

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-17>

УДК 606:628.3

ГРОМНАДСЬКА МАРИНАНаціональний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<https://orcid.org/0000-0002-8165-561X>e-mail: hro.maryna@gmail.com**ТРУС ІННА**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<https://orcid.org/0000-0001-6368-6933>e-mail: inna.trus.m@gmail.com**ТАРАНЕНКО АРСЕНІЙ.**Національний технічний університет України «
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<https://orcid.org/0009-0004-9043-3252>e-mail: arsengov1886@gmail.com**ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАГЕНТУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЙНОЇ
ОБРОБКИ ВОДИ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА БІООБРОСТАННЯ**

В роботі наведено результати досліджень стабілізаційної обробки води при застосуванні антискаланту RT-2024-3 у водопровідній воді м. Києва з жорсткістю 4,30 мг-екв/дм³. Встановлено, що ефективність досліджуваного антискаланту збільшується з підвищенням дози від 2,5 до 50,0 мг/дм³. У разі застосування антискаланту стабілізаційний ефект досягав 81-85% при концентрації інгібітору 30-50 мг/дм³, при цьому протинакипний ефект знаходився на рівні 94 - 99% в усьому діапазоні використовуваних концентрацій реагенту. Також у представленій роботі наведено результати експериментального дослідження характеру обростання поверхні скляних матеріалів мікроорганізмами. В основу роботи покладено лабораторний експеримент, який тривав протягом 8 тижнів. Встановлено, що дослідні скляні пластини обростають мікроорганізмами сильніше, ніж контрольні. Загальне мікробне число зростає у 2,8 разів за умови використання RT-2024-3 у порівнянні з контролем.

Ключові слова: стабілізаційна обробка води, стабілізаційний ефект, протинакипний ефект, бактеріологічне забруднення, біообростання

HROMNADSKA MARYNA**TRUS INNA****TARANENKO ARSENI**

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

**DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF THE REAGENT FOR THE STABILIZATION
TREATMENT OF WATER AND ITS EFFECT ON BIOFOULING**

In the context of increasing energy demands and the need for rational use of resources, the efficiency of heat supply systems is critical to ensuring energy security of the regions. Currently, there is insufficient scientific research on the effect of antiscalants on biofouling in real operating conditions of heat supply systems, especially regarding the long-term impact and efficiency of existing biofouling control agents. Thus, the study of biofouling when using antiscalants in heat supply systems is an important step towards increasing efficiency, reducing operating costs and minimizing the environmental impact of these systems. It has been established that when using RT-2024-3, biofouling of glass plates occurs intensively, the total microbial count increases by 2.8 times compared to the control. The relevance is also associated with the need to create new, more effective and environmentally friendly antiscalants. The use of antiscalants is an important element for maintaining the efficiency and duration of water treatment systems. They are used to reduce the formation of limescale and other deposits that can damage equipment and reduce its performance. Deposits such as scale, limescale or rust can cause problems with system operation, reduce heat transfer, foul surfaces and increase energy consumption and maintenance costs. The article presents the results of studies of water stabilization treatment using the RT-2024-3 antiscalant in tap water in Kyiv with a hardness of 4.30 mg-eq/dm³. It was found that the effectiveness of the tested antiscalant increases with increasing dose from 2.5 to 50.0 mg/dm³. In the case of using the antiscalant, the stabilization effect reached 81-85% at an inhibitor concentration of 30-50 mg/dm³, while the antiscaling effect was at the level of 94-99% in the entire range of reagent concentrations used.

Keywords: water stabilization treatment, stabilization effect, antiscaling effect, bacteriological contamination, biofouling

Постановка проблеми

Вода є важливим ресурсом, який використовується в різних галузях промисловості та життєдіяльності людини. Однак забезпечення її якості та стабільності вимагає особливої уваги, оскільки природний склад води може включати різноманітні домішки, які негативно впливають на ефективність роботи обладнання, спричиняючи утворення накипу, корозію, біообростання, що призводить до зниження продуктивності водооборотних систем. Одним із найефективніших методів контролю таких негативних процесів є застосування реагентів для стабілізаційної обробки води.

Біообростання гідротехнічних споруд, поверхонь труб, насосів та іншого технологічного обладнання є однією з найбільш серйозних проблем промислових підприємств. При бактеріальному обростанні значно погіршується робота теплообмінників, знижується пропускна здатність трубопроводів та зростають витрати енергії на перекачування води [1].

Біообростання значно більше знижують ефективність систем зворотного водопостачання, ніж відкладення солей. Пояснення цьому полягає у набагато більшій швидкості утворення біологічних обростань. В найскладніших випадках біообростання можуть призвести до зниження загальних коефіцієнтів теплопередачі теплообмінних апаратів на 60-70% протягом декількох діб та навіть викликати повну закупорку труб. Біологічні обростання слугують основою для розвитку водоростей і молюсків, знижують рівень рН, значно прискорюють корозію металів та бетону [2].

Біообростання гідротехнічних споруд, водопроводів та водозаборів створює перешкоди для їх нормального функціонування, зменшуючи їх ефективність та зумовлюючи реальну загрозу закупорювання систем водоводу [3].

Економічний збиток від зазначених явищ суттєво знижує рентабельність виробництва, та в деяких випадках може зумовлювати необхідність припинення роботи промислових підприємств [3, 4].

Аналіз останніх джерел

Сукупність мікроскопічних організмів (бактерій, мікроводоростей, мікрогрибів) на поверхнях трубопроводів, обладнання та технічних вузлів, які контактують з водним середовищем являють собою мікрообростання. Візуально це проявляється у вигляді слизової плівки яка складається з мікроорганізмів та слизу, який виділяється останніми та має назву «біоплівка».

Попри те, що вміст води в слизовій біоплівці сягає 85%, остання є достатньо міцною структурою, що здатна протистояти механічному впливу потоку води. Товщина біоплівки може становити до декількох сантиметрів, що суттєво обмежує подачу води. Постійне збільшення кількості публікацій на цю тему свідчить про неспадаючий інтерес до проблеми мікрообростання поверхонь, контактуючих з водним середовищем [2].

Руйнування металу, яке відбувається в результаті діяльності живих організмів має назву мікробіологічна корозія. На сьогодні відомо, що з діяльністю мікроорганізмів пов'язано більше ніж 50% зареєстрованих в світі пошкоджень. Встановлено, що внаслідок агресивної дії мікроорганізмів деструкція металу відбувається в 2-3 рази швидше у порівнянні зі звичайною електрохімічною корозією за тих самих умов, але без впливу мікроорганізмів [5].

Біообростання в промислових водних системах має значні економічні наслідки. В деяких європейських країнах заміна та оновлення металевих конструкцій, розрахованих на понад 50 років експлуатації, відбувається вже через 10-20 років, що зумовлено пошкодженнями, викликаними біокорозією [6]. Використовувані сьогодні традиційні способи очищення води не завжди враховують фактори, що сприяють біологічному обростанню та призводять до біокорозії [7].

Стабілізаційна обробка води дозволяє зменшити ризик утворення відкладень і корозії, що, у свій час, забезпечує ефективність водоочисних систем і збільшує термін експлуатації обладнання. Крім того, правильний підбір і застосування стабілізаційних реагентів забезпечує економічність процесів водопідготовки та знижує витрати на ремонт і технічне обслуговування системи [8]. Використання реагентів для біофулінгу та стабілізації води є виправданим у випадках, коли необхідно забезпечити тривалість та ефективність роботи водних систем, знизити експлуатаційні витрати, зменшити ризики погіршення чи виходу з ладу обладнання та покращити якість води. Це особливо актуально для промислових об'єктів, великих водоочисних станцій, де контроль мікробіологічної активності та хімічного складу води має критичне значення.

Метою роботи є: дослідження стабілізаційних та біоцидних властивостей у водопровідній воді реагенту RT-2024-3.

Виклад основного матеріалу

Для оцінки ефективності антискалтанту щодо накипоутворення як середовище застосовували водопровідну воду з характеристиками: $J = 4.30$ мг-екв/дм³; $[Ca^{2+}] = 3.30$ мг-екв/дм³; $[Mg^{2+}] = 1.10$ мг-екв/дм³; $A = 3.60$ мг-екв/дм³; $[SO_4^{2-}] = 27.50$ мг/дм³; $[NO_3^-] = 35.90$ мг/дм³; $[Cl^-] = 22.50$ мг/дм³; рН = 6.80; $[Fe^{2+/3+}] = 0.18$ мг/дм³; $M = 287,5$ мг/дм³.

В проби з водопровідною водою по 0,1 дм³ додавали розраховану кількість антискалтанту. Як антискалтант використовували реагент RT-2024-3. Витримували при температурі 90-100 °С протягом 12 годин. Після чого охолоджували та фільтрували і вимірювали залишкову жорсткість води. Для визначення жорсткості використовували метод трилонометрії з індикатором еріохромом чорним Т.

Стабілізаційний ефект (СЕ) оцінювали за зменшенням жорсткості води при нагріванні розчину з антискалтантом по відношенню до вихідного значення. Даний показник визначали за формулою:

$$CE = \left(1 - \frac{J - J_i}{J - J_{\text{зал.}}}\right) \cdot 100\%.$$

Протинакипний ефект (ПЕ) розраховували за формулою:

$$PE = \frac{J_i}{J} \cdot 100\%.$$

де СЕ – стабілізаційний ефект, %; J – початкова жорсткість розчину, мг-екв/дм³; J_i – залишкова жорсткість в пробі зі стабілізатором, мг-екв/дм³; $J_{\text{зал.}}$ – залишкова жорсткість в холостій пробі, мг-екв/дм³.

Для аналізу характеру біообростань було проведено лабораторний експеримент, який тривав 8 тижнів. Матеріалом для експерименту слугували скляні пластини площею $18,75 \text{ см}^2$ (розмір скляної пластини $7,5 \text{ см} \times 2,5 \text{ см}$).

Експеримент проводили у жовтні-листопаді 2024 року у скляних ємностях (у двох повторях) при природньому освітленні та кімнатній температурі. Пластини заливали водопровідною водою об'ємом 150 см^3 . В ємності з водопровідною водою по додавали $1,5 \text{ см}^3$ інгібітору накипоутворення RT-2024-3. В якості контролю слугувала водопровідна вода. Зйомку пластин з обростанням здійснювали кожні 7 діб.

Для визначення загальної кількості мікроорганізмів у 1 см^3 робили змиви з поверхні скляних пластин. Проводили посів змивів по $0,1 \text{ см}^3$ на поживне середовище МПА з наступним термостатуванням при 37°C протягом 48 годин.

Дослідження проводилося для визначення стабілізаційного ефекту та протинакипного ефекту у водопровідній воді м. Києва з жорсткістю $4,30 \text{ мг-екв/дм}^3$ в залежності від дози антискалantu RT-2024-3. Варто відмітити, що ефективність досліджуваного антискалantu збільшується з підвищенням дози від $2,50$ до $50,00 \text{ мг/дм}^3$. Наприклад, при дозі $2,50 \text{ мг/дм}^3$ СЕ = $8,52\%$, тоді як при $50,00 \text{ мг/дм}^3$ СЕ = $85,56\%$. Стабілізаційний ефект досягав $81-85\%$ при концентрації інгібітору $30-50 \text{ мг/дм}^3$ у разі застосування антискалantu RT-2024-3. За результатами досліджень встановлено, що при дозах $2,50-5,00 \text{ мг/дм}^3$ ПЕ змінюється від $94,26\%$ до $94,65\%$. Досягти ПЕ на рівні $95-99\%$ вдається при дозах $\geq 6,25 \text{ мг/дм}^3$. Протинакипний ефект є досить високим та мало змінюється при використанні RT-2024-3 в дозах $20,0-50,0 \text{ мг/дм}^3$. За дози $50,00 \text{ мг/дм}^3$ ПЕ досягає стабільно високих показників – $99,09\%$. Загалом, протинакипний ефект знаходився на рівні $94 - 99\%$ в усьому діапазоні використовуваних концентрацій реагенту (рис.1).

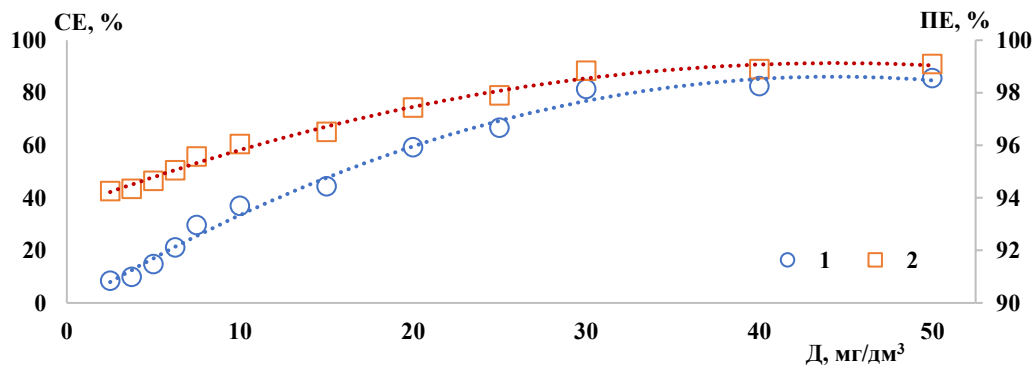


Рис. 1. Залежність стабілізаційного (1) та протинакипного (2) ефектів водопровідної води м. Києва ($J = 4,30 \text{ мг-екв/дм}^3$, $t = 12$ год) від дози антискалantu RT-2024-3

У результаті досліджень біорізноманіття обростання скляних пластин було виявлено, що формування біообростання на скляних пластинах проходило нерівномірно. У випадку використання RT-2024-3 спостерігалася 3 види мікроорганізмів (рис. 2 а), при цьому на контрольних скляних пластинах виявлено 4 види мікроорганізмів (рис. 2 б).

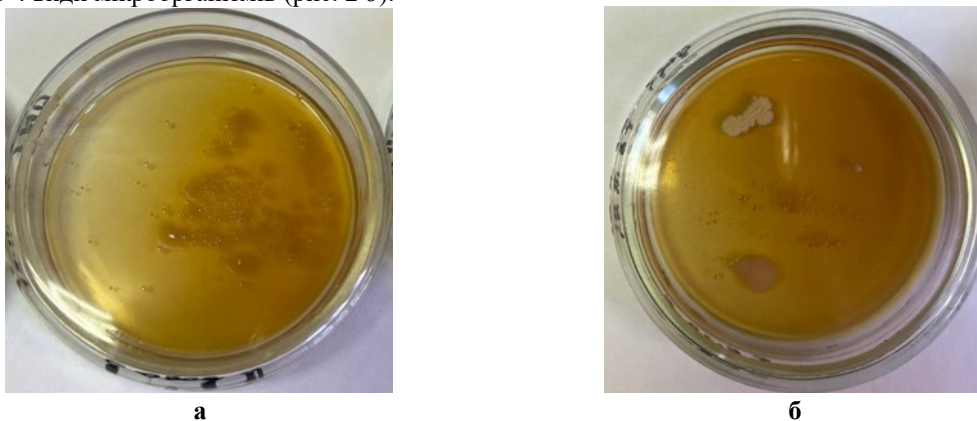


Рис. 2. Дослідження біорізноманіття обростання скляних пластин:

а – у випадку використання RT-2024-3 б – контроль (водопровідна вода без додавання інгібітору накипоутворення).

Після завершення експерименту кількісні показники мікроорганізмів на дослідних скляних пластинах варіювали в широкому діапазоні. Скляні пластини, поміщені у водне середовище з використанням RT-2024-3, в кінці експерименту містили $8,48 \times 10^4$ КУО/см². Найменш інтенсивно обростали контрольні скляні пластини, чисельність мікроорганізмів на яких складала $2,99 \times 10^4$ КУО/см² на завершення експерименту. Ріст біологічного забруднення на дослідних скляних пластинах може бути зумовлений, зокрема, наявністю біогенних елементів в складі реагентів для водопідготовки.

Визначене за результатами експерименту видове різноманіття мікроорганізмів (рис. 3-4), які обростають скляні пластини, ймовірно свідчить про наявність таких основних забруднювачів: загальні коліформні бактерії, ентерококи та інші бактерії.

Серед бактеріологічного забруднення у всіх системах відмічались коліформні бактерії. Серед коліформних бактерій виділяють такі роди: *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Hafnia* та *Klebsiella*. Представники коліформних бактерій є грамнегативними аспорогенними паличками, більшість з них рухливі, середній розмір становить $0,5 \times 1-2$ мкм. Зазвичай довжина клітин одного виду мікроорганізмів залежить від ряду факторів та визначається, зокрема, умовами культивування та віком культури. Більш стійкою ознакою є товщина клітин мікроорганізмів. Серед мікроорганізмів, що формують обростання скляних пластин за умови використання RT-2024-3 відмічено наявність як коротких тонких (рис. 3в) та товстих (рис. 3а) паличкоподібних клітин, так і довгих тонких паличкоподібних клітин (рис. 3б). Коліформні бактерії здатні рости в широкому діапазоні температур з оптимумом при температурі 37°C , є аеробами або факультативними аеробами. Через добу після посіву на поверхні МПА утворюють прозорі колонії з сіро-блакитним відливом, переважно з хвилястими або розпливчастими краями [9].

Ентерококи роду *Enterococcus* є грампозитивними диплококами округлої, овальної або ланцетоподібної форми (рис. 4б), середній розмір яких становить $0,1-1,2$ мкм, можуть утворювати ланцюжки. Ентерококи здатні рости в широкому діапазоні температур. Через добу після посіву на поверхні МПА утворюють прозорі, сірувато-блакитні з блискучою поверхнею дрібні колонії, переважно опуклі та з рівним краєм, при густому посіві здатні утворювати суцільний ріст [10].

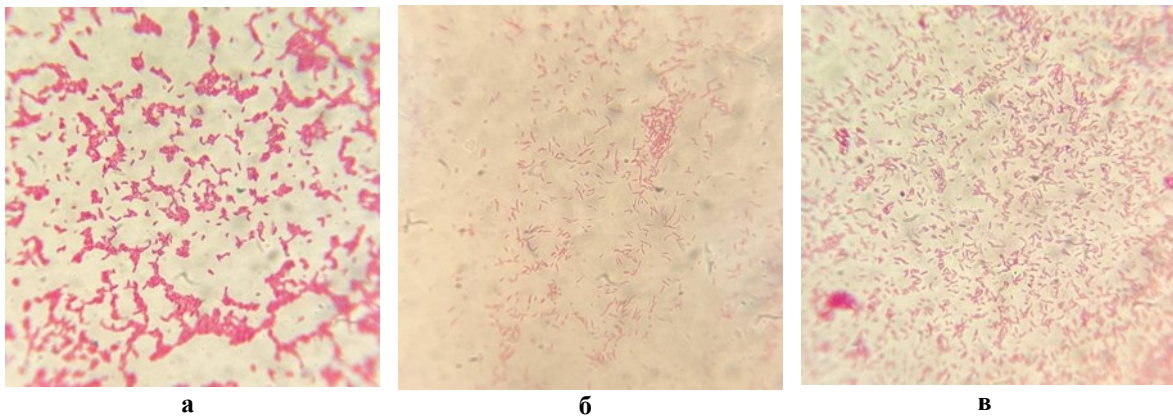


Рис. 3. Мікроскопічне зображення мікроорганізмів, що формують обростання скляних пластин за умови використання RT-2024-3: а – короткі товсті паличкоподібні клітини; б – довгі тонкі паличкоподібні клітини; в – короткі тонкі паличкоподібні клітини. Збільшення $900\times$

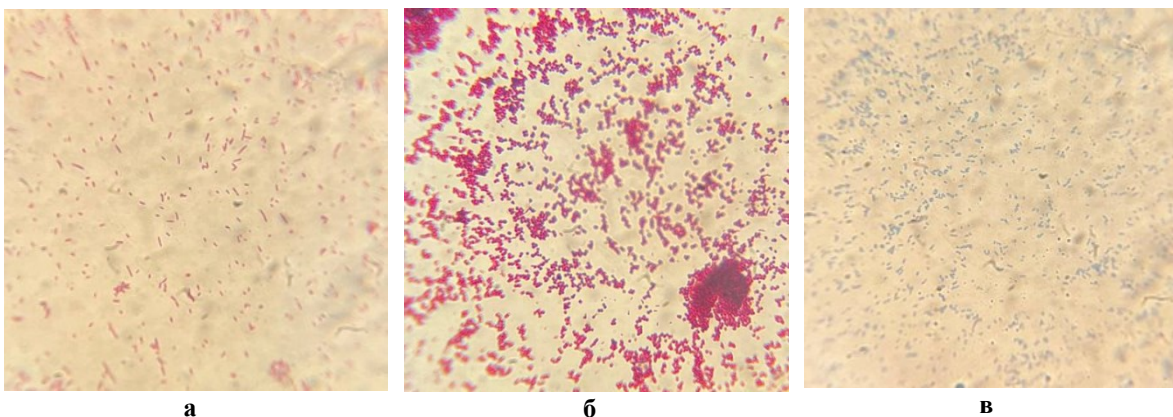


Рис. 4. Мікроскопічне зображення мікроорганізмів, що формують обростання контрольних скляних пластин: а – короткі тонкі паличкоподібні клітини; б – диплококи; в – мікрококи. Збільшення $900\times$

Умови експлуатації систем водопостачання загалом сприяють росту біологічних забруднень, це відбувається, зокрема, через наявність біогенних елементів у складі реагентів, які використовуються для водопідготовки систем водопостачання. Зі свого боку високий вміст біологічних забруднень у воді знижує теплообмін, зумовлює інтенсивний ріст швидкості корозії, у такий спосіб знижуючи ефективність та продуктивність роботи промислових підприємств.

Отже, враховуючи формування різноманітного біообростання на скляних пластинах рекомендовано проводити біоцидну обробку із застосуванням окислюючих та/або неокислюючих біоцидів при використанні зазначеного антискалтанту. Для надання більш детальних рекомендацій варто наступні дослідження провести в умовах, що є близькими до умов в теплообмінних системах.

Висновки

Вивчено процеси стабілізаційної обробки води, дози антискалantu RT-2024-3 у межах 25,0–50,0 мг/дм³ забезпечує максимальний стабілізаційний (≥ 66 –85%) та протинакипний (≥ 97 –99%) ефекти. Для досягнення ПЕ понад 97 % достатньо дози антискалantu 20,00 - 25,00 мг/дм³, при цьому СЕ знаходиться в межах 59 - 66 %.

Вже через сім діб від початку експерименту відзначено формування різноманітного біообростання на всіх скляних пластинах. Серед кількісних показників в угрупованнях біообростання за умови використання RT-2024-3 відмічається значення загального мікробного числа на рівні $8,47 \times 10^4$ КУО/см², видове біорізноманіття представлено 3 видами мікроорганізмів.

Література

1. George R. P. Novel biofilm control measures to prevent corrosion and biofouling in cooling water systems of nuclear power plants / R. P. George et al. // *Journal of Biotechnology & Biomaterials*. – 2012. – 2 (6).
2. Morris D. P. Biofilm: Why the Sudden Interest? / D. P. Morris, A. Hagr // *The Journal of Otolaryngology*. – 2005. – Vol. 34 (Suppl. 2). – P. 56-59.
3. Lenaers P. Negative streamwise velocities and other rare events near the wall in turbulent flows / P. Lenaers et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2011. – Vol. 318. – P. 1-10.
4. Chapman V. Biology of excessive weed growth in hydro-electric lakes of the Waikato River New Zealand / V. Chapman, J. M. A. Brown, C. F. Hill, J. L. Carr // *Hydrobiologia*. – 1974. – Vol. 44. № 4. – P. 349-363.
5. Borenstein S. W. Microbiologically Influenced Corrosion Handbook / S. W. Borenstein // Woodhead Publishing. – 1994. – 288 p.
6. Hamilton W. A. Microbially influenced corrosion in the context of metal microbe interactions. *Microbial Corrosion* / W. A. Hamilton // Ed. by C. A. C. Segura. London: European Federation of Corrosion, IOM Communication. – 2000. – P. 3-17.
7. Coetser S. E. Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems / S. E. Coetser, T. E. Cloete // *Critical Reviews in Microbiology*. – 2005. – Vol. 31, № 4. – P. 213-232.
8. Trus I. Applications of antiscalants in circulating water supply systems / I. Trus, M. Gomelya // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2023. – 58 (2). – P. 360-366.
9. National Research Council (US) Safe Drinking Water Committee. Drinking Water and Health: Volume 1. Washington (DC): National Academies Press (US); 1977. III, Microbiology of Drinking Water. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK234164/>
10. Fisher K. The ecology, epidemiology and virulence of Enterococcus / K. Fisher, C. Phillips // *Microbiology*. – 2009. – 155 (Pt 6). – P. 1749-1757.

References

1. George R. P. Novel biofilm control measures to prevent corrosion and biofouling in cooling water systems of nuclear power plants / R. P. George et al. // *Journal of Biotechnology & Biomaterials*. – 2012. – 2 (6).
2. Morris D. P. Biofilm: Why the Sudden Interest? / D. P. Morris, A. Hagr // *The Journal of Otolaryngology*. – 2005. – Vol. 34 (Suppl. 2). – P. 56-59.
3. Lenaers P. Negative streamwise velocities and other rare events near the wall in turbulent flows / P. Lenaers et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2011. – Vol. 318. – P. 1-10.
4. Chapman V. Biology of excessive weed growth in hydro-electric lakes of the Waikato River New Zealand / V. Chapman, J. M. A. Brown, C. F. Hill, J. L. Carr // *Hydrobiologia*. – 1974. – Vol. 44. № 4. – P. 349-363.
5. Borenstein S. W. Microbiologically Influenced Corrosion Handbook / S. W. Borenstein // Woodhead Publishing. – 1994. – 288 p.
6. Hamilton W. A. Microbially influenced corrosion in the context of metal microbe interactions. *Microbial Corrosion* / W. A. Hamilton // Ed. by C. A. C. Segura. London: European Federation of Corrosion, IOM Communication. – 2000. – P. 3-17.
7. Coetser S. E. Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems / S. E. Coetser, T. E. Cloete // *Critical Reviews in Microbiology*. – 2005. – Vol. 31, № 4. – P. 213-232.
8. Trus I. Applications of antiscalants in circulating water supply systems / I. Trus, M. Gomelya // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2023. – 58 (2). – P. 360-366.
9. National Research Council (US) Safe Drinking Water Committee. Drinking Water and Health: Volume 1. Washington (DC): National Academies Press (US); 1977. III, Microbiology of Drinking Water. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK234164/>
10. Fisher K. The ecology, epidemiology and virulence of Enterococcus / K. Fisher, C. Phillips // *Microbiology*. – 2009. – 155 (Pt 6). – P. 1749-1757.