

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інженерно-хімічний факультет
Кафедра екології та технології рослинних полімерів

«На правах рукопису»
УДК

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ М. Д. Гомеля

«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія
на тему: «Оцінка ефективності застосування антискалантів у
водоциркуляційних системах»

Виконав:

студент II курсу, групи ЛЦ-31мн Тараненко Арсеній Сергійович _____

Керівник:

доц., доц., д.т.н. Трус Інна Миколаївна _____

Консультант:

Розробка стартап-проекту

доц., доц., к.е.н. Юдіна Наталія Володимирівна _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ 2025

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: стор. 176, рис. 33, табл. 33, першоджерел 113, додаток 1.

Актуальність теми: Вода є ключовим ресурсом, широко застосовуваним у промисловості та в повсякденному житті людини. Проте забезпечення її належної якості та стабільних параметрів потребує особливої уваги, оскільки природна вода часто містить різноманітні домішки. Ці домішки можуть негативно впливати на функціонування технологічного обладнання, спричиняючи утворення накипу, розвиток корозійних процесів і біобростання. Ці небажані процеси не лише погіршують експлуатаційні характеристики обладнання, а й знижують ефективність роботи всієї водооборотної системи. Внаслідок цього зростає енергоспоживання, підвищується ризик аварійних ситуацій, скорочується строк служби устаткування, що зрештою призводить до фінансових втрат та негативного впливу на довкілля. Одним із найдієвіших способів запобігання цим проблемам є використання спеціалізованих реагентів для стабілізаційної обробки води. Завдяки їхньому застосуванню стає можливим забезпечення довготривалої, надійної та безпечної експлуатації водних систем у різних галузях промисловості.

Мета і задачі дослідження: Метою роботи є визначення та порівняння ефективності класичних та екологічно-безпечних реагентів, що застосовуються для стабілізаційної обробки води, а також розробка інноваційних технологічних рішень, спрямованих на забезпечення раціонального та сталого використання водних ресурсів та створення замкнутих систем використання води в промисловості.

Перелік наукових та практичних задач, сформульованих відповідно до зазначеної мети:

- Провести аналіз сучасного стану науково-технічних розробок у сфері стабілізаційної обробки води, зокрема щодо застосування класичних та зелених реагентів у системах технічного водопостачання. Охарактеризувати типи реагентів

(антискалантів, інгібіторів корозії, біоцидів) за механізмом дії, складом, ефективністю та екологічною безпекою.

- Дослідити вплив типу реагенту, дози та умов обробки на ефективність стабілізаційної дії, зокрема антискалантної та інгібуючої здатності.

- Оцінити біоцидну дію реагентів та їх вплив на біообростання, з урахуванням довготривалої експозиції у замкнених системах.

- Розробити методичні підходи до порівняльного оцінювання ефективності реагентів у різних водних середовищах, що моделюють умови реальних водооборотних систем. Оптимізувати умови стабілізаційної обробки води для створення ефективних і безпечних технологічних схем із повторним використанням води в промисловості.

- Запропонувати модель впровадження результатів дослідження у формі технологічного стартап-проєкту з розробки зеленого інгібітора накипоутворення на основі екстракту з соломи пшениці.

Об’єкт дослідження: Процеси накипоутворення, корозії та біообростання в умовах різної жорсткості води.

Предмет дослідження: Ефективність дії антискалантів щодо стабілізації води, запобігання корозії та зменшення біообростання на поверхнях водооборотних систем.

Методи дослідження: Для проведення експериментальних досліджень застосовували водні середовища з різною мінералізацією. Для контролю фізико-хімічних процесів і визначення концентрацій речовин у водному середовищі використовували титриметричний, потенціометричний і спектрофотометричний методи аналізу. Швидкість корозійного процесу визначали методом поляризаційного опору та масометричним методом. Для визначення впливу реагентів на біообростання застосовували мікробіологічні методи. Якість виконаних лабораторних досліджень та достовірність експериментальних результатів перевіряли з використанням математичних методів обробки даних.

Наукова новизна одержаних результатів: У результаті проведення комплексу досліджень, спрямованих на отримання високоякісної води для замкнених систем водокористування, уперше було:

- комплексно досліджено вплив ОЕДФК, НТМФК та екстракту соломи пшениці на стабілізаційні, корозійні та біоцидні властивості води різної жорсткості для водооборотних систем охолодження та теплопостачання;

- визначено взаємний вплив характеристик водних середовищ та концентрацій фосфонатних інгібіторів на стабільність води по відношенню до накипоутворення;

- встановлено оптимальні концентрації та умови застосування ОЕДФК і НТМФК, які забезпечують максимальний інгібуючий ефект щодо накипу, корозії та біообростання в середньо- та низькомінералізованих водах;

- досліджено умови стабілізаційної обробки термічно нестабільних вод з карбонатним індексом більше 70 (мг-екв/дм³)² в залежності від характеристик води та параметрів процесу її використання.

Практичне значення одержаних результатів: вивчено стабілізатори накипоутворення, які дозволяють створити ресурсозберігаючі системи використання води в промисловості. Визначено оптимальні концентрації та умови застосування ОЕДФК і НТМФК, які забезпечують максимальний інгібуючий ефект щодо накипу, корозії та біообростання. Результатом роботи є науково обґрунтована концепція впровадження замкнених екологічно безпечних систем водоспоживання, які базуються на ефективному застосуванні стабілізаційних реагентів. Розроблені технології направлені не лише на захист обладнання від корозії та накипу, а й зниження навантаження на навколишнє середовище за рахунок мінімізації скидів і повторного використання води в технологічних циклах промислових підприємств.

Публікації: за матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 5 наукових праць, в тому числі 2 статті у наукових фахових виданнях категорії Б, 3 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНТИСКАЛАНТ, СТАБІЛІЗАЦІЯ, КОРОЗІЯ, БІООБРОСТАННЯ

ABSTRACT

Master's thesis: 176 pages, 113 ref., 33 figures, 33 tables, 1 application.

Relevance of the topic: Water is a key resource widely used in both industry and everyday human life. However, ensuring its proper quality and stable parameters requires special attention, as natural water often contains various impurities. These impurities can negatively affect the operation of technological equipment, causing scale formation, corrosion processes, and biofouling. Such phenomena reduce the efficiency and reliability of water circulation systems. One of the most effective methods to prevent these issues is the use of specialized reagents for water stabilization treatment.

Purpose and main tasks: The aim of this study is to determine and compare the effectiveness of conventional and environmentally safe reagents used for water stabilization treatment, and to develop innovative technological solutions aimed at rational and sustainable water use, including the creation of closed-loop water systems in industry.

Tasks that were set to achieve the goal:

- Analyzing the current state of scientific and technical developments in the field of water stabilization treatment, particularly the application of traditional and green reagents in technical water supply systems. Classifying and characterizing types of reagents (antiscalants, corrosion inhibitors, biocides) based on their mechanisms of action, composition, efficiency, and environmental safety.

- Investigating the impact of reagent type, dosage, and treatment conditions on the effectiveness of stabilization, particularly in terms of antiscalant and inhibitive properties.

- Evaluating the biocidal activity of reagents and their tendency to biofouling, considering long-term exposure in closed-loop systems.

- Developing methodological approaches to the comparative assessment of reagent effectiveness in various water environments simulating real circulation system conditions.

- Optimizing water treatment conditions to create efficient and safe technological schemes for industrial water reuse.
- Proposing a model for the implementation of research results in the form of a technological startup project for the development of a green antiscalant inhibitor based on wheat straw extract.

The object of research: Processes of scale formation, corrosion, and biofouling under different water hardness conditions.

Subject of the research: The effectiveness of antiscalants in water stabilization, corrosion prevention, and reduction of biofouling on surfaces of recirculating water systems.

Research methods: Experimental studies were conducted using water environments with varying mineralization levels. To control physicochemical processes and determine the concentrations of substances in water, titrimetric, potentiometric, and spectrophotometric methods were used. Corrosion rates were determined using the polarization resistance method and gravimetric method. The quality and reliability of laboratory studies and experimental results were verified using mathematical data processing methods.

Scientific novelty of the obtained results: As a result of a comprehensive study aimed at producing high-quality water for closed-loop water systems, the following were done for the first time:

- A comprehensive study of the effects of HEDP, NTMP, and wheat straw extract on the stabilization, corrosion, and biocidal properties of water with different hardness levels in cooling and heating recirculating systems.
- The mutual influence of water environment characteristics and phosphonate inhibitor concentrations on water stability against scale formation was determined.
- Optimal concentrations and application conditions of HEDP and NTMP that ensure maximum inhibitory effects on scale, corrosion, and biofouling in moderately and low-mineralized waters were identified.

- The conditions for stabilization treatment of thermally unstable waters with a carbonate index over 70 (mg-eq/dm³)² were investigated, depending on water characteristics and process parameters.

Practical significance of the results: Antiscalant stabilizers were studied that enable the creation of resource-saving water use systems in industry. Optimal concentrations and application conditions of HEDP and NTMP were identified, ensuring maximum inhibitory effects on scale, corrosion, and biofouling. The result of the work is a scientifically substantiated concept for implementing closed, environmentally safe water consumption systems based on the effective use of stabilization reagents. The developed technologies aim not only to protect equipment from corrosion and scaling but also to reduce environmental impact by minimizing discharges and reusing water in industrial process cycles.

Publications: Based on the dissertation work, 5 scientific papers have been published, including 2 articles in peer-reviewed scientific journals (category B) and 3 conference abstracts.

KEYWORDS: ANTISCALANT, STABILIZATION, CORROSION, BIOFOULING

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	17
1.1 Аналіз проблеми стабілізаційної обробки води в системах теплопостачання.....	17
1.1.1 Значення стабілізаційної обробки води для ефективної роботи систем теплопостачання.....	18
1.1.2 Утворення сольових відкладень, корозійні процеси та біообростання – ключові виклики стабільної роботи систем теплопостачання.....	18
1.2 Класичні та сучасні підходи до стабілізаційної обробки води при застосуванні антискалантів.....	19
1.2.1 Традиційні методи до застосування антискалантів.....	20
1.2.2 Перспективи впровадження сучасних екологічно безпечних антискалантів.....	23
1.2.3 Характеристики зелених антискалантів.....	24
1.2.4. Переваги та недоліки зелених антискалантів.....	26
1.3 Застосування інгібіторів корозії в системах теплопостачання.....	27
1.3.1 Механізми дії та ефективність класичних інгібіторів корозії.....	28
1.3.2 Концепція «зелених» інгібіторів корозії та їхня екологічна безпечність.....	30
1.4 Біофулінг у системах теплопостачання: причини, наслідки та методи контролю.....	32
1.4.1 Хімічні та фізичні методи боротьби з біофулінгом у системах теплопостачання	35
1.4.2 Оцінка впливу «зелених» інгібіторів на мікробіологічну активність у водооборотних системах.....	41
1.5 Висновки та перспективи подальших досліджень.....	43
1.5.1 Загальні висновки щодо ефективності традиційних і «зелених» реагентів у запобіганні накипоутворенню, корозії та біофулінгу.....	45
РОЗДІЛ 2 ОБ’ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	48
2.1 Об’єкти досліджень.....	48
2.1.1 Водні середовища.....	48

2.1.2 Реагенти та матеріали.....	48
2.2 Методи дослідження.....	49
2.2.1 Методологія прогнозування стабільності води в промислових системах.....	49
2.2.2 Дослідження ефективності стабілізаційної обробки води антискалантами.....	51
2.2.3 Математичне прогнозування стабілізаційної обробки води при застосуванні ОЕДФК та НТМФК.....	52
2.2.4 Отримання інгібітору корозії та накипоутворення.....	55
2.2.5 Методика визначення ефективності інгібуючої дії реагентів.....	55
2.2.6 Визначення впливу ОЕДФК та екстракту на біообростання поверхонь скляних пластин та металевих сіток.....	57
РОЗДІЛ 3 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	59
3.1 Визначення ефективності стабілізаційної обробки води.....	59
3.1.1 Оцінка схильності води до накипоутворення та корозії за допомогою розрахунку індексів стабільності.....	59
3.1.2 Визначення ефективності стабілізаційної обробки води при використанні ОЕДФК та НТМФК.....	63
3.1.3 Дослідження можливості застосування моделі лінійної регресії для визначення ефективності стабілізаційної обробки води при використанні ОЕДФК та НТМФК..	68
3.2 Оцінка ефективності інгібіторів корозії.....	73
3.2.1 Визначення ефективності ОЕДФК та НТМФК як інгібіторів корозії в розчинах NaCl різної концентрації.....	74
3.2.2 Поляризаційні дослідження динаміки формування захисної плівки на сталі 20 при застосуванні ОЕДФК та НТМФК.....	76
3.2.3 Визначення швидкості корозії сталі в аерованій і деаерованій воді.....	81
3.2.4 Визначення впливу інгібітору ОЕДФК на швидкість корозії сталі в деаерованій воді.....	85
3.3 Застосування екстракту соломи як інгібітору корозії та накипоутворення.....	91
3.3.1 Результати досліджень з використанням ІЧ спектроскопії.....	92
3.3.2 Дослідження концентрації екстракту та вихідного розчину на стабілізаційний ефект.....	94

3.3.3 Дослідження протикорозійної ефективності екстракту пшениці соломи у водному середовищі.....	95
3.4 Визначення впливу антискалантів на біообростання.....	98
3.4.1 Видове різноманіття живих організмів у біообростанні при застосуванні ОЕДФК.....	99
3.4.2 Видове різноманіття живих організмів у біообростанні поверхонь при застосуванні екстракту.....	105
3.4.3 Оцінка ступеня мікробного забруднення скляних матеріалів, що витримувались у різних водних середовищах.....	113
3.5 Порівняльна оцінка ефективності реагентів у різних водних середовищах.....	123
4.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	139
4.4. Розроблення маркетингової програми стартаппроєкту.....	143
ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	153
ДОДАТОК 1 ПУБЛІКАЦІЇ.....	165

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. LI, Chang-geng, . Formation mechanisms and supervisory prediction of scaling in water supply pipelines: A review. *Water Research*, 2022, 222: 118922.
2. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers / W. Faes et al. *Corrosion Reviews*. 2019. Vol. 37, no. 2. P. 131–155.
3. García, Sergio; Trueba, Alfredo. Fouling in heat exchangers. *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers*, 2019, 1-26.
4. Kazi, Salim N. Fouling and fouling mitigation of calcium compounds on heat exchangers by novel colloids and surface modifications. *Reviews in Chemical Engineering*, 2020, 36.6: 653-685.
5. Ali, Murad, et al. Corrosion-related failures in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 2021, 39.6: 519-546.
6. Mathew, Ninan Theradapuzha, et al. Environmental and economic impacts of biofouling on marine and coastal heat exchangers. *EcoDesign and Sustainability II: Social Perspectives and Sustainability Assessment*, 2021, 385-398.
7. Mazumder, J., & Mohammad, A. A. (2020). A review of green scale inhibitors: Process, types, mechanism, and properties. *Coatings*, 10(10), 928.
8. Husna, U. Z., Elraies, K. A., Shuhili, J. A. B. M., et al. (2022). A review: The utilization potency of biopolymer as an eco-friendly scale inhibitor. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12, 1075–1094.
9. Pham, T. H. (2007). Solving Scale Problems in Oil-and Gas Industry.
10. Spinthaki, A., et al. (2021). Searching for a universal scale inhibitor: A multi-scale approach towards inhibitor efficiency. *Geothermics*, 89, 101954.
11. Isik, T., et al. (2023). A brief overview on geothermal scaling. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 171(171), 185-203.
12. Yu, W., et al. (2020). Antiscalants in RO membrane scaling control. *Water Research*, 183, 115985.

13. Matin, A., et al. (2019). Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination: Phenomena, impact, and control; future directions. *Desalination*, 455, 135-157.
14. Antony, A., et al. (2011). Scale formation and control in high-pressure membrane water treatment systems: A review. *Journal of Membrane Science*, 383(1-2), 1-16.
15. Tong, T., et al. (2019). Mineral scaling in membrane desalination: Mechanisms, mitigation strategies, and feasibility of scaling-resistant membranes. *Journal of Membrane Science*, 579, 52-69.
16. Li, C.-G., et al. (2022). Formation mechanisms and supervisory prediction of scaling in water supply pipelines: A review. *Water Research*, 222, 118922.
17. Hoang, T. A. (2022). Mechanisms of scale formation and inhibition. In *Water-formed deposits* (pp. 13-47). Elsevier.
18. Zhao, H., et al. (2020). Extreme antiscaling performance of slippery omniphobic covalently attached liquids. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(10), 12054-12067.
19. Awais, M., & Bhuiyan, A. A. (2019). Recent advancements in impedance of fouling resistance and particulate depositions in heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 580-603.
20. Hu, Y., Chen, C., & Liu, S. (2022). State of art bio-materials as scale inhibitors in recirculating cooling water system: A review article. *Water Science and Technology*, 85(5), 1500-1521.
21. Jafar Mazumder, Mohammad A. A review of green scale inhibitors: Process, types, mechanism and properties. *Coatings*, 2020, 10.10: 928.
22. Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2024). Evaluation and optimization of antiscalant substances for enhanced reverse osmosis performance. *Journal of Saudi Chemical Society*, 101923.
23. Liu, Y., & Zhang, P. (2022). Review of phosphorus-based polymers for mineral scale and corrosion control in oilfield. *Polymers*, 14(13), 2673.

24. Huang, Nan, et al. UV/chlorine oxidation of the phosphonate antiscalant 1-Hydroxyethane-1, 1-diphosphonic acid (HEDP) used for reverse osmosis processes: Organic phosphorus removal and scale inhibition properties changes. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237: 180-186.
25. Anyanwu, U. C., & Oluyemi, G. F. (2021). Effect of produced sand particles and fines on scale inhibitor: A review. *Colloids and Interfaces*, 5(3), 35.
26. Sahu, B. C. (2023). Organic corrosion inhibitors. In *Introduction to corrosion-Basics and advances*. IntechOpen.
27. Al-Hamzah, A. A., Fellows, C. M., & Hamed, O. A. (2024). Methallylsulfonate polymeric antiscalants for application in thermal desalination processes. *Polymers*, 16(19), 2838.
28. Neira-Carrillo, Andrónico, et al. Functionalized multiwalled CNTs in classical and nonclassical CaCO₃ crystallization. *Nanomaterials*, 2019, 9.8: 1169.
29. Jain, T., et al. (2019). Impacts of antiscalants on the formation of calcium solids: Implication on scaling potential of desalination concentrate. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(7), 1285-1294.
30. Gu, X., et al. (2025). Optimization of scale inhibitor addition scheme and control of phosphorus content in external cooling system of synchronous condenser. *Water*, 17(3), 415.
31. El-Sawaf, A. K., et al. (2024). Novel polymeric anti-scaling agents derived from herbaceous plant residues: Synthesis, characterization, and efficacy against carbonate scaling via static assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-16.
32. Abd-El-Nabey, B. A., et al. (2020). Plant extracts as corrosion and scale inhibitors: A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(4), 1287-1328.
33. Banerjee, Priyabrata; Hasda, Rohan; Murmu, Manilal. *Environmentally Acceptable Antiscalants and Their Hydrolytic Stability. Industrial Scale Inhibition: Principles, Design, and Applications*, 2024, 102-131.

34. Abd-El-Nabey, B. A., et al. Plant extracts as corrosion and scale inhibitors: A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2020, 9.4: 1287-1328.
35. Cui, Yong-Yin, et al. Plant Extracts as Scale Inhibition. *Industrial Scale Inhibition: Principles, Design, and Applications*, 2024, 225-238.
36. Permatasari, Anak Agung Ayu Putri, et al. Extraction and characterization of sodium alginate from three brown algae collected from Sanur Coastal Waters, Bali as biopolymer agent. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 2022, 23.3.
37. Asaad, Mohammad Ali, et al. Gum Arabic nanoparticles as green corrosion inhibitor for reinforced concrete exposed to carbon dioxide environment. *Materials*, 2021, 14.24: 7867.
38. Zahlan, Hala, et al. Synthesis of poly (citric acid-co-glycerol) and its application as an inhibitor of CaCO_3 deposition. *Materials*, 2019, 12.22: 3800.
39. Demadis, K. D., et al. (2025). Green phosphonate chemistry—Does it exist? *Green Chemistry*, 27(4), 863-914.
40. Martău, Gheorghe Adrian; Mihai, Mihaela; Vodnar, Dan Cristian. The use of chitosan, alginate, and pectin in the biomedical and food sector—biocompatibility, bioadhesiveness, and biodegradability. *Polymers*, 2019, 11.11: 1837.
41. Husna, Ully Zakyatul, et al. A review: the utilization potency of biopolymer as an eco-friendly scale inhibitors. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2022, 12.4: 1075-1094.
42. He, Zhenbo, et al. Anti-Scale performance and mechanism of valonia tannin extract for calcium carbonate in circulating cooling water system. *Sustainability*, 2023, 15.11: 8811.
43. Cui, K.; Li, C.; Yao, B.; Yang, F.; Sun, G. Synthesis and evaluation of an environment-friendly terpolymer CaCO_3 scale inhibitor for oilfield produced water with better salt and temperature resistance. *J. Appl. Polym. Sci.* 2020, 137, 48460.
44. Hamdona, Samia K., et al. Green Inhibitor as Antibacteria and Antiscaling in Reverse Osmosis Desalination Plants. 2019.

45. LI, Linjun, et al. New insight into scale inhibition during tea brewing: $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ complexing and alkalinity consumption. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 124: 901-914.
46. Sustainable antiscalant for municipal reverse osmosis plants / M. C. Royo et al. *Desalination and water treatment*. 2023. Vol. 309. P. 58–65. URL: <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29880> (date of access: 15.03.2025).
47. Jafar Mazumder M. A. A Review of Green Scale Inhibitors: Process, Types, Mechanism and Properties. *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 10. P. 928. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings10100928> (date of access: 15.03.2025).
48. Royo, Mari Carme, et al. Sustainable antiscalant for municipal reverse osmosis plants. *Desalination and Water Treatment*, 2023, 309: 58-65.
49. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods / D. Liu et al. *Desalination*. 2012. Vol. 304. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.03>
50. Malayeri, M. R., & Jalalirad, M. R. (2014). Mitigation of crystallization scale in a single heated tube using projectiles of different sizes and hardness. *Heat Transfer Engineering*, 35, 1418-1426.
51. Singh, A., & Quraishi, M. A. (2015). Acidizing corrosion inhibitors: A review. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(1), 224-235.
52. Obot, I. B., et al. (2019). Corrosion inhibitors for acid cleaning of desalination heat exchangers: Progress, challenges, and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 296, 111760.
53. Verma, C., et al. (2021). Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: Design, performance, and industrial scale applications. *Materials Advances*, 2(12), 3806-3850.
54. Goni, L. K. M. O., & Mazumder, M. A. J. (2019). Green corrosion inhibitors. In *Corrosion inhibitors*. IntechOpen.
55. Chen, L., Lu, D., & Zhang, Y. (2022). Organic compounds as corrosion inhibitors for carbon steel in HCl solution: A comprehensive review. *Materials*, 15(6), 2023.

56. Elshami, A., et al. (2020). Effectiveness of corrosion inhibitors in simulated concrete pore solution. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(13), 2130-2150.
57. Salleh, S. Z., et al. (2021). Plant extracts as green corrosion inhibitors for ferrous metal alloys: A review. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127030. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030>
58. Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review / S. Z. Salleh et al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 304. P. 127030. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030> (date of access: 15.03.2025).
59. Kučuk, Nika, et al. Sustainable biodegradable biopolymer-based nanoparticles for healthcare applications. *International journal of molecular sciences*, 2023, 24.4: 3188.
60. Zheng, Y., et al. (2021). Corrosion inhibition performance of composite based on chitosan derivative. *Journal of Molecular Liquids*, 324, 114679.
61. Pinel, I., et al. (2021). Assessment of the impact of temperature on biofilm composition with a laboratory heat exchanger module. *Microorganisms*, 9(6), 1185.
62. García, S., & Trueba, A. (2019). Fouling in heat exchangers. In *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers* (pp. 1-26).
63. Melo, L. F., & Bott, T. R. (1997). Biofouling in water systems. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14(4), 375-381. [https://doi.org/10.1016/s0894-1777\(96\)00139-2](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(96)00139-2)
64. Faes, W., et al. (2019). Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 37(2), 131-155.
65. Alotaibi, G. F., & Bukhari, M. A. (2021). Factors influencing bacterial biofilm formation and development. *American Journal of Biomedical Science & Research*, 12(6), 617-626.
66. Berce, J., et al. (2021). A review of crystallization fouling in heat exchangers. *Processes*, 9(8), 1356.

67. Buse, H., Spangemacher, L., & Fröhlich, S. (2022). Application of ultrasonic cleaning for shipborne heat exchangers: Construction, numerical simulation, and verification. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 71(143), 41-47.
68. Schmidt-Malan, S. M., Karau, M. J., Cede, J., Greenwood-Quaintance, K. E., Brinkman, C. L., Mandrekar, J. N., & Patel, R. (2015). Antibiofilm activity of low-amperage continuous and intermittent direct electrical current. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 59(8), 4610–4615. <https://doi.org/10.1128/AAC.00483-15>
69. Yang, Q., Park, H., Nguyen, T. N. H., Rhoads, J. F., Lee, A., Bentley, R. T., Judy, J. W., & Lee, H. (2018). Anti-biofouling implantable catheter using thin-film magnetic microactuators. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 273, 1694–1704. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.07.044>
70. Nwaoha C, Zakaria ZY. Cooling towers. In: *Process Plant Equipment: Operation, Control, and Reliability*. John Wiley & Sons. 2012. DOI: 10.1002/9781118162569.ch5.
71. Murphy HM, Payne SJ, Gagnon GA. Sequential UV- and chlorine-based disinfection to mitigate *Escherichia coli* in drinking water biofilms. *Water Research*. 2008;42:2083-2092. DOI: 10.1016/j.watres.2007.12.020.
72. Ashfaq, M. Y., Al-Ghouti, M. A., Qiblawey, H., & Zouari, N. (2019). Evaluating the effect of antiscalants on membrane biofouling using FTIR and multivariate analysis. *Biofouling*, 35(1), 1-14.
73. Hasanin, G., et al. (2023). The microbial growth potential of antiscalants used in seawater desalination. *Water Research*, 233, 119802.
74. Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2024). Evaluation and optimization of antiscalant substances for enhanced reverse osmosis performance. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2024, 101923.
75. Płaza, G., & Achal, V. (2020). Biosurfactants: Eco-friendly and innovative biocides against biocorrosion. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(6), 2152.
76. Aydinsoy, E. A., et al. (2024). A systematic review of corrosion inhibitors in marine environments: Insights from the last 5 years. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 25(3).

77. Berdimurodov, E., et al. (2022). Green β -cyclodextrin-based corrosion inhibitors: Recent developments, innovations and future opportunities. *Carbohydrate Polymers*, 292, 119719.
78. Aydinsoy, E. A., Aghamaliyev, Z. Z., Aghamaliyeva, D. B., & Abbasov, V. B. (2024). A systematic review of corrosion inhibitors in marine environments: Insights from the last 5 years. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 25(3), 793-843.
79. Popoola, L. T. (2019). Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): A critical review. *Corrosion Reviews*, 37(2), 71-102. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0058>.
80. Yadav, S., et al. (2024). Green nanoparticles for advanced corrosion protection: Current perspectives and future prospects. *Applied Surface Science Advances*, 21, 100605. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2024.100605>.
81. Wang, Y. N., Zhang, R. Y., Duan, J. Z., Shi, X., Zhang, Y. M., Guan, F., Sand, W. G., & Hou, B. R. (2022). Extracellular polymeric substances and biocorrosion/biofouling: Recent advances and future perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 5566. <https://doi.org/10.3390/ijms23105566>
82. Jin, H., et al. (2022). Recent advances in emerging integrated antifouling and anticorrosion coatings. *Materials & Design*, 213, 110307.
83. Ullattumpoyil, Nasir; Al-Ghamdi, Talal M.; Al-Hajri, Nasser R. Corrosion and Scaling Threat in Upstream Oil Operation. *World Journal of Engineering and Technology*, 2024, 12.2: 426-437.
84. Orestov E., Mitchenko T. Physical and chemical principles of action of reverse osmosis membrane fouling inhibitors and methods of optimal usage thereof. *Water and water purification technologies scientific and technical news*. 2013. № 12 (2). P. 1-25. <https://doi.org/10.20535/2218-93001222013138220> .
85. Mirzabeygi, M., Naji, M., Yousefi, N., Shams, M., Biglari, H., & Mahvi, A. H. (2016). Evaluation of corrosion and scaling tendency indices in water distribution system: a case study of Torbat Heydariye, Iran. *Desalination and Water Treatment*, 57(54), 25918-25926.
86. Anyanwu U., Oluyemi G. Effect of Produced Sand Particles and Fines on Scale Inhibitor: A Review. *Colloids and Interfaces*. 2021. № 5 (3). P. 1-16.

<https://doi.org/10.3390/colloids5030035>

87. Darton E. Membrane chemical research: centuries apart. *Desalination*. 2000. № 132 (1-3). P. 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00141-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00141-7)
88. Ahmed M., Mohamed, A. Evaluation and optimization of antiscalant substances for enhanced reverse osmosis performance. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2024. № 28 (5). P. 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2024.101923>
89. Hu Y., Chen C., Liu S. State of art bio-materials as scale inhibitors in recirculating cooling water system: a review article. *Water Science and Technology*. 2022. № 85 (5). P. 1500-1521. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.027>
90. Wei, Xin, et al. Effects of aerobic and anoxic conditions on the corrosion behavior of NiCu low alloy steel in the simulated groundwater solutions. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2023, 36.5: 745-757.
91. Suharso, Padli, Tugiyono, M., Buhani, T., 2021. Combination of gambier extract and benzoic acid as inhibitor of calcium sulfate scale formation. *Rasayan J. Chem.* 14, 141–148. <https://doi.org/10.31788/RJC.2021.1415947>.
92. Ana F. Forte Giacobone, Ramon A. Pizarro Biocorrosion at Embalse Nuclear Power Plant. Analysis of the Effect of a Biocide Product. *Procedia Materials Science* 2015
93. Characklis W. G., Cooksey K. E. Biofilms and Microbial Fouling. *Advances in Applied Microbiology*. 1983. P. 93–138.
94. Lappin-Scott H. M., Costerton J. W. Bacterial biofilms and surface fouling. *Biofouling*. 1989. Vol. 1, no. 4. P. 323–342.
95. Rao T. S. Biofouling (macro-fouling) in sea water in take systems. *WaterFormed Deposits*. 2022. P. 565–587. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822896-8.00016-9>
96. Rao T. S. Biofouling in Industrial Water Systems. *Mineral Scales and Deposits*. 2015. P. 123–140. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63228-9.00006-1>
97. Санітарна мікробіологія : метод. вказ. з дисципліни «Мікробіологія, вірусологія та імунологія» / упоряд. Н. І. Коваленко, Т. М. Замазій. – Харків : ХНМУ, 2021. – 48 с.
98. Trus, I., & Gomelya, M. (2023). Applications of antiscalants in circulating

water supply systems. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 58(2), 360-366.

99. Proner, M. C., de Meneses, A. C., Veiga, A. A., Schluter, H., Oliveira, D. D., & Luccio, M. D. (2021). Industrial cooling systems and antibiofouling strategies: a comprehensive review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(8), 3278-3294.

100. Rajala, P., Sohlberg, E., Priha, O., Tsitko, I., Väisänen, H., Tausa, M., & Carpén, L. (2016). Biofouling on coated carbon steel in cooling water cycles using brackish seawater. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(4), 74.

101. Khamis, E., Abd-El-Khalek, D. E., Fawzy, M., Soliman, K. A., Abdel-Gaber, A. M., & Anwar, J. M. (2024). Innovative application of green surfactants as eco-friendly scale inhibitors in industrial water systems. *Scientific Reports*, 14(1), 28073.

102. Chhim, N., Haddad, E., Neveux, T., Bouteleux, C., Teychené, S., & Biscans, B. (2020). Performance of green antiscalants and their mixtures in controlled calcium carbonate precipitation conditions reproducing industrial cooling circuits. *Water Research*, 186, 116334.

103. Mangal, M. N., Yangali-Quintanilla, V. A., Salinas-Rodriguez, S. G., Dusseldorp, J., Blankert, B., Kemperman, A. J., ... & van der Meer, W. G. (2022). Application of a smart dosing pump algorithm in identifying real-time optimum dose of antiscalant in reverse osmosis systems. *Journal of Membrane Science*, 658, 120717.

104. Antony, A., Low, J. H., Gray, S., Childress, A. E., Le-Clech, P., & Leslie, G. (2011). Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review. *Journal of membrane science*, 383(1-2), 1-16.

105. Lee, B. C. Y., Tan, E., Lu, Y., Komori, H., Pietsch, S., Goodlett, R., & James, M. (2023). Antiscalant and its deactivation in zero/minimized liquid discharge (ZLD/MLD) application in the mining sector—opportunities, challenges and prospective. *Minerals Engineering*, 201, 108238.

106. Biedunkova, O., Kuznietsov, P., & Korbutiak, V. (2024). Evaluation of return cooling water reuse in the wet cooled power plant to minimise the impact of water intake and drainage. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 7, 100151.

107. Sickinger, D., & Tomberlin, G. (2023). Blowdown Recovery System for Cooling Tower Water Treatment(No. NREL/TP-2C00-86615). National Renewable

Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States).

108. Маркетинг стартап-проектів [Електронний ресурс] : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL :<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>

109. Yudina N.V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // Marketing and Management of innovations. – 3’2017. – P.245-256.-DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 Access mode : <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>

110. Yudina. N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №23 (2022). PP. 77-82. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/264637>

111. Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N., Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024). Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(13 (129), 57–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997> [Scopus / Web of Science] <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/304997>.

112. Yudina Nataliya. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>

113. Nataliya Yudina, Olena Pidlisna Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic

Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-10 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/238105>

