

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОПРОДУКТАМИ

Ліненко Є.О., Нечипоренко Д.І., Шкоп А.О. Ліфер В.Є.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2 м. Харків, 61002

Yevhen.Linenko@mit.khpi.edu.ua, Dmytro.Nechyporenko@khpi.edu.ua,

Andrii.Shkop@mit.khpi.edu.ua, Valentyn.Y. Lifer@mit.khpi.edu.ua

Забруднення навколишнього середовища нафтою та нафтопродуктами залишається одним із найнебезпечніших проявів техногенного впливу людини на довкілля. В умовах активного розвитку промисловості, зростання інтенсивності транспортних перевезень, енергетичного виробництва та діяльності військово-промислового комплексу зростає кількість джерел забруднення, пов'язаних із витоками, аваріями або неналежною утилізацією продуктів нафтопереробки. Одним із критичних наслідків цього процесу є утворення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, які становлять серйозну загрозу для водних екосистем, ґрунтів та загального екологічного балансу.

Сучасні виклики, пов'язані з погіршенням стану водних об'єктів, зниженням якості питної води та деградацією природних ресурсів, вимагають переосмислення підходів до очищення стічних вод, особливо забруднених стійкими вуглеводнями. Це актуалізує необхідність впровадження інноваційних, екологічно орієнтованих технологій, які не лише ефективно видаляють забруднювальні речовини, а й не потребують подальшої утилізації шкідливих залишків, забезпечують мінімальне навантаження на довкілля та сприяють відновленню природних процесів самоочищення водних екосистем.

У статті представлено комплексний аналіз сучасних методів очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, принципи дії, ефективність та сфери застосування. Розглянуто фізичні (відстоювання, фільтрація, флотація), хімічні (коагуляція, окиснення, сорбція), біологічні (біодеградація, біосорбція) та комбіновані методи, що поєднують декілька підходів для досягнення вищої ефективності очищення. Проведено порівняльний аналіз технологій з урахуванням їх переваг і недоліків, а також можливості впровадження в системи централізованого та локального водоочищення.

Окрема увага приділена перспективним технологіям, які ґрунтуються на використанні природних сорбентів, біопрепаратів, наноматеріалів і мембранних фільтраційних систем. Визначено основні наукові та практичні напрямки подальших досліджень у галузі очищення нафтовмісних стоків, з урахуванням вимог сталого розвитку, економічної доцільності та екологічної безпеки. *Ключові слова:* нафтопродукти, стічні води, забруднення довкілля, методи очищення, екологічна безпека, водоочищення.

Comprehensive analysis of methods for treating wastewater contaminated with petroleum products. Linenko Ye., Nechyporenko D., Shkop A., Lifer V.

Pollution of the environment by oil and petroleum products remains one of the most dangerous manifestations of anthropogenic impact on ecosystems. With the rapid development of industry, the increasing intensity of transportation, energy production, and military-industrial activity, the number of pollution sources associated with leaks, accidents, and improper disposal of petroleum-derived products is growing. One of the critical consequences of this process is the formation of wastewater contaminated with petroleum products, which poses a serious threat to aquatic ecosystems, soil, and overall ecological balance.

Modern challenges related to the deterioration of water bodies, declining drinking water quality, and the degradation of natural resources require a rethinking of approaches to wastewater treatment, particularly in cases of contamination with persistent hydrocarbons. This highlights the need for the implementation of innovative, environmentally oriented technologies that not only effectively remove pollutants but also eliminate the need for further disposal of hazardous residues, reduce environmental pressure, and promote the restoration of natural self-purification processes in aquatic ecosystems.

The article presents a comprehensive analysis of current methods for treating wastewater contaminated with petroleum products, including their operating principles, effectiveness, and areas of application. The study examines physical (sedimentation, filtration, flotation), chemical (coagulation, oxidation, sorption), biological (biodegradation, biosorption), and combined methods that integrate multiple approaches to achieve higher treatment efficiency. A comparative assessment of the technologies is provided, considering their advantages, limitations, and potential for integration into centralized and decentralized water treatment systems.

Special attention is given to promising technologies based on the use of natural sorbents, biopreparations, nanomaterials, and membrane filtration systems. The article outlines key scientific and practical directions for further research in the field of petroleum-containing wastewater treatment, taking into account the principles of sustainable development, economic feasibility, and environmental safety. *Key words:* petroleum products, wastewater, environmental pollution, treatment methods, environmental safety, water purification.

Постановка проблеми. Забруднення водного середовища нафтопродуктами є серйозною екологічною проблемою, що набуває дедалі більшого масштабу у зв'язку з інтенсивним розвитком промисловості, транспорту, енергетики та зростанням техногенних аварій. Стічні води, забруднені нафто-

вими компонентами, є джерелом довготривалого токсичного впливу на водні екосистеми, ґрунти, а також на здоров'я людини. Потрапляння нафтопродуктів у навколишнє середовище призводить до порушення процесів саморегуляції в екосистемах, зниження біорізноманіття, зменшення якості води

та ґрунтів, а також ускладнює використання водних ресурсів у господарських і побутових цілях.

Попри існуючі технології очищення стічних вод, більшість із них не забезпечують повного видалення нафтових забруднювачів, або створюють додаткові екологічні ризики, пов'язані з утворенням залишкових відходів. Це зумовлює необхідність системного аналізу сучасних методів очищення, з урахуванням їх ефективності, екологічної безпеки, економічної доцільності та можливостей практичного впровадження.

У зв'язку з цим виникає потреба у комплексному підході до оцінки та порівняння різних методів очищення нафтовмісних стічних вод, що дозволить визначити найбільш перспективні й екологічно безпечні технології, здатні забезпечити стійкий результат без додаткового навантаження на довкілля.

Актуальність дослідження. Актуальність даного дослідження визначається необхідністю забезпечення сталого управління водними ресурсами, підвищення рівня екологічної безпеки та зменшення негативного впливу нафтових забруднень на довкілля.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження, представлене в статті, є складовою актуального наукового напрямку, що стосується охорони водних ресурсів та зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище. У роботі узагальнено, систематизовано й проаналізовано наукові підходи до очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, що дозволяє поглибити теоретичні уявлення про ефективність, переваги та недоліки фізичних, хімічних, біологічних і комбінованих методів водоочищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років спостерігається тенденція до розвитку високоефективних та екологічно безпечних методів видалення нафтопродуктів із водного середовища.

Значну увагу приділено мембранним технологіям, зокрема ультрафільтрації, нанофільтрації та мембранно-біореакторним системам [1]. Сучасні дослідження демонструють, що модифіковані мембрани з використанням наноматеріалів (наприклад, оксидів TiO_2 , CuO , графену) забезпечують високий ступінь очищення (до 95–98 %) за рахунок покращеної гідрофільності, стійкості до забруднення та підвищеної селективності [2,3].

Актуальними є також дослідження у сфері біологічного очищення. Зокрема, впровадження мікроорганізмів, здатних до деградації вуглеводнів, у формі біоплівки або іммобілізованих систем на носіях природного або синтетичного походження дозволяє підвищити ефективність очищення залишкових концентрацій нафтопродуктів. Такі підходи демонструють добрі результати у природних або штучно створених біоценозах (ставках, вологих зонах, біореакторах), особливо в умовах низьких навантажень [4-6].

Фізико-хімічні методи, включаючи коагуляцію, флотацію, сорбцію та електрохімічне окиснення, продовжують залишатися ефективними для середнього рівні забруднення. Окремі дослідження підтверджують перспективність використання комбінованих технологій, зокрема поєднання електрокоагуляції з сорбційними фільтрами на основі активованого вугілля або цеолітів, що дозволяє зменшити концентрацію нафтопродуктів до нормативних значень у короткі терміни [7-9].

Зростає інтерес до застосування природних сорбентів з біостимулюючими властивостями, а також до нанотехнологій – зокрема, наночастинок заліза, які здатні каталізувати окиснення нафтопродуктів у присутності перексиду водню або світлового випромінювання [10]. Однак їх широке впровадження стримується економічними та екологічними обмеженнями, що потребує додаткових досліджень з метою оцінки довгострокової ефективності та безпечності.

Комплексні підходи до очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, у сучасних наукових публікаціях розглядаються як найбільш ефективні [11]. Поєднання механічного вилучення, фізико-хімічної обробки та біологічного доочищення забезпечує найвищий ступінь ефективності за умов адаптації системи до конкретних умов забруднення та типу стічних вод.

Таким чином, аналіз останніх публікацій свідчить про зростаючий науковий інтерес до інтегрованих технологій очищення, орієнтованих на мінімізацію негативного впливу на довкілля, економічну ефективність та стійкість у довгостроковій перспективі.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значної кількості досліджень, присвячених очищенню стічних вод від нафтопродуктів, багато аспектів залишаються недостатньо опрацьованими. Зокрема, актуальними залишаються питання порівняльної оцінки ефективності існуючих методів очищення в різних умовах, їх екологічної безпеки, економічної доцільності, рівня утворення вторинних відходів та можливостей для подальшої інтеграції в системи сталого водокористування. Крім того, існує потреба у формуванні узагальненого підходу до вибору технології очищення залежно від складу забруднень, обсягів стічних вод, типу джерела забруднення та екологічних умов. Метою даної роботи є комплексний аналіз доступних методів очищення, їх класифікації, порівняння та визначення найбільш перспективних і безпечних рішень для застосування у практичній діяльності.

Новизна. Запропоновано узагальнену класифікацію методів очищення відповідно до типу забруднення та умов їх застосування, що дозволяє обґрунтовано підходити до вибору оптимальної технології для конкретних природно-техногенних ситуацій. Розроблено принципову схему очищення

стічних вод, які містять нестабілізовані, слабостабілізовані або сильностабілізовані нафтопродукти.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Результати дослідження мають важливе методологічне значення для формування цілісного підходу до аналізу, оцінювання та впровадження технологій очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами.

Виклад основного матеріалу. Наразі відомо чимало способів очищення довкілля від нафтопродуктів, зокрема: природне самоочищення, механічні методи, хімічні способи, фізико-хімічні технології, електрохімічні методи, біологічні методи очищення. Кожен із наведених методів має свої переваги і недоліки.

Самоочищення природного середовища від нафтопродуктів здійснюється завдяки процесам випаровування, емульгування, диспергування, розчинення та фотоокиснення. Усі ці фізико-хімічні явища супроводжуються біологічним розщепленням нафтопродуктів організмами, що населяють екосистему. Проте цей природний механізм не забезпечує повноцінного очищення води й ґрунту до нормативно допустимих рівнів, оскільки концентрація забруднень зазвичай значно перевищує встановлені гігієнічні норми.

Механічні методи очищення реалізуються за допомогою спеціального обладнання та пристроїв, призначених для збору нафти. Ці методи відзначаються простотою використання, однак мають певні недоліки, зокрема невисоку ефективність та утворення великої кількості нафтовмісних шламів, що потребують подальшої обробки. У зв'язку з цим механічне очищення здебільшого застосовується як первинний, попередній етап у процесі ліквідації нафтового забруднення.

Хімічні методи нейтралізації нафтовмісних рідких і твердих відходів базуються на введенні в забруднене середовище спеціальних хімічних реагентів. Залежно від типу взаємодії між реагентами й забруднювачами можуть протікати реакції осадження, окисно-відновні процеси та реакції заміщення.

Для хімічної іммобілізації нафтопродуктів або утворення комплексів з ними застосовуються неорганічні зв'язувальні матеріали, серед яких найбільш поширені цемент, зола, калієві й натрієві силікати, вапно, а також гелеутворюючі речовини – такі як бентоніт і целюлоза.

У багатьох країнах активно розробляються фізико-хімічні методи ліквідації нафтових забруднень на поверхні водойм – річок та морів. Для цього створюються спеціальні хімічні речовини – абсорбенти, які у вигляді рідини або порошку розпилюються безпосередньо на нафтову плівку. Ці речовини не тільки вбирають нафту, але й вступають з нею у хімічні реакції, що призводить до її розкладу. Проте утворені при цьому продукти можуть бути шкідливими,

а іноді навіть токсичнішими за саму нафту, забруднюючи воду.

Попри це, застосування абсорбентів виправдане в тих випадках, коли необхідно розірвати нафтову плівку, що перешкоджає доступу кисню до води, забруднює берегову лінію та становить загрозу для водоплавних птахів і тварин.

До хімічних засобів боротьби з нафтовими розливами також належать диспергенти – речовини, які знижують поверхневий натяг нафтової плівки та сприяють її розпаду на дрібні краплі. Завдяки цьому покращується газообмін між водою та атмосферою, поліпшується проникнення сонячного світла, а також активізується процес біорозкладу нафти.

До фізико-хімічних способів очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, належать такі процеси, як флоатція, флокуляція та сорбція.

Серед методів, що передбачають руйнування (деструкцію) забруднювачів, виділяють біологічні та термічні технології.

Термічні способи утилізації нафтопродуктів включають спалювання та піроліз.

Спалювання є найпоширенішим і технологічно опрацьованим методом. Воно здійснюється в спеціальних печах різних типів при температурах не нижче 1200 °С.

Біологічні методи утилізації промислових і побутових відходів набувають все більшого поширення. Вони базуються на здатності певних штамів мікроорганізмів у процесі своєї життєдіяльності розкласти або поглинути в біомасу різноманітні органічні забруднення.

Біологічні технології найчастіше застосовуються для знешкодження органічних токсичних речовин, сполук важких металів, а також азотовмісних і фосфорних забруднювачів у ґрунтах.

Проте біологічні способи очищення нафтозабруднень застосовують обмежено, оскільки для ефективного біорозкладу нафти за участі штучно вирощених мікроорганізмів потрібні тривалий час та підвищена температура середовища.

Забруднення водних екосистем нафтопродуктами є одним із найсерйозніших проявів впливу людської діяльності на довкілля. потрапляння нафти та її похідних у водойми зазвичай відбувається через аварії на транспорті, прориви нафтопроводів, скидання промислових стічних вод або порушення правил зберігання нафтопродуктів. На поверхні води утворюється нафтовий шар, який ускладнює газообмін між водою та атмосферою, порушує тепловий режим та знижує прозорість, що негативно впливає на фізико-хімічні характеристики водного середовища. Спостерігається зменшення концентрації розчиненого кисню, зміни рН та підвищення вмісту токсичних речовин, зокрема ароматичних вуглеводнів – бензолу, толуолу, ксилолу, що мають канцерогенну дію.

Окрім прямої токсичної дії, нафтопродукти змінюють властивості середовища – знижують прозо-

рість води, сприяють евтрофікації. Хоча деякі мікроорганізми можуть розкласти нафтові сполуки, цей процес відбувається повільно і супроводжується значним споживанням кисню, що ще більше погіршує стан водойми. У довгостроковій перспективі нафтове забруднення спричиняє деградацію екосистем, зменшує їхню стійкість до інших впливів і порушує екологічну рівновагу, особливо в замкнених або слабо проточних водоймах, де природне самоочищення дуже повільне.

Ефективність очищення води від нафтопродуктів залежить від характеру та рівня забруднення, а також фізико-хімічних властивостей самих речовин. Застосовують різні методи очищення – механічні, фізико-хімічні й біологічні, які комбінуються відповідно до стадії забруднення.

Висновки. Аналіз методів очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, свідчить про те, що це складна екологічна проблема, яка потребує комплексного та диференційованого підходу. Потрапляння нафти та її похідних у водне середовище призводить до серйозних змін фізико-хімічних властивостей води та завдає значної шкоди водним організмам. Найефективнішим є поетапне очищення, що включає механічні, фізико-хімічні та біологічні методи, кожен з яких виконує важливу функцію на певному етапі забруднення. Механічні способи доцільно застосовувати для видалення великої кількості нафти з поверхні води, фізико-хімічні методи дозволяють усунути емульговані та розчинені фракції, а біологічні – забезпечують остаточне очищення до екологічно безпечного рівня. Такий інтегрований

підхід дає змогу досягти високої ефективності очищення, знижує екологічні ризики та сприяє відновленню водних екосистем.

Нафтовмісні стоки практично завжди одночасно з нафтопродуктами містять також механічні частинки, поверхнево-активні речовини, органічні сполуки і, у багатьох випадках, важкі метали. При розробці технологічних схем очищення, окрім багатокomпонентності цих стічних вод, необхідно неодмінно враховувати стан і ступінь агрегативної стійкості нафтопродуктів, що містяться в стічних водах (рис. 1).

Найбільш складною проблемою є очищення стічних вод, що містять сильно стабілізовані нафтопродукти. У технології очищення таких стоків, як правило, застосовується ступінь дестабілізації (демульгування), яка дозволяє ґрунтовно понизити агрегативну стійкість емульсій і дає можливість здійснення ефективної коагуляції частинок нафтопродуктів, що дестабілізуються.

На рис. 2 приведені можливі варіанти принципів схем очищення нафтовмісних вод, що містять нестабілізовані, слабостабілізовані і сильно стабілізовані нафтопродукти. Ці технологічні схеми в тому або іншому варіанті реалізовані на практиці і підтвердили свою високу ефективність і надійність.

Комплексний підхід до очищення стічних вод є важливим кроком у збереженні водних ресурсів та забезпеченні екологічної безпеки на всіх етапах промислового виробництва, що впливає на навколишнє середовище.

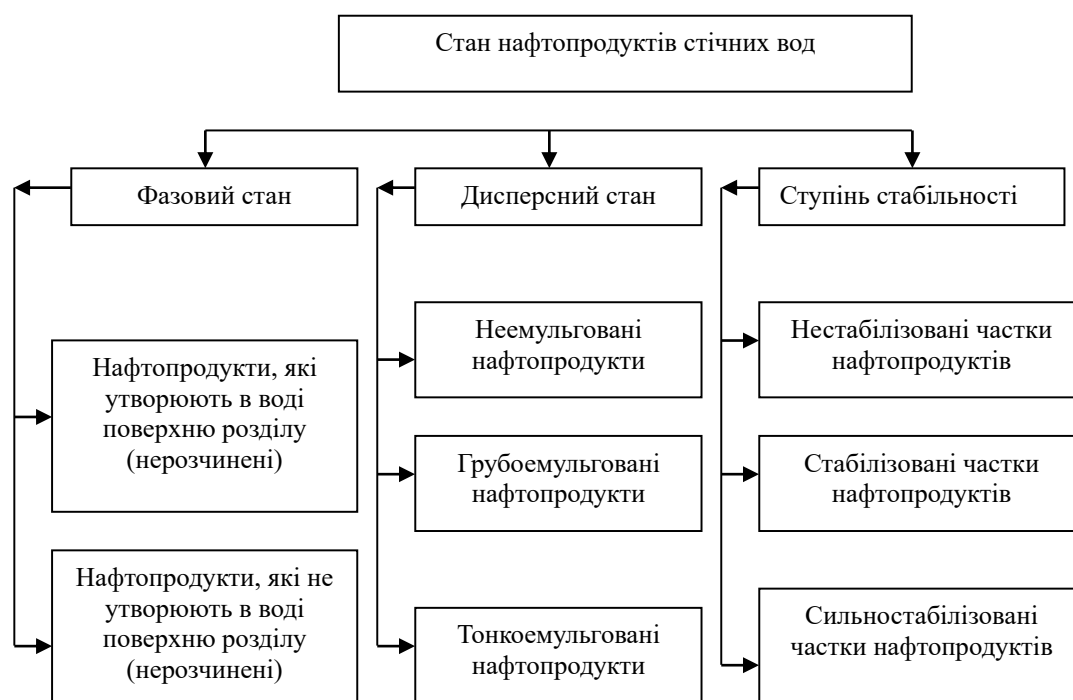


Рис. 1. Характеристика стану нафтопродуктів в стічних водах

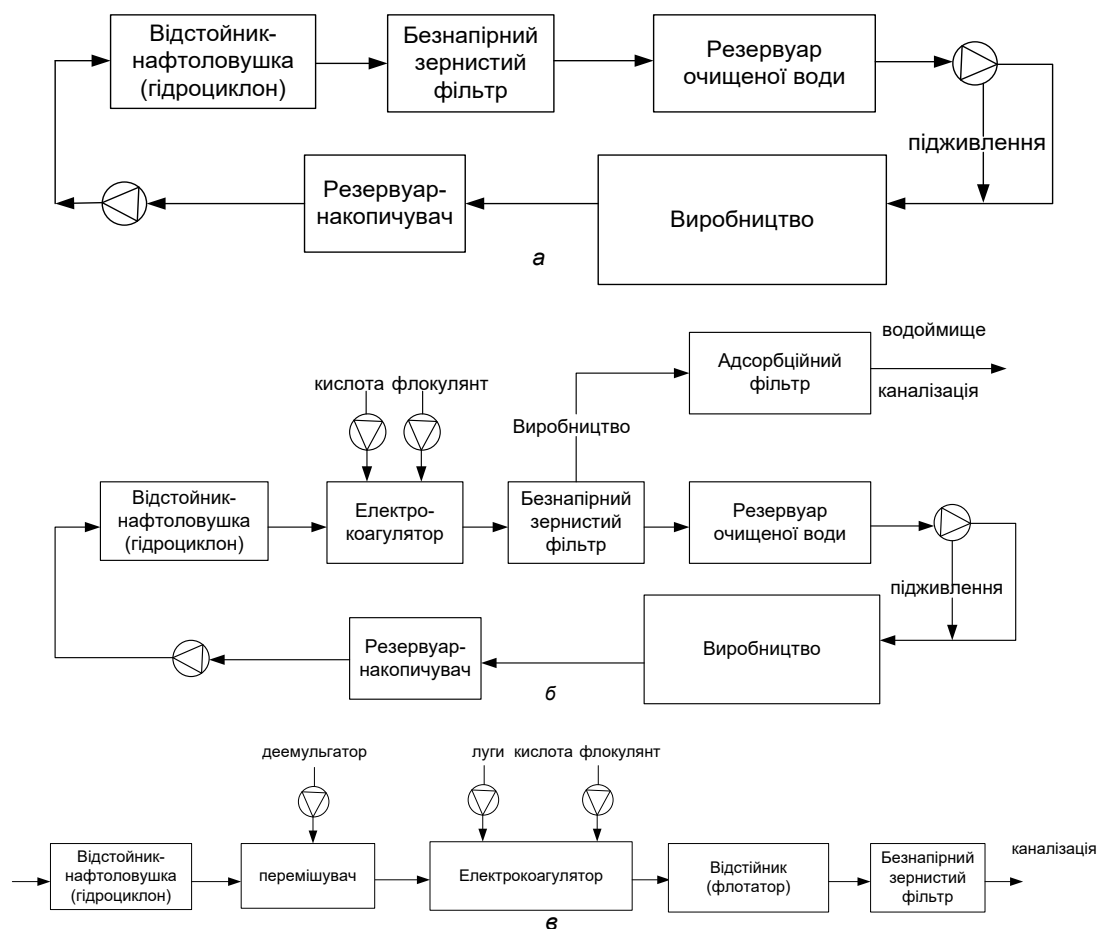


Рис. 2. Принципові схеми очищення стічних вод, які містять нестабілізовані (а), слабостабілізовані (б) або сильностабілізовані (в) нафтопродукти

Література

1. Вознюк М.Б., Т.О. Шаблій Ефективність очищення води від нафти алюмінієвими коагулянтами. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2023. № 1(22). С. 37–51.
2. Vozniuk M., Shabliy T. Evaluation of the effectiveness of treatment water emulsions from oil by physico-chemical methods. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. № 4. С. 65–72.
3. Alternative Ways of Extracting Oil from Water Bodies / T. Shabliy et al. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. № 24(11). P. 127–134.
4. Materials and Technologies for the Tertiary Treatment of Produced Water Contaminated by Oil Impurities through Nonfibrous Deep-Bed Media: A Review / P. Sobolciak et al. *Water*. 2020. № 12. P. 3419.
5. Bhushan B. Bioinspired oil-water separation approaches for oil spill clean-up and water purification. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2019. Vol. 377(2150). P. 20190120.
6. Oily Wastewater Treatment: Overview of Conventional and Modern Methods, Challenges, and Future Opportunities / K. Abuhasel et al. *Water*. 2021. Vol. 13 (7). P. 980
7. Separation of emulsified crude oil from produced water by gas flotation: A review / Ce Wang et al. *The Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 845. P. 157304.
8. A two-stage dissolved air flotation saturator configuration for significant microbubble improvement / M.H. Nikfar et al. *Environ Technol*. 2023. Vol. 44(9). P. 1228–1237.
9. The use of flotation method for purification of wastewaters contaminated with oil products / M. Maksymiuk et al. *Water&Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*. 2021. Vol. 29(№ 1). P. 11–19.
10. Clay-Coated Meshes with Superhydrophilicity and Underwater Superoleophobicity for Highly Efficient Oil.Water Separation / Shaolin Y. et al. *Materials (Basel)*. 2023. 16(12). 4396.
11. Preparation of superhydrophobic mesh and application in multi- stage parallel oil. Water separation system / X. Chen et al. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2020. Vol. 41 (1). P. 39-46

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: