігання негативним наслідкам для технічних систем. Це не лише сприяє розвитку новітніх технологій у промисловості та інженерії, але й покращує стандарти безпеки та довговічності технічних конструкцій. Поміж важливих аспектів, пов'язаних з корозійними процесами в технічних системах, варто враховувати і їхні екологічні наслідки. Корозійні ураження можуть викликати викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище, що може призвести до забруднення ґрунту та водних ресурсів. Зокрема, корозія металевих конструкцій може сприяти вивільненню токсичних металів, що має негативний вплив на біоту та екосистему. Застосування математичних моделей для прогнозування та контролю корозійної активності не лише сприяє збереженню ресурсів та підвищенню довговічності технічних систем, але й відіграє ключову роль у зменшенні негативного впливу на довкілля. Мінімізація корозійних процесів допомагає підтримувати екологічну стійкість та забезпечує важливий внесок у збереження природних ресурсів та біорізноманіття.

Ключові слова: корозія, промислові трубопроводи, математичні моделі, прогнозування швидкості корозії, управління ризиками, інтегровані стратегії захисту.

Corrosive processes in technical systems are crucial for their longevity and reliability. The stability of engineering structures and the efficiency of technical systems depend on successful corrosion management. In this regard, manufacturers and researchers are actively working on the development of mathematical models for the prediction and control of corrosion processes. Mathematical models have become a key tool for accurately predicting corrosion activity and assessing associated risks. This opens up opportunities for the rational use of resources and preventing accidents, which can significantly enhance the durability of technical constructions. The primary goal of scientific research is to develop effective models that consider the key factors influencing corrosion. Incorporating these factors into mathematical models enables a comprehensive approach to the problem that adapts

to various conditions and characteristics of technical systems. The emphasis on mathematical models is determined by their ability to provide accurate forecasts of corrosion activity and to control and prevent negative consequences for technical systems. Research focuses on identifying key factors, developing high-precision models, and considering various conditions and features of technical systems. The overall objective is to create effective tools for predicting corrosion activity and preventing negative impacts on technical systems. This not only contributes to the development of advanced technologies in industry and engineering but also improves safety standards and the longevity of technical constructions. Among the important aspects related to corrosion processes in technical systems, it is crucial to consider their ecological consequences. Corrosive damage can lead to the release of harmful substances into the environment, resulting in soil and water pollution. Specifically, the corrosion of metal structures can contribute to the release of toxic metals, negatively impacting biodiversity and ecosystems. The application of mathematical models for predicting and controlling corrosion activity not only contributes to resource conservation and increased durability of technical systems but also plays a crucial role in reducing environmental impact. Minimizing corrosion processes helps maintain ecological stability and makes a significant contribution to preserving natural resources and biodiversity.

Keywords: corrosion, industrial pipelines, mathematical models, corrosion rate prediction, risk management, integrated protection strategies.

Вступ

Промислові трубопроводи в сучасному технологічному ландшафті становлять необхідну складову для транспортування різних речовин, включаючи рідини та гази. Однак, серйозною загрозою для їхньої надійності та тривалості є корозія – неконтрольований хімічний процес, який може спричинити значні пошкодження та вплив на безпеку промислових систем.

Корозія трубопроводів є складною проблемою, оскільки вона виникає внаслідок взаємодії металів з навколишнім середовищем, що призводить до утворення корозійних продуктів. У промислових умовах, де трубопроводи піддаються агресивним хімічним реагентам та змінам температури, корозійні процеси можуть прискорюватися, наслідки чого можуть бути катастрофічними [1].

З метою попередження негативних наслідків корозійних процесів у промислових трубопроводах [2], даний дослідницький проєкт націлено на розробку математичної моделі, спроможної прогнозувати швидкість корозії та надавати інструмент для ефективного управління цими процесами.

Важливість розв'язання проблеми корозії у промислових трубопроводах не може бути недооціненою. Це стосується безпеки персоналу, стабільності технічних систем, а також економічного впливу на виробництво. Інциденти, пов'язані з відмовами трубопроводів через корозійні ушкодження, можуть призвести до значних фінансових збитків і загрожувати екологічній стійкості [3,4].

Науковий висновок цього дослідження полягатиме в розширенні наших знань про корозійні процеси та розробці інноваційного інструментарію для їхнього управління. Отримана математична модель відіграватиме ключову роль у прогресивному впровадженні стратегій запобі-

гання та захисту промислових трубопроводів від корозійного впливу.

У цьому контексті, віримо, що розробка такої математичної моделі не лише покращить робочий процес трубопроводів, але і зменшить ризик аварійних ситуацій, сприяючи стійкості та ефективності промислових систем [5-10].

Основною метою нашого дослідження є створення комплексної математичної моделі, яка враховуватиме різноманітні фактори, впливаючи на корозію в промислових умовах. Аналіз хімічних та фізичних параметрів сприятиме розумінню корозійних процесів, дозволяючи ефективно передбачати їхні наслідки та уникати можливих аварій.

Постановка задачі

Різнорозмірні математичні моделі корозійних процесів надають глибоке розуміння взаємодії металевих поверхонь з навколишнім середовищем. Однією із ключових моделей є модель Еллінггема [11], яка вивчає електрохімічні реакції на поверхні металу, зосереджуючись на концентрації кисню та іонів водню. Вона вирізняється своєю глибокою аналітикою кінетики реакцій, що дозволяє отримувати точні прогнози корозійної активності.

Корозія, як негативний процес, накладає серйозні виклики на промислові сфери та має значний вплив на інфраструктуру та економіку. Зокрема, матеріальні втрати внаслідок корозійних ушкоджень можуть суттєво впливати на механічну міцність металів, особливо високо навантажених структурах, таких як промислові трубопроводи та конструкції.

Крім того, корозія становить загрозу для безпеки та надійності промислових систем, спричиняючи аварійні ситуації та несправності. Це може призвести до серйозних наслідків для персоналу та навколишнього середовища.

Економічний вплив корозії є суттєвим, оскільки великі витрати на ремонт та заміну ушкоджених матеріалів та обладнання можуть стати значним фінансовим обтяженням для промислових підприємств та бюджетів.

Корозійні ушкодження можуть також значно зменшити ефективність технічних систем, зокрема трубопроводів та обладнання, що працюють в агресивних середовищах. Це може вплинути на процес виробництва та обслуговування, порушуючи плановані операції.

Екологічні проблеми виникають внаслідок викидів корозійних продуктів, що можуть призводити до забруднення ґрунту та водойм, особливо при використанні токсичних речовин.

Забезпечення тривалої роботи промислових систем вимагає впровадження превентивних заходів, таких як захисні покриття, системи регулярних оглядів та моніторингу стану обладнання. Розв'язання проблеми корозії вимагає інтегрованого підходу, включаючи розробку математичних моделей для прогнозування корозійних процесів та систематичне впровадження заходів з попередження ушкоджень в інфраструктурі та промисловості [12-15].

Розроблена Дж. О. Еллінггемом [11], ця модель глибоко вивчає електрохімічні реакції, що відбуваються на металевій поверхні. Вона враховує концентрацію кисню та іонів водню, що дозволяє прогнозувати швидкість корозії металу.

Починаючи з "найгіршого" прогнозування швидкості корозії за допомогою рівняння де Ваарда-Мілліамса [16, 17], застосовуються корекційні коефіцієнти для визначення впливу середовищних параметрів та утворення корозійних продуктів в різних умовах. Для кожного фактора пропонуються власні рівняння. Наприклад, в умовах низьких температур, коли є конденсована вода, може утворюватися пасивована плівка, що зменшує швидкість корозії в трубопроводах. За вищих температур може утворюватися більший захисний шар, навіть при великих швидкостях рідини. Шмітт [18, 19] розробив стохастичну модель, яка використовує ймовірність для передбачення локалізованої корозії, яка зазвичай виникає внаслідок впливу потоку рідини або газу на металеву поверхню. Ця модель дозволяє урахувати випадкові зміни у факторах, таких як швидкість потоку, хімічний склад середовища та стан поверхні металу, що впливають на процеси корозії. Використання стохастичної моделі дозволяє краще розуміти і передбачати динаміку локалізованої корозії в умовах різних експлуатаційних умов і середовищ.

Ці моделі, розглядаючи різні аспекти корозійних процесів, відкривають широкий простір для досліджень і розуміння, дозволяють ефективно прогнозувати та управляти корозією в різноманітних умовах експлуатації.

Щодо NORSOK M-506 [20], який було обрано за основу при розробці нашої моделі, цей стандарт специфікує методи визначення швидкості корозії при впливі CO₂ в нафтогазовидобувній промисловості. Запропонована нами адаптивна модель внутрішньотрубної корозії містить вимоги до матеріалів, захисту від корозії та критерії безпеки для обладнання, що піддається корозії в агресивних середовищах. Дана модель вирішує питання інтегрованого управління цілісності трубопроводів та інших технічних систем в умовах високого вмісту CO₂.

Викладення основного матеріалу

В моделі розглядаються трубопроводи з вуглецевої сталі, по яких транспортується природний газ при різних показниках температури, тиску, показниках рН, при створенні даної методики розрахунку були взяті з раніше опублікованої праці [21-24] та зроблено відповідне коригування вхідних даних та алгоритму розрахунку.

Для усереднених експлуатаційних умов пропонується наступне рівняння швидкості корозії:

$$V_{cr} = K_t \cdot f_t^{0,36} \cdot f(pH)_t, \quad (1)$$

де K_t – константа швидкості корозії при різних температурах [20];

$f(pH)_t$ – рН-фактор;

f_t – коефіцієнт фугітивності.

рН – фактор в межах діапазону робочої температури розраховуємо за рівнянням (3) для діапазону значень $3,5 \leq \text{pH} < 4,6$ або за рівнянням (2) для $4,6 \leq \text{pH} \leq 6,5$.

$$f(pH)_t = 2,0676 - (0,2309 \cdot \text{pH}); \quad (2)$$

$$f(pH)_t = 4,342 - 1,051 \cdot \text{pH} + 0,0708 \cdot \text{pH}^2. \quad (3)$$

Ця модель корозії трубопроводів визначається як прогноуюча через свою здатність передбачати залишковий ресурс трубопроводу. Вона акцентує особливі аспекти, такі як фугітивність та показник рН, що важливі для виявлення внутрішньої корозії, яка виникає через гідратуутворення в трубопроводі.

Важливо зазначити, що у цій моделі враховуються термодинамічні властивості можливого складу гідрату. Це надає моделі можливість адаптуватися до різних умов гідратуутворення

та змінювати параметри корозії відповідно. Детальний аналіз фугітивності та рН дозволяє точно визначити, як гідратуутворення впливає на внутрішню корозію трубопроводу. Модель стає потужним інструментом для прогнозування та управління цими процесами, допомагаючи здійснювати ефективний моніторинг та попереджати можливі пошкодження.

Отже, ця модель не лише дозволяє розуміти динаміку внутрішньої корозії в умовах гідратуутворення, але і створює базу для прогнозування залишкового ресурсу трубопроводу, що є ключовим для вчасного та ефективного управління технічними системами. Склад гідрату: 90% гратки гідрату складає вода, 10% – інші компоненти. Іншим компонентом в даній роботі є природний газ із складом, який використовувався в лабораторії (табл. 1).

Таблиця 1 – Склад газу, що використовувався в лабораторії

Компонент	Метан	Етан	Пропан	Бутан	C ₅₊	CO ₂
Вміст, %	85,49	1	2	0,44	0,01	11,06

В сполучі гідрату присутня газова фаза, тому необхідно парціальний тиск газу помножити на його константу леткості. Загальне рівняння леткості гідрату, що складається з багатьох компонентів, можна виразити так:

$$f_T = \sum_{i=1}^n a \cdot P_i; \quad (4)$$

$$P_i = \omega_i \cdot P, \quad (5)$$

де ω_i – мольний вміст компоненту газу в газовому гідраті, %.

Коефіцієнт леткості, як функція температури та тиску визначається за формулами [11]:

при $P < 25$ МПа:

$$a = 10 \cdot \left(0,0031 - \frac{1,4}{T} \right); \quad (6)$$

при $P > 25$ МПа:

$$a = 10 \cdot \left(2,5 \cdot \left(0,0031 - \frac{1,4}{T} \right) \right). \quad (7)$$

Оскільки «а» є постійною для системи, тоді

$$f_T = a \cdot \sum_{i=1}^n P_i. \quad (8)$$

Вихідні дані для оцінки характеристик моделі наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри, використані для тестового моделювання

Параметр	Значення
Робоча температура, °C	0; 1;2;3;... 17; 18;19
Робочий тиск, МПа	1;1,5;2;... 9; 9,5; 10
Діапазон рН	3.5 - 6.5

Результати та обговорення

Отримані результати загалом збігаються з очікуваними. При підвищенні робочого тиску, швидкість корозії збільшується (рис. 1). Мінімальна швидкість корозії для трубопроводу складає приблизно 1,69 мм/рік (0,0046 мм/день), що характеризує загальне ураження стінки матеріалу трубопроводу. Таке значення швидкості корозії дещо перевищує допустимі нормативні втрати товщини стінки трубопроводу. Це відбувається тому, що грудки гідрату збільшуватимуться у розмірі, а це призводить до розвитку точкової та щілинної корозії.

Отримане значення співвідношення тиску та швидкості корозії є надзвичайно достовірним, особливо враховуючи термодинамічні властивості гідратуутворення. Підвищення робочого тиску в трубопроводі призводить до збільшення швидкості корозії, і це явище корелює з інтенсивністю гідратуутворення. Розглянемо цей процес детальніше.

Гідрати утворюються за певних термодинамічних умов, зокрема, за високого тиску та низької температури. Отже, термодинамічні аспекти гідратуутворення визначаються тиском, під впливом якого газ переходить у твердий стан у водному середовищі.

Збільшення робочого тиску в трубопроводі призводить до збільшення швидкості корозії. Вищий тиск сприяє більш інтенсивній взаємодії металевої поверхні з агресивним середовищем, збільшуючи темп корозійних процесів.

Збільшення швидкості корозії в трубопроводі призводить до зростання турбулентності рідини, що транспортується. Це сприяє гідродинамічному перемішуванню та розподілу газів у воді, сприяючи утворенню гідратів.

Турбулентність у рідині зумовлена збільшеною швидкістю потоку при підвищеному тиску. Це створює сприятливі умови для ефективного перемішування і взаємодії між газами та рідиною, що сприяє гідратуутворенню.

Отже, взаємодія тиску та швидкості корозії зумовлена не лише характеристиками гідратуутворення, але й гідродинамічними аспектами трубопровідного потоку. Ця взаємодія між факторами визначає складний процес гідратутво-

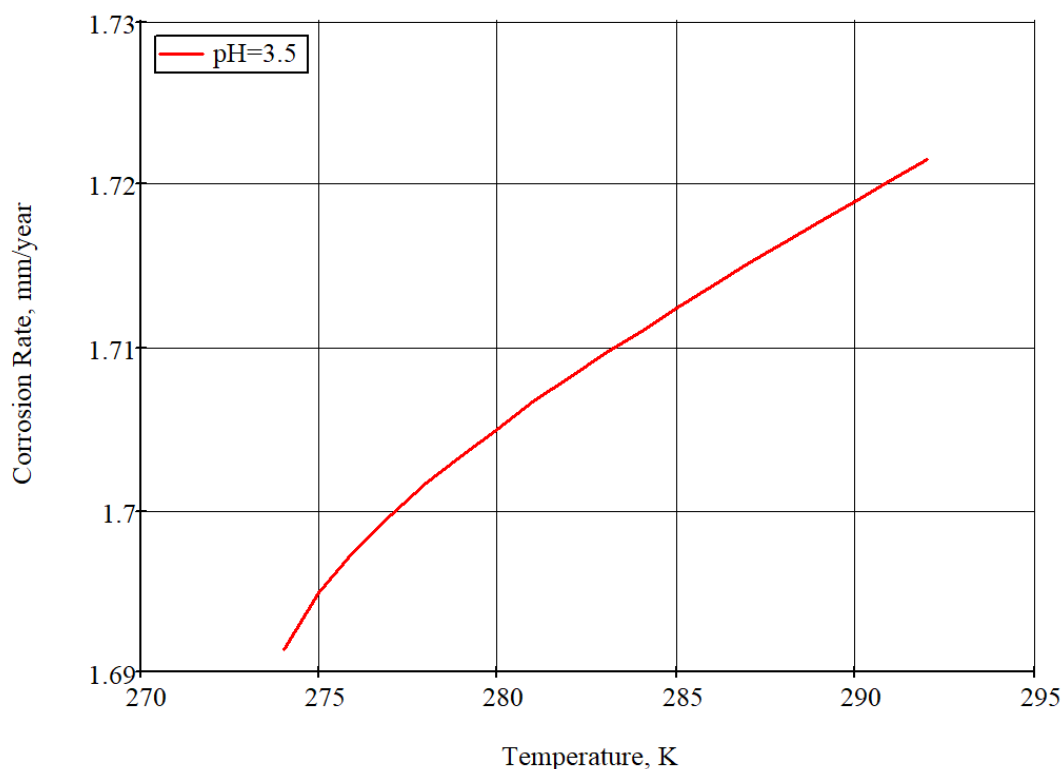


Рисунок 1 – Швидкість корозії залежно від зміни тиску при рН = 3,5 та температурі 3°C

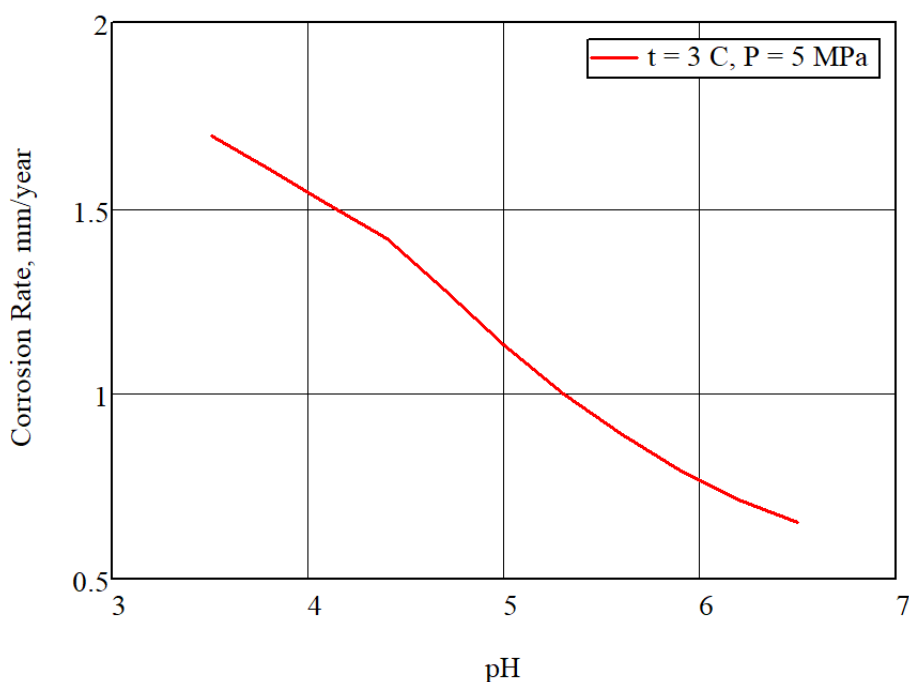


Рисунок 2 – Швидкість корозії залежно від показника рН при тиску 5 МПа та температурі 3°C

рення та його вплив на корозійні процеси у трубопроводі.

На звуженні, що зумовлено утвореним газовим гідратом, відбувається перепад температури під дією ефекту Джоуля-Томпсона (розширення газу при його охолодженні), як наслідок, відбувається нарощення існуючих зразків гідратів. Наявність зварних точок (патрубок,

трійників тощо), бруду, лусок, щілин та піщинок також сприяють утворенню зародків, а незв'язана вода виступає в ролі посилюючого агенту, оскільки область контакту газу та води є гарною точкою утворення зародків гідратів. З часом, утворені гідрати збільшуються кількісно та у розмірі через їх скупчення всередині трубопроводу.

На основі рисунку 2 можна визначити, що існує інверсна залежність між швидкістю корозії та значенням показника рН. Це означає, що зі зменшенням рівня рН (більш кисле середовище) швидкість корозії трубопроводу зростає. Отже, зменшення показника рН веде до збільшення концентрації іонів водню та активізації корозійних процесів, що відображається на рисунку 2. Ця інформація важлива для розуміння та управління внутрішньою корозією трубопроводу в залежності від характеристик середовища, в якому він експлуатується.

Висновки

Запропонована модель уможливує прогнозування корозійних процесів а газопроводах з урахуванням гідратуутворення. Проведено оцінку впливу тиску, температури на швидкість корозійних процесів і показано, що при найнесприятливіших умовах швидкість корозії під дією газогідратів може досягати 1,69 мм/рік (0,0046 мм/день). При такому показникові трубопровід зазнає значних пошкоджень при відсутності негайних ремонтних заходів. Різке підвищення швидкості корозії негативно впливає на роботу трубопроводу, знижуючи його експлуатаційний ресурс. Збільшення робочого тиску підвищує температуру гідратуутворення, але водночас призводить до збільшення швидкості ерозійної корозії. Також показано вплив рН середовища, в якому утворюється газовий гідрат. За результатами прогнозноуючої моделі швидкість корозії зростає у міру підкислення середовища.

Літератури

1. Ameh E. S., Ikpeseni S. C., Lawal L. S. A review of field corrosion control and monitoring techniques of the upstream oil and gas pipelines. *Nigerian Journal of Technological Development*. 2017. Vol. 14(2). P. 67-73.
2. Montemor M. F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 258. P. 17-37.
3. Emami M. S. Mathematical modelling of corrosion phenomenon in pipelines. *The journal of Mathematics and Computer Science*. 2011. Vol. 3(2). P. 202-211.
4. Singh R. Pipeline Integrity: Management and Risk Evaluation. Gulf Professional Publishing. 2017.
5. Ji M., Yang M., Soghrati S. A deep learning model top redict the failure response of

steel pipes under pitting corrosion. *Computational Mechanics*. 2023. Vol. 71(2). P. 295-310.

6. Wasim M., Shoaib S., Mubarak N. M. Inamuddin, Asiri A. M. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils. *Environmental Chemistry Letters*. 2018. Vol. 16. P. 861-879.

7. Verma C., Ebenso E. E., Quraishi M. A., Hussain C. M. Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: design, performance and industrial scale applications. *Materials Advances*. 2021. Vol. 2(12). P. 3806-3850.

8. Raj B., Jayakumar T., Rao B. P. C. Non-destructive testing and evaluation for structural integrity. *Sadhana*. 1995. Vol. 20. P. 5-38.

9. Khan F., Yarveysy R., Abbassi R. Risk-based pipeline integrity management: A road map for the resilient pipelines. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. Vol. 1(1). P. 74-87.

10. Gurrappa I., Yashwanth I.V.S. Mounika I. Cathodic Protection Technology for Protection of Naval Structures Against Corrosion. Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. A Phys. Sci. 85, 1–18 2015. <https://doi.org/10.1007/s40010-014-0182-0>.

11. Nestic S., Postlethwaite J., Olsen S. An electrochemical model for prediction of corrosion of mild steel in aqueous carbondioxide solutions. *Corrosion*. 1996. Vol. 52(4). P. 280-294.

12. Fontana M. G., Greene N. D. Corrosion Engineering. 1967.

13. Jones D. A. Principles and Prevention of Corrosion. Prentice Hall, 1996.

14. Revie R. W., Uhlig H. H. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, 2008.

15. Koch G. H., Brongers M. P. H., Thompson N. G. Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-01-156, 2002.

16. Pots B. F., Kapusta S. D., John R. C., Thomas M. S., Rippon I. J., Whitham T. S., Girgis M. Improvements onde Waard-Milliams corrosion prediction and applications to corrosion management. In NACE CORROSION (pp. NACE-02235). NACE. 2002, April.

17. DeWaard C., Lotz U., Milliams D. E. Predictive model for CO₂ corrosion engineering in wet natural gas pipelines. *Corrosion*. 1991. Vol. 47(12). P. 976-985.

18. Schmitt G., Plagemann P., Moeller K., Bosch C. Local Wall Shear Stress Gradients in the Slug Flow Regime-Effects of Hydrocarbon and Corrosion Inhibitor. In Nace corrosion (pp. NACE-02244). NACE. 2002, April.

19. Schmitt G., Bosch C., Mueller M., Siegmund G. A probabilistic model for flow induced localized corrosion. In NACE CORROSION (pp. NACE-00049). NACE. 2000, March.

20. https://wiki.olisystems.com/wiki/images/e/eb/Norsok_standard_M-506.pdf

21. Poberezhny L., Hrytsanchuk A., Hrytsuliak G., Poberezhna L., Kosmii M. Influence of hydrate formation and wall shear stress on the corrosion rate of industrial pipeline materials. *KOM – Corrosion and Material Protection Journal*. 2018. Vol. 62(4). P. 121-128.

22. Mohyaldin M. E., Elkhatib N. O. A. M. A. N., Ismail M. C. Coupling norsok CO₂ corrosion prediction model with pipelines thermal/hydraulic models to simulate CO₂ corrosion along pipelines. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2011. Vol. 6(6). P. 709-719.

23. Побережний Л. Я., Грицанчук А. В., Петрущак С. М. Спрощена математична модель впливу газогідратів на внутрішньотрубну корозію. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т. 27(6). С. 150-153.

24. Мазур М., Побережний Л., Побережна Л. Математичне моделювання внутрішньої трубної корозії трубопроводів під дією газогідратів. *Вісник ТНТУ*. 2014. Том 76. № 4. С. 88-102. — (Механіка та матеріалознавство).

References

1. Ameh E. S., Ikpeseni S. C., Lawal L. S. A review of field corrosion control and monitoring techniques of the upstream oil and gas pipelines. *Nigerian Journal of Technological Development*. 2017. Vol. 14(2). P. 67-73.

2. Montemor M. F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 258. P. 17-37.

3. Emami M. S. Mathematical modelling of corrosion phenomenon in pipelines. *The journal of Mathematics and Computer Science*. 2011. Vol. 3(2). P. 202-211.

4. Singh R. Pipeline Integrity: Management and Risk Evaluation. Gulf Professional Publishing. 2017.

5. Ji M., Yang M., Soghrati S. A deep learning model top redict the failure response of steel pipes under pitting corrosion. *Computational Mechanics*. 2023. Vol. 71(2). P. 295-310.

6. Wasim M., Shoaib S., Mubarak N. M. Inamuddin, Asiri A. M. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils. *Environmental Chemistry Letters*. 2018. Vol. 16. P. 861-879.

7. Verma C., Ebenso E. E., Quraishi M. A., Hussain C. M. Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: design, performance and industrial scale applications. *Materials Advances*. 2021. Vol. 2(12). P. 3806-3850.

8. Raj B., Jayakumar T., Rao B. P. C. Non-destructive testing and evaluation for structural integrity. *Sadhana*. 1995. Vol. 20. P. 5-38.

9. Khan F., Yarveisy R., Abbassi R. Risk-based pipeline integrity management: A road map for the resilient pipelines. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. Vol. 1(1). P. 74-87.

10. Gurrappa I., Yashwanth I.V.S. Mounika I. Cathodic Protection Technology for Protection of Naval Structures Against Corrosion. Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. A Phys. Sci. 85, 1–18 2015. <https://doi.org/10.1007/s40010-014-0182-0>.

11. Nescic S., Postlethwaite J., Olsen S. An electrochemical model for prediction of corrosion of mild steel in aqueous carbondioxide solutions. *Corrosion*. 1996. Vol. 52(4). P. 280-294.

12. Fontana M. G., Greene N. D. Corrosion Engineering. 1967.

13. Jones D. A. Principles and Prevention of Corrosion. Prentice Hall, 1996.

14. Revie R. W., Uhlig H. H. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, 2008.

15. Koch G. H., Brongers M. P. H., Thompson N. G. Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-01-156, 2002.

16. Pots B. F., Kapusta S. D., John R. C., Thomas M. S., Rippon I. J., Whitham T. S., Girgis M. Improvements onde Waard-Milliams corrosion prediction and applications to corrosion management. In NACE CORROSION (pp. NACE-02235). NACE. 2002, April.

17. DeWaard C., Lotz U., Milliams D. E. Predictive model for CO₂ corrosion engineering in wet natural gas pipelines. *Corrosion*. 1991. Vol. 47(12). P. 976-985.

18. Schmitt G., Plagemann P., Moeller K., Bosch C. Local Wall Shear Stress Gradients in the Slug Flow Regime-Effects of Hydrocarbon and Corrosion Inhibitor. In Nace corrosion (pp. NACE-02244). NACE. 2002, April.

19. Schmitt G., Bosch C., Mueller M., Siegmund G. A probabilistic model for flow induced localized corrosion. In NACE CORROSION (pp. NACE-00049). NACE. 2000, March.

20. https://wiki.olisystems.com/wiki/images/e/eb/Norsok_standard_M-506.pdf

21. Poberezhny L., Hrytsanchuk A., Hrytsuliak G., Poberezhna L., Kosmii M. Influence of hydrate formation and wall shear stress on the corrosion rate of industrial pipeline materials. *KOM – Corrosion and Material Protection Journal*. 2018. Vol. 62(4). P. 121-128.

22. Mohyaldin M. E., Elkhatib N. O. A. M. A. N., Ismail M. C. Coupling norsok CO₂ corrosion prediction model with pipelines thermal/hydraulic models to simulate CO₂ corrosion along pipelines. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2011. Vol. 6(6). P. 709-719.

23. Poberezhnyy L. Ya., Hrytsanchuk A. V., Petrushchak S. M. Sproshchena matematychna model' vplyvu hazohidrativ na vnutrishn'otrubnu koroziyu. *Naukovyy visnyk NLTU*. 2017. Vol. 27(6). P. 150-153. [in Ukrainian]

24. Mazur M., Poberezhnyi L., Poberezhna L. Matematychno modeliuвання vnutrishnotrubnoi korozii truboprovodiv pid diieiu hazohidrativ. *Visnyk TNTU*. 2014. Vol. 76. No 4. P. 88-102. — (Mekhanika ta materialoznavstvo). [in Ukrainian]