

## ЕКОЛОГІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 628.3:504

ВОЗНЮК М. Б., ШАБЛІЙ Т. О.\*  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД НАФТИ АЛЮМІНІЄВИМИ КОАГУЛЯНТАМИ

У даній роботі були досліджені процеси реагентного очищення водних емульсій від нафти із використанням алюмінієвих коагулянтів, таких як: сульфат алюмінію, гідроксид алюмінію та гідроксохлорид алюмінію. У процесах очищення емульсії застосовували коагулянти окремо, а також у присутності сорбентів: бентоніту або активованого вугілля. Показано, що алюмінієві коагулянти в дозах 2–50 мг/дм<sup>3</sup> окремо або у комбінації з сорбентами забезпечують високий ступінь видалення нафти з емульсії. Ступінь очищення води досягає 97–99 %. Найбільшу ефективність щодо видалення нафти з води має гідроксид алюмінію, який забезпечує максимальне зниження концентрації нафти як в прісній, так і в мінералізованій воді. Сумісне застосування алюмінієвих коагулянтів з сорбентами відзначається плинністю ефективності, яка залежить від типу коагулянту та сорбенту, їх концентрацій та мінералізації вихідної води.

**Ключові слова:** нафтовмісні води, лляльні води, алюмінієвий коагулянт, сорбент, очищення емульсії.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2023.276446

\*Corresponding author: dsts1@ukr.net

Received 29 December 2022; Accepted 23 March 2023

**Постановка проблеми.** Суднопластво є важливим інструментом торгівлі і відіграє значну роль у встановленні економіки країни. Разом з тим, дана галузь має вплив на навколишнє середовище, зокрема гідросферу. В результаті експлуатації водного транспорту, в ллялах машинних відділень суден відбувається утворення лляльних вод – води з домішками (переважно нафтопродуктів). В даний час до складу лляльних вод входять важке паливо, мастило, масло для гідравлічних систем, миючі засоби, присадки до масел та хімікати [1].

Вимогами національних та міжнародних нормативно-правових актів визначено норми, що загалом встановлюють заборону скидання із суден нафти, шкідливих речовин, сміття, забруднених і нормативно очищених вод як на внутрішніх водних шляхах так і у внутрішні морські води та територіальне море України, а також, що лляльні води з суден повинні систематично передаватися на спеціальні очисні споруди для очищення та знезараження [2-4] або скидатися за борт (у міжнародних водах) очищені за допомогою судових установок (сепараторів) з концентрацією нафтопродуктів не більше 15 млн<sup>-1</sup> [5].

Гранично допустима концентрація нафтопродуктів (у розчиненому і емульгованому стані) для води водних об'єктів господарсько-питного і культурно-побутового використання дорівнює 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, для рибогосподарських водних об'єктів – 0,05 мг/дм<sup>3</sup> [6-7].

Скид очищених лляльних вод, чи на берегових станціях чи безпосередньо з суден, за недотриманням нормативів може призвести до багатьох негативних наслідків для людини, навколишнього середовища і водних популяцій. Нафтовмісні лляльні води можуть отруювати організми, що живуть у воді, оскільки вони можуть покривати рослини і дрібних тварин, при наявності на поверхні води можливе винесення на берег та спричинення порушення життєвих циклів рослин і дихання тварин [8].

Намагаючись вирішити питання ефективної очистки лляльних вод, з метою попередження забруднення та покращення екологічного стану водойм, розробляються сучасні системи очистки. В міру розробки нового обладнання використовуються нові технології, в основі яких лежать фізичні, фізико-хімічні, хімічні, біологічні та комбіновані методи очистки.

**Аналіз попередніх досліджень.** В залежності від вмісту нафти, морфології лляльних вод, дисперсності розчинів та інших характеристик застосовують відповідні методи очистки.

Оскільки в емульсіях лляльних вод зазвичай міститься до 50 % частинок нафтопродуктів розмірами до 10 мкм, 25 % – до 30 мкм, решта мають розміри від 30 до 200 мкм [9], їх доцільно віднести до гетерогенних дисперсних систем [10].

Системи, утворені домішками такої групи, кінетично нестійкі. Нерозчинні речовини утримуються у завислому стані динамічними силами потоку води. Для видалення домішок цієї групи використовують методи і прийоми, засновані на таких фізико-хімічних процесах, як адгезія на поверхні інертних зернистих завантажень, седиментація і коагуляція за допомогою коагулянтів та флокулянтів, флотація. Основні методи очищення води: відстоювання, фільтрування, мікропроцідування, центрифугування, обробка води коагулянтами з подальшим видаленням суспензій, флотація [10].

Широкого поширення набуло очищення стічних вод за допомогою коагуляції [11-13]. Для коагуляційного очищення стічних вод, у якості коагулянтів найчастіше використовують солі алюмінію і заліза, особливо сульфат алюмінію, менше використовують хлорид і гідроксохлориди алюмінію, а також сульфати і хлориди заліза, алюмінат натрію [14].

Коагулянти застосовують для зниження агрегатної та седиментаційної стійкості іоногенних, колоїдних і високодисперсних домішок, що забруднюють воду. Так, до води додають електроліти, здатні до гідролізу і утворення нерозчинних гідроксидів. Як результат, утворені аквакомплекси, полімеризуючись, взаємодіють з різноманітними зарядженими домішками різного ступеня дисперсності. Основною проблемою при очищенні води коагулянтами є їх залишок у очищеній воді. Тому повнота гідролізу електроліту важлива при виборі того чи іншого реагенту [15].

Процес коагуляції та очищення води залежить від наступних факторів: природи та дози коагулянту, складу та рН води, температури, іонного складу води. При коагуляційному очищенні води сполуками алюмінію (солі, гідроксохлорид, алюмінат) слід особливо уваги приділяти рН середовища і за необхідності його коригувати, так як  $Al(OH)_3$  має амфотерний характер, і в кислому і у лужному середовищі відбувається неповний гідроліз коагулянту і залишається високий вміст алюмінію в очищеній воді [16]. На процес коагуляції нафтовмісних вод теоретично матиме вплив мінералізація, оскільки вміст солей у водах океанів і деяких морів досягає  $50 \text{ г/дм}^3$  і більше [10].

Одним із базових алюмінієвих коагулянтів є гідроксид алюмінію  $Al(OH)_3$ . Свіжоосаджений алюміній гідроксид легко розчиняється в кислотах та лугах (крім амоній гідроксиду). Перевагами використання даного коагулянту є те, що він: легше гідролізується, містить більше активного компоненту, менше підкислює воду при гідролізі, має вищу ефективність, у порівнянні із сульфатом алюмінію [17]. Разом з тим,  $Al(OH)_3$  має підвищену чутливість до рН і температури оброблюваної води. Ізоелектрична область для гідроксиду алюмінію, де у нього найменша розчинність, відповідає  $pH = 6,5-7,5$ . При більш низьких значеннях рН утворюються частково розчинні основні солі, при більш високих – алюмінати. При температурі вихідної води нижче  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ , в результаті зростання гідратації гідроксиду алюмінію, сповільнюються процеси коагулювання її домішок і декантування пластівців, осад гідроксиду алюмінію відкладається, залишковий алюміній потрапляє в фільтрат, а пластівці гідроксиду утворюються у воді вже після очищення [18].

Сульфат алюмінію є одним із найпоширеніших коагулянтів. Коагулюючі властивості  $Al_2(SO_4)_3$  обумовлені утворенням колоїдного гідроксиду алюмінію і основних сульфатів в результаті гідролізу [18]. За достатньо високої концентрації гідроксид-іонів сульфат алюмінію безпосередньо гідролізує до  $Al(OH)_3$  [14]. Перевагою цього реагенту є його доступність і невисока вартість. До недоліків використання сульфату алюмінію відносять невисокий вміст активного компоненту (всього 15%  $Al_2O_3$ ), низьку ефективність, особливо при низьких температурах води, можливість підкислення води із низькою лужністю внаслідок гідролізу коагулянту [18], при високій жорсткості води відбувається відкладення сульфатів кальцію та магнію, сульфат-іони зв'язуються з катіонами алюмінію в стійкі комплекси, при цьому відбувається велика витрата коагулянту [16].

Ще один із коагулянтів, що застосовується для очистки стічних вод, є гідроксохлорид алюмінію  $Al(OH)_2Cl$  (ГОХА), який в якості коагулянту має ряд переваг перед сульфатом алюмінію. Однією з них є те, що він має високу коагуляційну здатність в більш широкому інтервалі рН, забезпечує утворення великих пластівців, які швидко осаджуються. Витрата гідроксохлориду алюмінію на 25–30 % нижче при однаковому ефекті очищення у порівнянні з сульфатом алюмінію [16].

З метою інтенсифікації процесів коагуляційного очищення, за необхідності, застосовують реагентні методи. Зокрема, за рахунок внесення лужних чи кислих реагентів регулюють рН, чи використовуючи мінеральні замутнювачі, такі як глини, бентоніти, графіт, які відіграють роль додаткових центрів кристалізації

продуктів гідролізу, підсилюють флокуляційну дію поліелектролітів, відбувається збільшення ефекту сорбції розчинених домішок і прискорюється коагуляція [19].

Наукових робіт присвячених застосуванню методу коагуляції для очищення нафтовмісних стічних вод досить небагато [20-23]. Це пов'язано зі складністю нафтовмісних стічних вод, у зв'язку з чим необхідне проведення великої кількості експериментів для вибору найбільш ефективних коагулянтів для максимального розділення нафти і води.

**Метою** статті є оцінка ефективності алюмінієвих коагулянтів в процесах очищення лляльних нафтовмісних вод як прісних, так і солоних, в залежності від типу та дози коагулянту за наявності чи відсутності сорбенту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Провести оцінку ефективності алюмінієвих коагулянтів різного складу з перспективою їх використання для очищення прісних та морських вод від нафти.

2. Визначити ступінь ефективності застосування сорбентів бентоніту та активованого вугілля в процесах коагуляційного очищення нафтовмісних вод в залежності від типу та концентрації коагулянту, мінералізації води, дози сорбенту.

**Методика роботи.** В роботі використовували модельні нафтовмісні емульсії з концентрацією нафти у воді 100 мг/дм<sup>3</sup>. Застосовували емульсії двох типів: емульсія на основі водопровідної води та емульсія на основі солоного розчину, який містив 30 г/дм<sup>3</sup> хлориду натрію.

В якості алюмінієвих коагулянтів використовували сульфат алюмінію (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), гідроксид алюмінію (Al(OH)<sub>3</sub>) та гідроксохлорид алюмінію (Al(OH)<sub>2</sub>Cl). Дози коагулянтів становили 2, 5, 10, 20 та 50 мг/дм<sup>3</sup> у перерахунку на оксид алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Коагулянти використовували окремо або у присутності сорбентів-замутнювачів.

В якості сорбентів-замутнювачів застосовували або бентоніт, або активоване вугілля з концентраціями 50 та 100 мг/дм<sup>3</sup>.

Після додавання реагентів корегували рН на рівні 7,5, перемішували протягом 3 хвилин та відстоювали протягом 24 годин. Після відстоювання проби відфільтровували із застосуванням паперових фільтрів «синя стрічка» та у відібраних пробах визначали залишкову концентрацію нафти екстракційно-спектрофотометричним методом [24]. Як екстрагент застосовували CCl<sub>4</sub>. Розчином порівняння був відповідний розчинник. За отриманими результатами розраховували ступінь видалення нафти з води (Z, %) за формулою:

$$Z = \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) \cdot 100, \% \quad (1)$$

де C – залишкова концентрація нафти в очищеній воді; C<sub>0</sub> – вихідна концентрація нафти в емульсії.

**Виклад основного матеріалу.** Основним компонентом лляльних вод, які заборонено скидати з кораблів у відкриті водойми, є нафта та нафтопродукти. На першому етапі роботи були проведені дослідження щодо визначення ефективності очищення нафтовмісних емульсій в залежності від типу та дози коагулянтів. Про ефективність зниження вмісту нафти в модельних емульсіях різної мінералізації при використанні алюмінієвих коагулянтів можна судити за результатами, наведеними на рисунках 1 та 2.

Як видно з рисунку 1, при застосуванні класичного коагулянту – сульфату алюмінію – в діапазоні його концентрацій по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2–50 мг/дм<sup>3</sup> вміст нафти у воді знижується відповідно до 3,18–1,41 мг/дм<sup>3</sup>. При цьому ступінь вилучення нафти з води становить 96,82–98,59 %. Для мінералізованих розчинів ([NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) за тих же самих умов показники дещо кращі: залишковий вміст нафти становить 2,19–0,54 мг/дм<sup>3</sup>, ступінь вилучення нафти з води становить 97,81–99,46 %.

Слід зазначити, що серед використаних коагулянтів найкращі показники забезпечує гідроксид алюмінію як в прісній, так і в морській воді. Так, при його застосуванні у концентраціях 2–50 мг/дм<sup>3</sup> по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в прісній воді забезпечується зниження вмісту нафти до 1,97–0,8 мг/дм<sup>3</sup> відповідно (Z=98,03–99,20 %), а для морської води ці показники становлять відповідно 1,73–0,34 мг/дм<sup>3</sup> (Z=98,27–99,66 %).

Гідроксохлорид алюмінію за ефективністю займає проміжну позицію: забезпечує кращі показники, ніж сульфат алюмінію, проте менш ефективний, ніж гідроксид алюмінію. При його застосуванні концентрація нафти зменшується до 2,06–0,95 мг/дм<sup>3</sup> (Z=97,94–99,05 %) в прісній воді, і знижується до 2,45–1,92 мг/дм<sup>3</sup> (Z=97,55–98,08 %) в солоній воді.

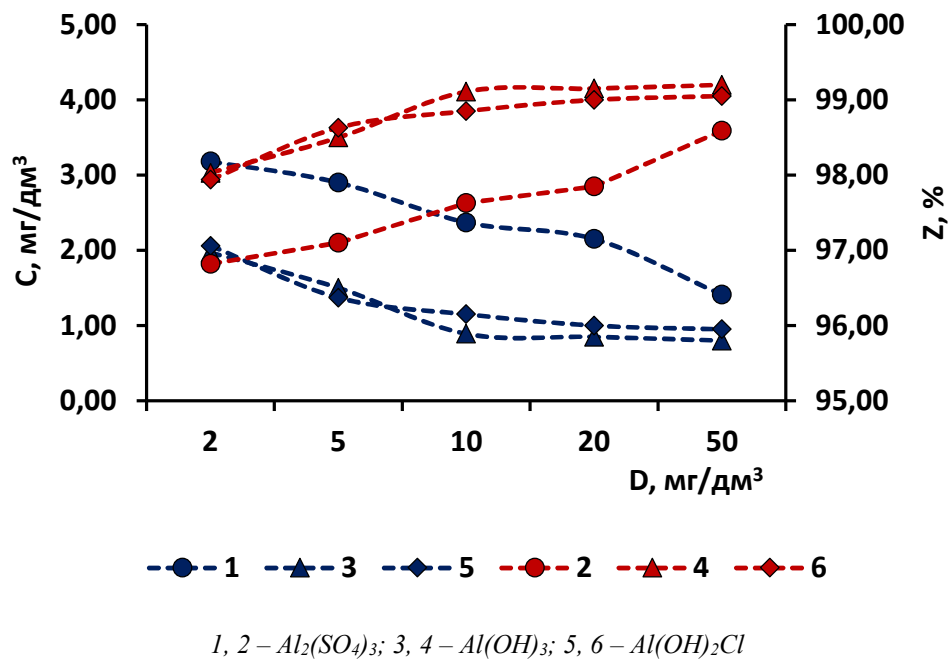


Рис. 1 – Залежність залишкової концентрації нафти у прісній воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від типу та дози коагулянту (у розрахунку по  $Al_2O_3$ )

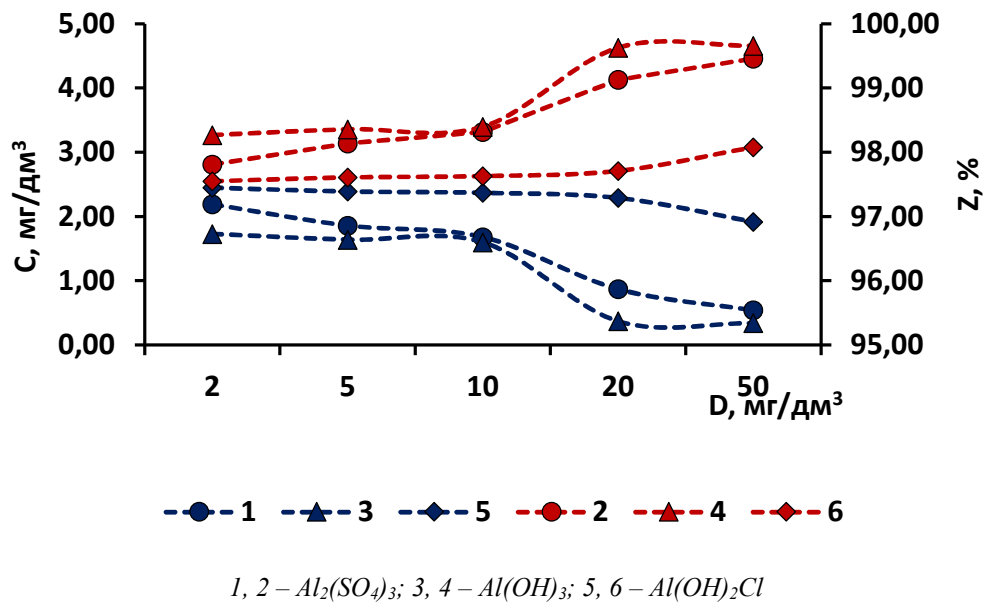
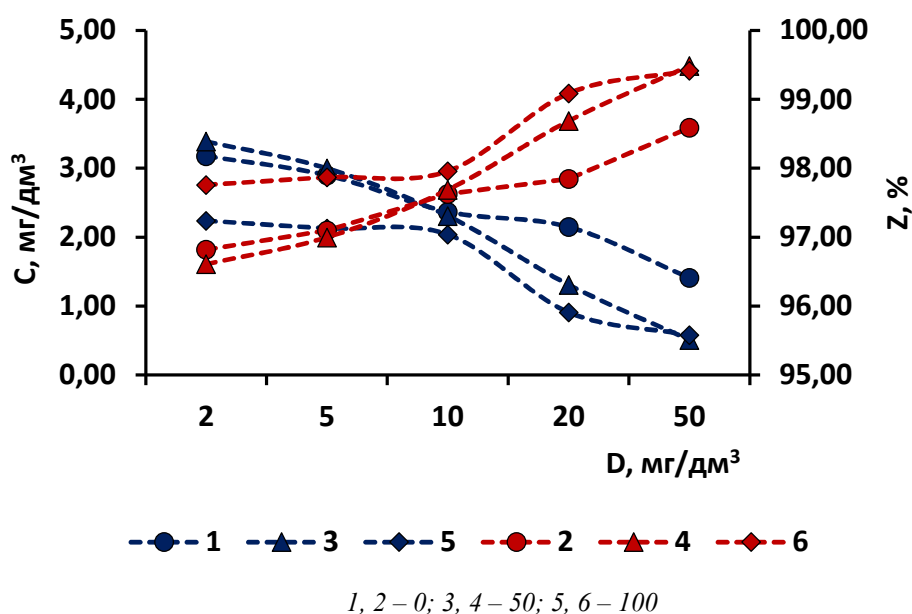


Рис. 2 – Залежність залишкової концентрації нафти у морській воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>, [NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від типу та дози коагулянту (у розрахунку по  $Al_2O_3$ )

На другому етапі роботи проводили визначення ступеню ефективності використання сорбентів-замутнювачів бентоніту та активованого вугілля в процесах коагуляційного очищення нафтовмісних вод в залежності від типу та концентрації коагулянту, мінералізації води, дози сорбенту.

Про ефективність зниження вмісту нафти в модельних емульсіях різної мінералізації при одночасному використанні алюмінієвих коагулянтів та бентоніту можна судити за результатами, наведеними на рисунках 3–8.

Як видно з рисунків 3–4, ефективність сумісного використання коагулянту сульфату алюмінію та бентоніту стабільно спостерігається, починаючи з дози коагулянту 10 мг/дм<sup>3</sup> і при дозах бентоніту 50 та 100 мг/дм<sup>3</sup>. Дані закономірності характерні як для прісної, так і для солоної води. Так, при сумісній обробці прісної води сульфатом алюмінію (D=10 мг/дм<sup>3</sup>) та бентонітом (C=50 мг/дм<sup>3</sup>) залишковий вміст нафти у воді знижується з 2,37 (без додавання бентоніту) мг/дм<sup>3</sup> до 2,31 мг/дм<sup>3</sup>, а при збільшенні концентрації бентоніту до 100 мг/дм<sup>3</sup> вміст нафти у воді зменшується до 2,04 мг/дм<sup>3</sup>. Більш суттєвий вплив від наявності бентоніту спостерігається при збільшенні дози сульфату алюмінію до 50 мг/дм<sup>3</sup>. За такої дози коагулянту залишковий вміст нафти у воді становить 1,41 мг/дм<sup>3</sup> (без додавання бентоніту), 0,51 мг/дм<sup>3</sup> при дозі бентоніту 50 мг/дм<sup>3</sup> та 0,58 мг/дм<sup>3</sup> при дозі бентоніту 100 мг/дм<sup>3</sup>. За даних умов ступінь очищення води від нафти становить відповідно 98,59 %, 99,49 %, 99,42 %.



**Рис. 3 – Залежність залишкової концентрації нафти у прісній воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6)**

**від дози коагулянту сульфату алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації бентоніту: (мг/дм<sup>3</sup>)**

Подібні закономірності характерні і для солоної води (рис. 4). Так, в разі сумісного використання сульфату алюмінію (D=10 мг/дм<sup>3</sup>) та бентоніту (C=50 мг/дм<sup>3</sup>) для очищення морської води залишковий вміст нафти знижується з 1,68 мг/дм<sup>3</sup> (без додавання бентоніту) до 1,67 мг/дм<sup>3</sup>, а при підвищенні концентрації бентоніту до 100 мг/дм<sup>3</sup> концентрація нафти у воді зменшується до 0,48 мг/дм<sup>3</sup>. Зі збільшенням дози сульфату алюмінію до 50 мг/дм<sup>3</sup> спостерігається аналогічний, як і в разі очищення прісної води, позитивний вплив бентоніту. За такої дози сульфату алюмінію залишковий вміст нафти у воді становить за відсутності бентоніту 0,54 мг/дм<sup>3</sup>, 0,51 мг/дм<sup>3</sup> при дозі бентоніту 50 мг/дм<sup>3</sup> та 0,34 мг/дм<sup>3</sup> при дозі бентоніту 100 мг/дм<sup>3</sup>. Ступінь очищення води від нафти складає відповідно 99,46 %, 99,49 %, 99,66 %.

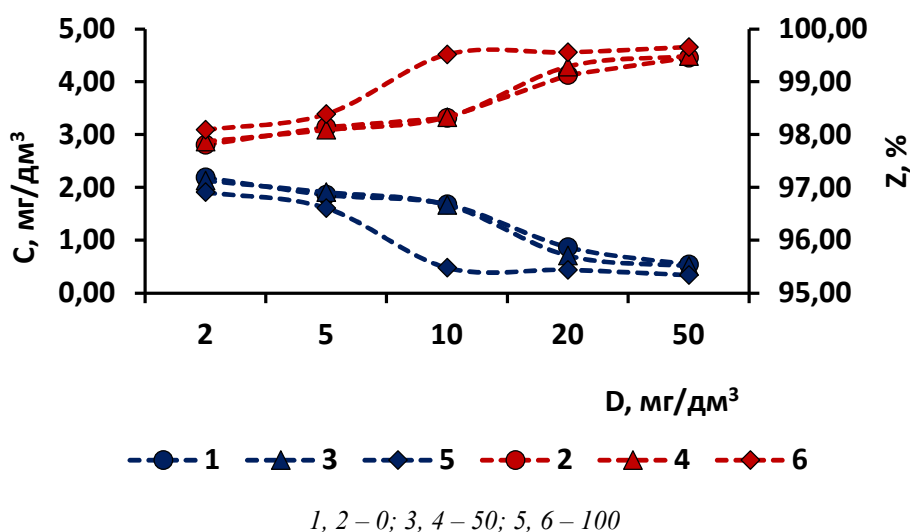


Рис. 4 – Залежність залишкової концентрації нафти у морській воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>, [NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту сульфату алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації бентоніту (мг/дм<sup>3</sup>)

Імовірно, нерозчинна нафта досягає поверхні сорбента і сорбується на його поверхні. При цьому відбувається укрупнення нерозчинних частинок, що сприяє додатковому очищенню емульсії.

Проте, результати, представлені на рисунках 5–6, вказують на те, що не завжди додавання сорбентів, зокрема бентоніту, є раціональним. Так, гідроксид алюмінію показує найкращі результати по очищенню води від нафти у порівнянні з іншими алюмінієвими коагулянтами (рис. 1, 2), а додавання бентоніту не підвищує ефект.

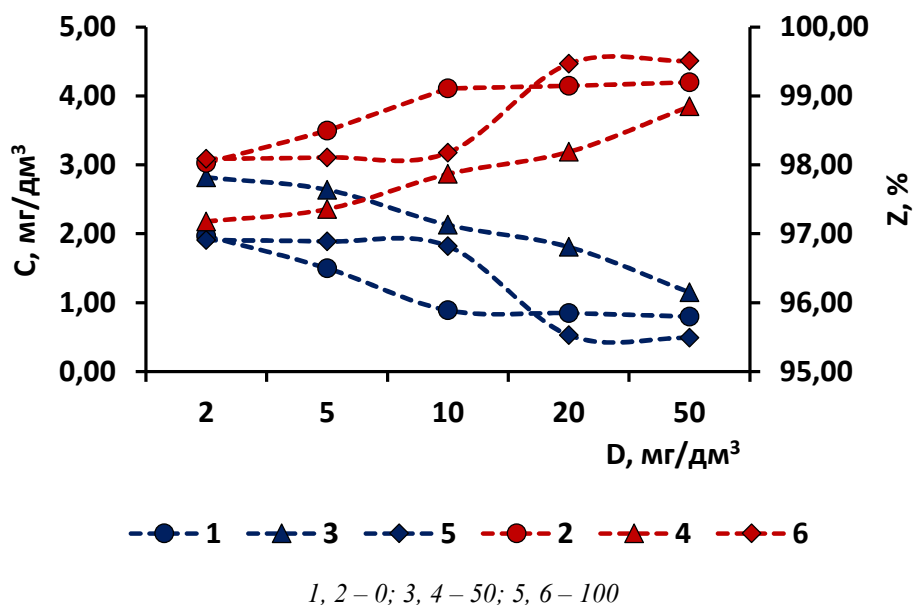


Рис. 5 – Залежність залишкової концентрації нафти у прісній воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту гідроксиду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації бентоніту (мг/дм<sup>3</sup>)

Навіть при концентрації коагулянту 50 мг/дм<sup>3</sup> додавання бентоніту в межах 100 мг/дм<sup>3</sup> супроводжується зниженням залишкової концентрації нафти в прісній воді з 0,80 мг/дм<sup>3</sup> (за відсутності бентоніту) до 0,49 мг/дм<sup>3</sup>. А в разі очищення мінералізованої води ефект видалення нафти з емульсії є від'ємним (рис. 6).

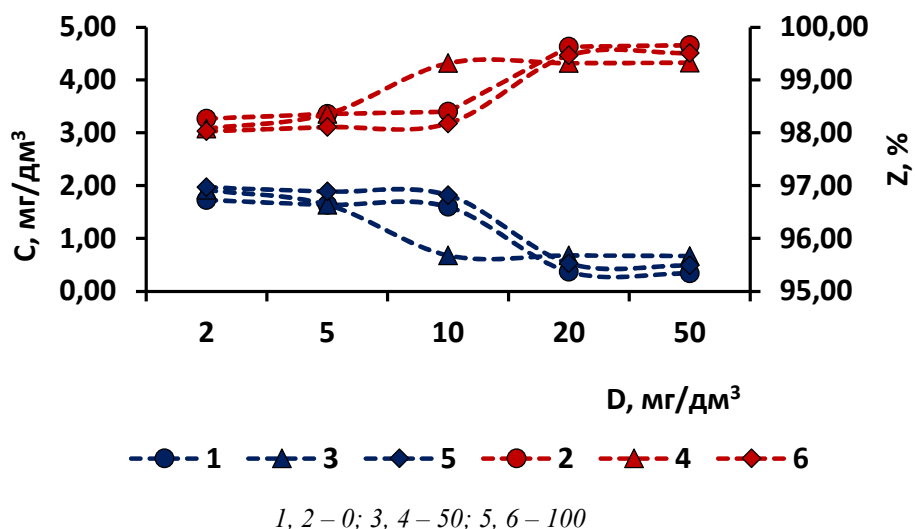


Рис. 6 – Залежність залишкової концентрації нафти у морській воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>, [NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту гідроксиду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації бентоніту (мг/дм<sup>3</sup>)

В разі використання гідроксохлориду алюмінію в якості коагулянту при комбінованому застосуванні з бентонітом при очищенні прісної води ефект відчутний, починаючи з дози коагулянту 20 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 7, 8).

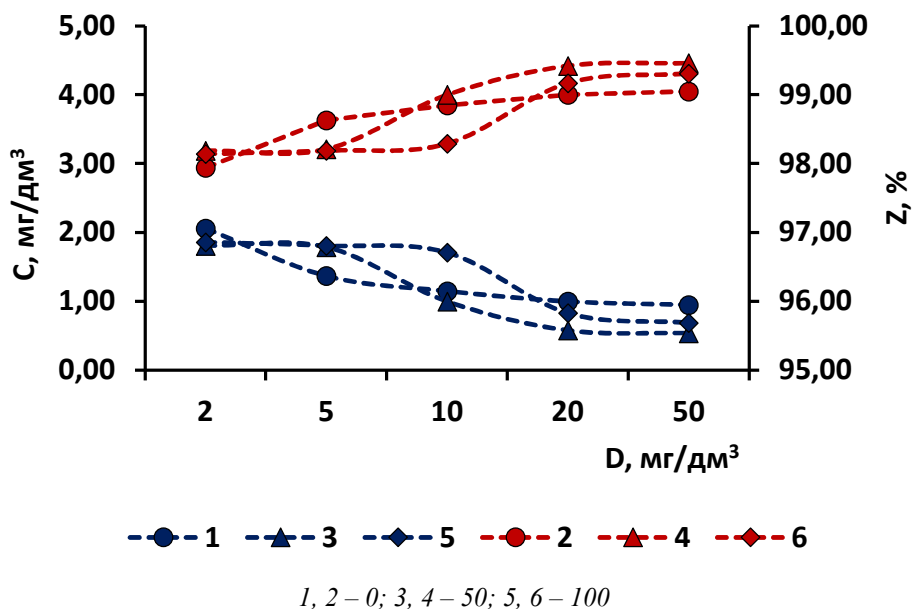
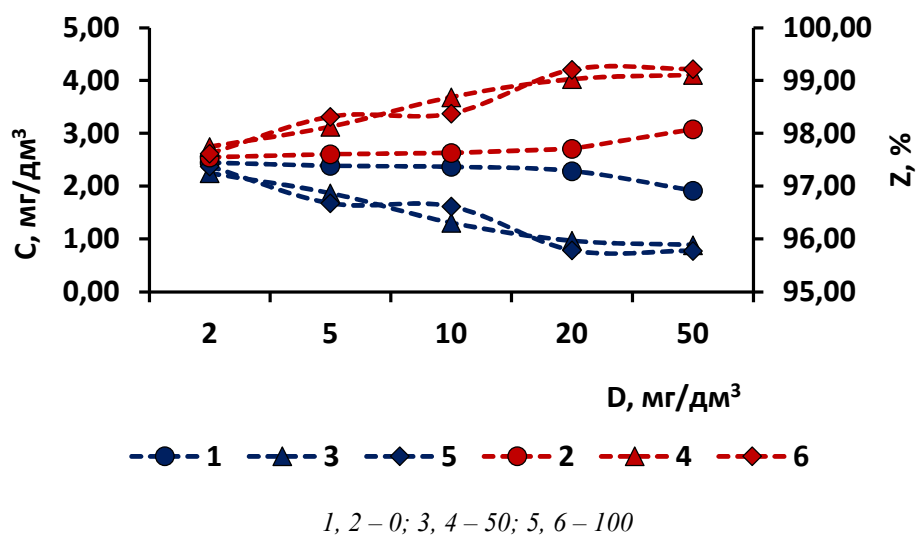


Рис. 7 – Залежність залишкової концентрації нафти у прісній воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту гідроксохлориду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації бентоніту (мг/дм<sup>3</sup>)



**Рис. 8 – Залежність залишкової концентрації нафти у морській воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>, [NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту гідроксохлориду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації бентоніту (мг/дм<sup>3</sup>)**

Так, при концентрації гідроксохлориду алюмінію 20 мг/дм<sup>3</sup> додавання бентоніту в дозі 50 мг/дм<sup>3</sup> знижує залишковий вміст нафти з 1,00 мг/дм<sup>3</sup> до 0,58 мг/дм<sup>3</sup>, а при дозі бентоніту 100 мг/дм<sup>3</sup> вміст нафти знижується до 0,83 мг/дм<sup>3</sup>. Відповідно, при дозі коагулянту 50 мг/дм<sup>3</sup> залишковий вміст нафти у воді знижується з 0,95 мг/дм<sup>3</sup> до 0,54 мг/дм<sup>3</sup> та 0,69 мг/дм<sup>3</sup>. В морській воді гідроксохлорид алюмінію демонструє найменші показники у порівнянні з сульфатом та гідроксидом алюмінію (рис. 2). Проте, одночасне застосування коагулянту з бентонітом сприяє суттєвому підвищенню ефективності очищення морської води від нафти (рис. 8) навіть вже за малих (5 мг/дм<sup>3</sup>) концентрацій коагулянту. Слід зауважити, що доза бентоніту 50 мг/дм<sup>3</sup> або 100 мг/дм<sup>3</sup> суттєво не впливає на глибину очищення води. Значення залишкових концентрацій нафти у воді за різних концентрацій бентоніту є практично збіжними.

Якщо порівнювати ефективність очищення прісної води від нафти з допомогою різних коагулянтів та бентоніту (рис. 3, 5, 7), то найбільш ефективним залишається гідроксид алюмінію як в присутності бентоніту, так і за його відсутності. Так, за відсутності бентоніту при максимальній концентрації коагулянту (50 мг/дм<sup>3</sup>) залишковий вміст нафти для сульфату алюмінію, гідроксохлориду алюмінію, гідроксиду алюмінію у прісній воді становить відповідно 1,41 мг/дм<sup>3</sup>, 0,95 мг/дм<sup>3</sup> та 0,80 мг/дм<sup>3</sup>. Із застосуванням бентоніту в концентрації 50 мг/дм<sup>3</sup> при тій же дозі коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) відповідні показники складають 0,51 мг/дм<sup>3</sup>, 0,54 мг/дм<sup>3</sup> та 1,15 мг/дм<sup>3</sup>. А при подальшому збільшенні дози бентоніту до 100 мг/дм<sup>3</sup> при тій же дозі коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) залишкові вмісти нафти відповідають значенням 0,58 мг/дм<sup>3</sup>, 0,69 мг/дм<sup>3</sup> та 0,49 мг/дм<sup>3</sup>.

В разі очищення морської води від нафти з допомогою коагулянтів та бентоніту закономірності вказують на підвищення ефективності очищення води від нафти при застосуванні бентоніту (рис. 4, 6, 8), особливо для таких коагулянтів, як: сульфат та гідроксохлорид алюмінію. Так, при максимальній концентрації коагулянту (50 мг/дм<sup>3</sup>) без додавання бентоніту залишковий вміст нафти для сульфату алюмінію, гідроксохлориду алюмінію, гідроксиду алюмінію у морській воді становить відповідно 0,54 мг/дм<sup>3</sup>, 1,92 мг/дм<sup>3</sup> та 0,34 мг/дм<sup>3</sup>. При застосуванні бентоніту в концентрації 50 мг/дм<sup>3</sup> при тих же дозах коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) відповідні показники складають 0,51 мг/дм<sup>3</sup>, 0,89 мг/дм<sup>3</sup> та 0,67 мг/дм<sup>3</sup>. А при збільшенні дози бентоніту до 100 мг/дм<sup>3</sup> при тих же дозах коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) залишкові концентрації нафти відповідають значенням 0,34 мг/дм<sup>3</sup>, 0,78 мг/дм<sup>3</sup> та 0,49 мг/дм<sup>3</sup>.

Крім бентоніту, в роботі в якості сорбенту при коагулюванні використовували активоване вугілля в концентраціях 50 мг/дм<sup>3</sup> та 100 мг/дм<sup>3</sup>. Результати щодо ефективності видалення нафти з модельних емульсій різної мінералізації при комбінованому використанні алюмінієвих коагулянтів та активованого вугілля наведено на рисунках 9–14.



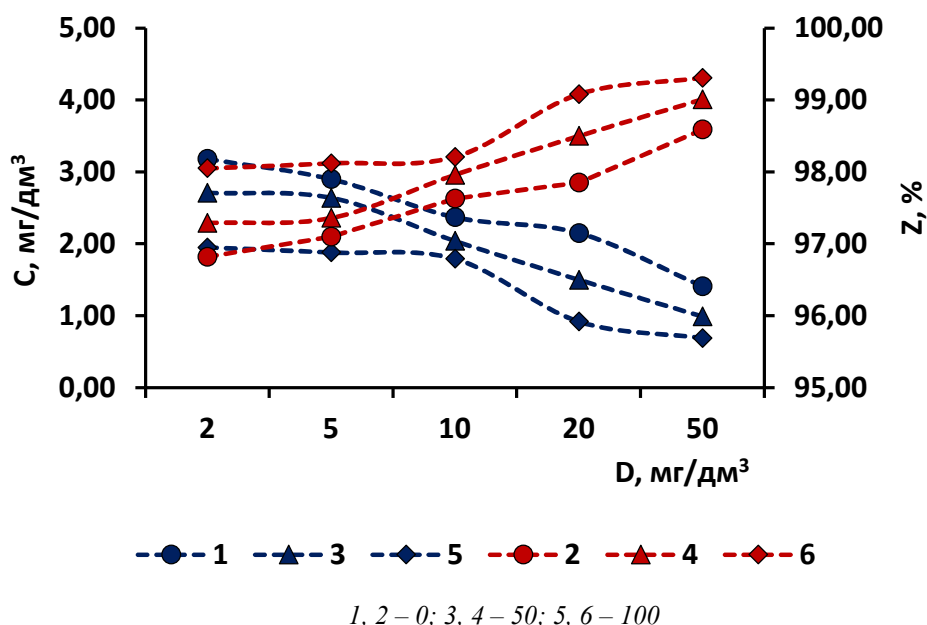


Рис. 9 – Залежність залишкової концентрації нафти у прісній воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту сульфату алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації активованого вугілля (мг/дм<sup>3</sup>)

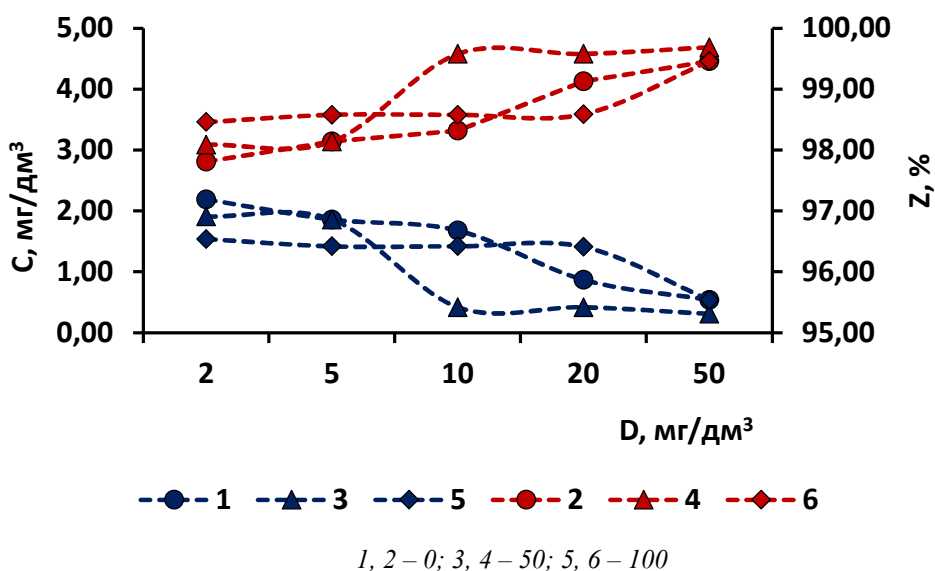


Рис. 10 – Залежність залишкової концентрації нафти у морській воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>, [NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту сульфату алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації активованого вугілля (мг/дм<sup>3</sup>)

Як видно з рисунків 9–10, при комбінованій обробці емульсії коагулянтм сульфатом алюмінію та активованим вугіллям спостерігається стабільне зменшення концентрації нафти при збільшенні дози коагулянту від 2 мг/дм<sup>3</sup> до 50 мг/дм<sup>3</sup> та концентрації активованого вугілля від 50 мг/дм<sup>3</sup> до 100 мг/дм<sup>3</sup>. Для прісної води характерне більш суттєве зменшення залишкової концентрації нафти із застосуванням даного сорбента у порівнянні з солоною водою. Так, наприклад, при сумісній обробці прісноводної емульсії сульфатом алюмінію (D=50 мг/дм<sup>3</sup>) та активованим вугіллям залишковий вміст нафти у воді знижується з 1,41 мг/дм<sup>3</sup> без застосування сорбента до 0,99 мг/дм<sup>3</sup> при дозі сорбенту 50 мг/дм<sup>3</sup>, а при підвищенні концентрації сорбенту до 100 мг/дм<sup>3</sup> вміст нафти у воді зменшується до 0,69 мг/дм<sup>3</sup>. Відповідно, ступінь очищення води від нафти становить 98,59 %, 99,01 %, 99,31 %.

Для солоної води (рис. 10) характерні подібні закономірності, але зменшення залишкової концентрації нафти не таке істотне, як у випадку обробки прісноводних розчинів. Наприклад, при комбінованому використанні сульфату алюмінію (D=50 мг/дм<sup>3</sup>) та активованого вугілля в процесі очищення морської води залишкова концентрація нафти знижується з 0,54 мг/дм<sup>3</sup> за відсутності сорбента до 0,31 мг/дм<sup>3</sup> при дозі сорбенту 50 мг/дм<sup>3</sup>, а при підвищенні концентрації активованого вугілля до 100 мг/дм<sup>3</sup> концентрація нафти у воді зменшується до 0,54 мг/дм<sup>3</sup>. Це відповідає наступним ступеням очищення води від нафти: 99,46 %, 99,69 %, 99,46 %.

Як і у випадку сумісного використання гідроксиду алюмінію та бентоніту (рис. 5, 6) в процесі видалення нафти з емульсії, комплексне застосування гідроксиду алюмінію та активованого вугілля є також неефективним, а, точніше, носить від'ємний характер (рис. 11, 12). Як наводилося вище (рис. 1, 2), гідроксид алюмінію, у порівнянні з іншими алюмінієвими коагулянтами, демонструє найкращі результати щодо вилучення нафти з водних розчинів, а додавання активованого вугілля нівелює цей ефект. Так, при концентрації коагулянту 50 мг/дм<sup>3</sup> додавання активованого вугілля в дозах 50 мг/дм<sup>3</sup> та 100 мг/дм<sup>3</sup> призводить до зростання вмісту нафти у воді. Зокрема, для прісної води залишковий вміст нафти при дозі коагулянту 50 мг/дм<sup>3</sup> зростає з 0,80 мг/дм<sup>3</sup> за відсутності сорбенту до 1,17 мг/дм<sup>3</sup> при дозі сорбенту 50 мг/дм<sup>3</sup>, а при підвищенні дози активованого вугілля до 100 мг/дм<sup>3</sup> вміст нафти у воді залишається теж високим 1,13 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 11).

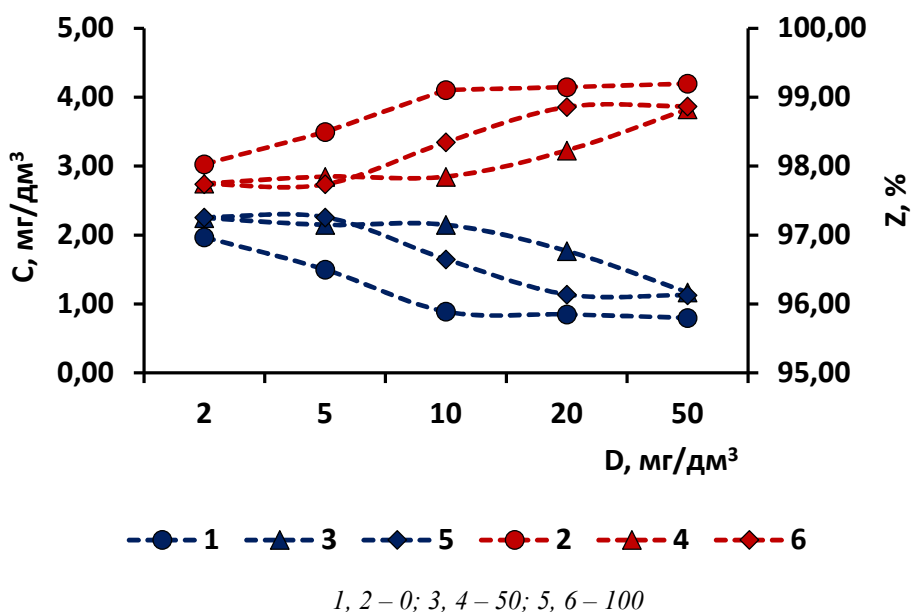


Рис. 11 – Залежність залишкової концентрації нафти у прісній воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6)

від дози коагулянту гідроксиду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації активованого вугілля (мг/дм<sup>3</sup>)

В разі очищення солоної води (рис. 12) теж відзначається від'ємний ефект. При всіх дозах гідроксиду алюмінію в діапазоні 2–50 мг/дм<sup>3</sup> його окреме застосування значно краще, ніж при комбінованому застосуванні з сорбентом-замутнювачем.

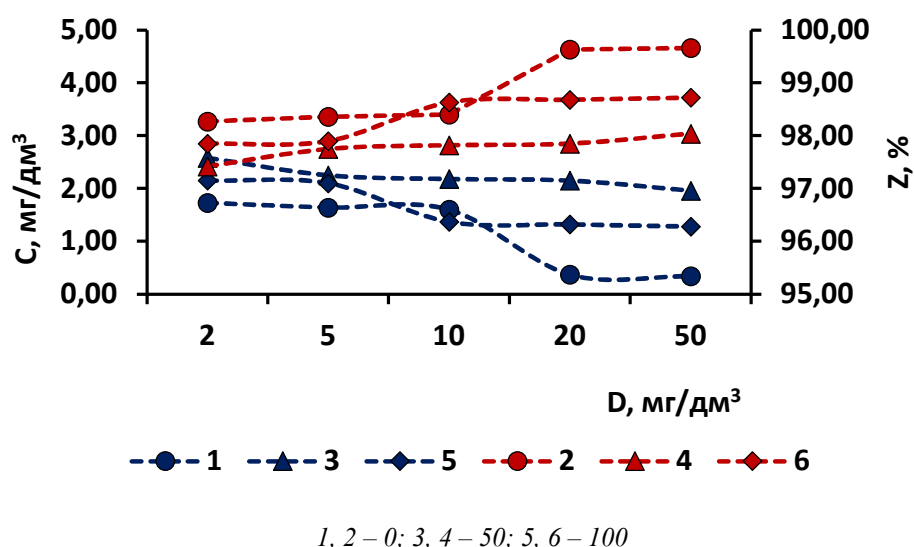


Рис. 12 – Залежність залишкової концентрації нафти у морській воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>, [NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6) від дози коагулянту гідроксиду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації активованого вугілля (мг/дм<sup>3</sup>)

В разі використання гідроксохлориду алюмінію в якості коагулянту при комплексному застосуванні з активованим вугіллям ефективність процесу очищення нафтовмісних вод залежить від мінералізації води (рис. 13, 14).

Так, для маломінералізованих емульсій позитивний ефект від комбінованого використання гідроксохлориду алюмінію та активованого вугілля стабільно спостерігається при концентрації коагулянту 50 мг/дм<sup>3</sup> та дозах сорбента 50 мг/дм<sup>3</sup> та 100 мг/дм<sup>3</sup>. За даних умов залишковий вміст нафти знижується з 0,95 мг/дм<sup>3</sup> за відсутності сорбента до 0,42 мг/дм<sup>3</sup> при дозі сорбента 50 мг/дм<sup>3</sup>, а при дозі сорбента 100 мг/дм<sup>3</sup> вміст нафти знижується до 0,16 мг/дм<sup>3</sup>. За менших концентрацій коагулянту додавання сорбенту в різних дозах лише погіршує показники очищення води.

В мінералізованій воді гідроксохлорид алюмінію є найменш ефективним, ніж сульфат та гідроксид алюмінію (рис. 2). Але, комплексне використання його з активованим вугіллям істотно підвищує ефективність видалення нафти з мінералізованої емульсії (рис. 14) навіть вже за малих (5 мг/дм<sup>3</sup>) концентрацій коагулянту. Збільшення дози сорбента з 50 мг/дм<sup>3</sup> до 100 мг/дм<sup>3</sup> суттєво не впливає на якість очищення води. Залишковий вміст нафти у воді за різних доз активованого вугілля практично однаковий.

Якщо порівнювати ефективність очищення маломінералізованих вод від нафти з допомогою алюмінієвих коагулянтів та активованого вугілля (рис. 9, 11, 13), то найбільший комбінований ефект проявляється при одночасному використанні сульфату алюмінію та активованого вугілля. В даному випадку ефект є найбільш стабільний та лінійний. Так, за відсутності сорбента при максимальній концентрації коагулянту (50 мг/дм<sup>3</sup>) залишкова концентрація нафти для сульфату алюмінію, гідроксохлориду алюмінію, гідроксиду алюмінію у прісній воді становить відповідно 1,41 мг/дм<sup>3</sup>, 0,95 мг/дм<sup>3</sup> та 0,80 мг/дм<sup>3</sup>. При додаванні активованого вугілля в концентрації 50 мг/дм<sup>3</sup> при тій же дозі коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) відповідні показники складають 0,99 мг/дм<sup>3</sup>, 0,42 мг/дм<sup>3</sup> та 1,17 мг/дм<sup>3</sup>. А при подальшому збільшенні дози активованого вугілля до 100 мг/дм<sup>3</sup> при тій же дозі коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) залишкові концентрації нафти відповідають значенням 0,69 мг/дм<sup>3</sup>, 0,16 мг/дм<sup>3</sup> та 1,13 мг/дм<sup>3</sup>. Висока ефективність очищення прісної води із комбінованим застосуванням гідроксохлориду алюмінію та сорбенту проявляється лише за великих концентрацій реагентів. За менших доз гідроксохлориду алюмінію додавання активованого вугілля є зайвим.

В разі очищення мінералізованої води від нафти з допомогою коагулянтів та активованого вугілля (рис. 10, 12, 14) результати досліджень демонструють стабільне лінійне підвищення ефективності очищення води від нафти при комплексному застосуванні активованого вугілля з гідроксохлоридом алюмінію.

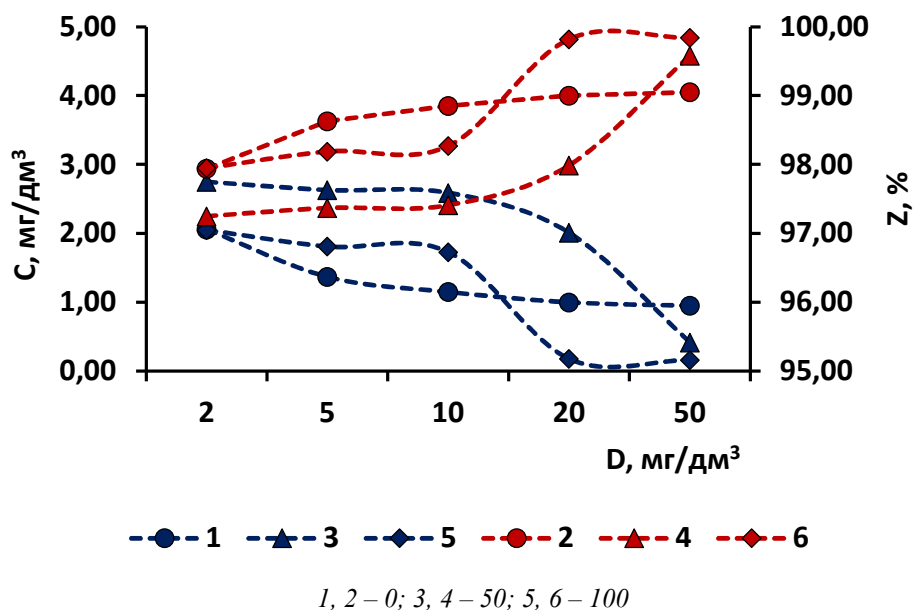


Рис. 13 – Залежність залишкової концентрації нафти у прісній воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6)

від дози коагулянту гідроксохлориду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації активованого вугілля (мг/дм<sup>3</sup>)

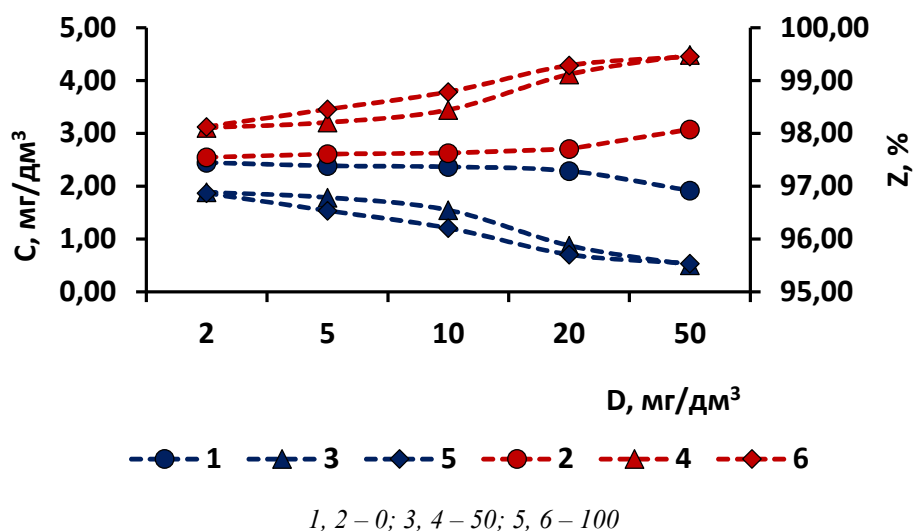


Рис. 14 – Залежність залишкової концентрації нафти у морській воді (1, 3, 5) ([нафти]=100 мг/дм<sup>3</sup>, [NaCl]=30 г/дм<sup>3</sup>) та ступеня видалення нафти з води (2, 4, 6)

від дози коагулянту гідроксохлориду алюмінію (D=0, 2, 5, 10, 20, 50 мг/дм<sup>3</sup> у розрахунку по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та концентрації активованого вугілля (мг/дм<sup>3</sup>)

Для сульфату алюмінію та гідроксиду алюмінію сумісне застосування коагулянтів та активованого вугілля недоцільне. Так, при максимальній дозі коагулянту (50 мг/дм<sup>3</sup>) без додавання активованого вугілля залишкова концентрація нафти для гідроксохлориду алюмінію, сульфату алюмінію, гідроксиду алюмінію у морській воді

становить відповідно 1,92 мг/дм<sup>3</sup>, 0,54 мг/дм<sup>3</sup> та 0,34 мг/дм<sup>3</sup>. При застосуванні активованого вугілля в концентрації 50 мг/дм<sup>3</sup> при тих же дозах коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) відповідні показники складають 0,51 мг/дм<sup>3</sup>, 0,31 мг/дм<sup>3</sup> та 1,96 мг/дм<sup>3</sup>. А при збільшенні дози активованого вугілля до 100 мг/дм<sup>3</sup> при тих же дозах коагулянтів (50 мг/дм<sup>3</sup>) залишковий вміст нафти відповідає значенням 0,54 мг/дм<sup>3</sup>, 0,54 мг/дм<sup>3</sup> та 1,28 мг/дм<sup>3</sup>.

В значній мірі неоднозначність представлених результатів можна пояснити неоднорідністю емульсій. Проте однозначно можна стверджувати, що застосування алюмінієвих коагулянтів в процесах видалення нафти з води різної мінералізації є доцільним та ефективним.

**Висновки.** У результаті проведених досліджень щодо визначення ефективності застосування алюмінієвих коагулянтів окремо або у комбінації з сорбентами в процесах очищення нафтовмісних вод, показано, сульфат алюмінію, гідроксид алюмінію та гідроксохлорид алюмінію в дозах 2–50 мг/дм<sup>3</sup> забезпечують високий ступінь вилучення нафти з емульсій. Ступінь очищення води досягає 97–99 %.

Встановлено, що ефективність вилучення нафти з води з допомогою алюмінієвих коагулянтів суттєво залежить від хімічного складу коагулянту та вихідної мінералізації води. Найбільшу ефективність щодо видалення нафти з води має гідроксид алюмінію, який забезпечує максимальне зниження концентрації нафти як в прісній, так і в мінералізованій воді.

Комбіноване використання алюмінієвих коагулянтів та сорбентів типу бентоніту та активованого вугілля відзначається плинністю ефективності, яка залежить від типу коагулянту та сорбенту, їх концентрацій та мінералізації вихідної води.

**Перспективи подальших досліджень.** В подальшому авторами планується проведення досліджень процесів видалення нафти з води електрохімічними методами, такими, як: електрокоагуляція та електрофлотация, із застосуванням залізних та алюмінієвих електродів.

#### **Список використаної літератури**

1. Вознюк М.Б., Шаблій Т.О. Забезпечення екологічної безпеки експлуатації водного транспорту // Матеріали ХХІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (20–21 травня 2021 р., м. Київ), Київ, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, 2021, С. 106–110.
2. Водний Кодекс України. Введений в дію постановою Верховної Ради України від 06.06.95 № 214-95-ВР. Відомості Верховної Ради України від 13.06.1995 – 1995 р., №24, стаття 189.
3. Про затвердження Правил охорони внутрішніх морських вод і територіального моря від забруднення та засмічення [Текст]: Постанова Кабінету Міністрів України Правила, Нормативи, Вимоги від 29.02.1996 р. № 269.
4. Про затвердження Правил запобігання забрудненню із суден внутрішніх водних шляхів України [Текст]: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 13.08.2007 р. №694. Офіційний вісник України 29.10.2007 – 2007 р., №79, стор. 187, стаття 2965.
5. Резолюція МЕРС.107(49). Пересмотренные руководящие и технические требования по оборудованию для предотвращения загрязнения из льял машинных помещений судов (Принятие от 18.07.2003 г.). [Електронний ресурс].
6. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення [Текст]: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 02.05.2022 №721.
7. Державні санітарні правила і норми скидання з суден стічних, нафтоутримуючих, баластних вод і сміття у водоймища ДСанПІН 199-97.
8. Office of Enforcement and Compliance Assurance, EPA. A Guide for Ship Scrappers: Tips for Regulatory Compliance. Washington, D.C: US Environmental Protection Agency; 2000. pp. 4.1–4.42.
9. Справочник судового механика по теплотехнике / И.Ф. Кошелев, А.П. Пимошенко, Г.А. Попов, В.Я. Тарасов; под ред. А. П. Пимошенко. – Л.: Судостроение, 1987. – 477 с.
10. Шаблій Т.О., Радовенчик В.М., Гомеля М.Д. Застосування нових реагентів і технологій в промисловому водоспоживанні. К.: Інфодрук, 2013. – 327 с.
11. Гомеля М.Д., Радовенчик В.М., Шаблій Т.О. Сучасні методи кондиціонування та очистки води в промисловості. – К.: Графіка, 2007. – 193 с.
12. Трус І.М. Маловідходні технології демінералізації води: монографія. – К.: Кондор-Видавництво, 2016. – 252 с.
13. Грабітченко В.М. Комплексна переробка високомінералізованих стоків в екологічно безпеченому промисловому водоспоживанні. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – 2017 р., 234 с.
14. Nutiu E. Waste water treatment using a new type of coagulant // Procedia technology. – 2015. – №19. – Р. 479–482.
15. Шкавро З.М. Теорія та практика використання коагулянтів у технології водоочищення // Наукові записки НаУКМА. Хімічні науки і технології. – 2014. – Т.157. – С. 65–78.

16. Iqbala A., Zahra N. Coagulation efficiency comparison of natural and its blended coagulant with aluminium water treatment // *Desalination and Water Treatment*. – 2018. – №109. P. 188–192.
  17. Ярошенко К.К., Шабанов М.В. Ефективність коагуляційного очищення водних стоків керамічного виробництва // *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*. – К.: ІГНС, 2011. – №19. – С. 95–101.
  18. Шевченко Т.О., Пушкалова М.М. Вибір типу алюмомісного коагулянту при підготовці питної води. // *Тези доповідей та інформаційні матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Вода. Екологія. Суспільство» (1–2 жовтня 2020 р., м. Харків), Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – С. 109–112.*
  19. Janna H. Effectiveness of using natural materials as a coagulant for reduction of water turbidity in water treatment // *World Journal of Engineering and Technology*. – 2016. – №4. – P. 505–516.
  20. Рященко Б.П. Анализ процесса глубокой очистки льяльных вод судов с учетом кинетической теории гетерокоагуляции ДЛФО // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2011. – №28. – С. 43–53.
  21. Almojjly A., Johnson D., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. Removal of Oil from Oil-Water Emulsion by Hybrid Coagulation/Sand Filter as Pre-Treatment // *Journal of Water Process Engineering*. – 2018. – №26. – P. 17–27.
  22. Parhamfar M., Bayat Z., Parhamfar M. Hassanshahian M., Hosseini S. S. Investigation of Oil-in-Water Emulsions Treatment by Crude Oil Degrading Bacteria and Coagulation with Cationic Polyacrylamide // *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*. – 2018. – №9(2). – P. 1–7.
  23. Кириченко О.В.; Мальований М.С., Полюжин І.П. Оцінка метрологічних характеристик результатів визначення нафтопродуктів у воді методом екстракційної інфрачервоної фотометрії // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2009. – №19(12). – С. 324–329.
  24. Хохотва О.П. Розробка комплексу технічних заходів по захисту водойм від забруднення нафтопродуктами. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – 2004 р., 135 с.
- 

*Marta Vozniuk, Tetiana Shabliy*

#### **EFFICIENCY OF WATER PURIFICATION FROM OIL WITH ALUMINUM COAGULANTS**

*In this work, the processes of reagent purification of aqueous emulsions from oil using aluminum coagulants, such as: aluminum sulfate, aluminum hydroxide, and aluminum hydroxochloride, were investigated. In emulsion cleaning processes, coagulants were used separately, as well as in the presence of sorbents: bentonite or activated carbon.*

*The results of the conducted studies demonstrate that aluminum sulfate, aluminum hydroxide, and aluminum hydroxochloride in doses of 2–50 mg/dm<sup>3</sup> provide a high degree of oil extraction from emulsions. The degree of water purification reaches 97–99 %.*

*It was established that the efficiency of oil extraction from water with the help of aluminum coagulants depends significantly on the chemical composition of the coagulant and the original mineralization of the water. Aluminum hydroxide has the greatest efficiency in removing oil from water, which ensures the maximum reduction of oil concentration in both fresh and mineralized water.*

*The combined use of aluminum coagulants and sorbents such as bentonite and activated carbon is characterized by fluctuating efficiency, which depends on the type of coagulant and sorbent, their concentrations, and the mineralization of the source water.*

*To a large extent, the ambiguity of the presented results can be explained by the heterogeneity of the emulsions. However, it can be unequivocally stated that the use of aluminum coagulants in the processes of removing oil from water of different mineralization is expedient and effective.*

**Key words:** *oil-containing waters, lyal waters, aluminum coagulant, sorbent, emulsion cleaning.*

#### **Referenses**

1. Vozniuk M.B., Shabliy T.O. (2020). “Zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky ekspluatatsii vodnoho transportu”, *Handbook of the XXI International Science Conference «Ecology. Human. Society» (21–22 May, 2020 Kyiv, Ukraine)/D. Benatov. — K.: NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2020. pp. 106–110. (In Ukrainian).*
2. Vodnyi Kodeks Ukrainy. Vvedenyi v diiu postanovoiu Verkhovnoi Rady Ukrainy vid 06.06. 95 N 214-95-VR. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy vid 13.06.1995 – 1995 r., N 24, stattia 189. (In Ukrainian).
3. Pro zatverdzhennia Pravyl okhorony vnutrishnikh morskykh vod i terytorialnoho moria vid zabrudnennia ta zasmichennia [Tekst]: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pravyla, Normatyvy, Vymohy vid 29.02.1996, N 269. (In Ukrainian).

4. Pro zatverdzhennia Pravyl zapobihannia zabrudnenniu iz suden vnutrishnikh vodnykh shliakhiv Ukrainy [Tekst]: Nakaz Ministerstva transportu ta zviazku Ukrainy vid 13.08.2007 r. N 694. Ofitsiinyi visnyk Ukrainy 29.10.2007 – 2007, N 79, stor. 187, stattia 2965. (In Ukrainian).
5. Rezoliutsiya MEPC.107(49). Peresmotrennye rukovodstvo y tekhnicheskyye trebovaniya po oborudovaniyu dlia predotvrashcheniya zahriazneniya yz lial mashynnykh pomeshcheniy sudov (Pryniatyie ot 18.07.2003). [Elektronnyi resurs]. (In Russian).
6. Pro zatverdzhennia Hihienichnykh normatyviv yakosti vody vodnykh ob'ektiv dlia zadovolennia pytnykh, hospodarsko-pobutovykh ta inshykh potreb naselennia [Tekst]: Nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy vid 02.05.2022, N 721. (In Ukrainian).
7. Derzhavni sanitarni pravyla i normy skydannia z suden stichnykh, naftoutrymuyuchykh, balastnykh vod i smittia u vodoimyshcha DSanPIN 199-97. (In Ukrainian).
8. Office of Enforcement and Compliance Assurance, EPA. A Guide for Ship Scrappers: Tips for Regulatory Compliance. Washington, D.C: US Environmental Protection Agency; 2000. pp. 4.1–4.42.
9. Spravochnyk sudovoho mekhanika po teplotekhnike / Y.F. Koshelev, A.P. Pymoshenko, H.A. Popov, V.Ya. Tarasov; pod red. A. P. Pymoshenko. – L.: Sudostroenie, 1987. – 477 p. (In Russian).
10. Shablii T.O., Radovenchuk V.M., Gomelya M.D. “Zastosuvannia novykh reagentiv i tekhnolohii v promyslovomu vodospozhyvanni”. K.: Infodruk, 2013. – 327 p. (In Ukrainian).
11. Gomelya M.D., Radovenchuk V.M., Shablii T.O. “Suchasni metody kondytsionuvannia ta ochystky vody v promyslovosti”. – K.: Hrafika, 2007. – 193 p. (In Ukrainian).
12. Trus I.M. “Malovidkhodni tekhnolohii demineralizatsii vody: monohrafiia”. – K.: Kondor-Vydavnytstvo, 2016. – 252 p. (In Ukrainian).
13. Hrabichenko V. “Kompleksna pererobka vysokomineralizovanykh stokiv v ekolohichno bezpechenomu promyslovomu vodospozhyvanni”. Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk. – 2017, 234 p. (In Ukrainian).
14. Nutiu E. (2015). “Waste water treatment using a new type of coagulant”, *Procedia technology*, 19. pp. 479–482.
15. Shkavro Z.M. (2014). “Teoriia ta praktyka vykorystannia koahuliantiv u tekhnolohii vodoochyshtchennia”, *Naukovi zapysky NaUKMA. Khimichni nauky i tekhnolohii*, 157. pp. 65–78. (In Ukrainian).
16. Iqbala A., Zahra N. (2018). “Coagulation efficiency comparison of natural and its blended coagulant with aluminium water treatment”, *Desalination and Water Treatment*, 109. pp. 188–192.
17. Yaroshenko K.K., Shabanov M.V. (2011). “Efektyvnist koahuliantynoho ochyshtchennia vodnykh stokiv keramichnoho vyrobnytstva”, Zbirnyk naukovykh prats Instytutu heokhimii navkolyshnoho seredovyscha. – K.: IHNS, 19. pp. 95–101. (In Ukrainian).
18. Shevchenko T.O., Pushkalova M.M. (2020). “Vybir typu aliumovmisnoho koahuliantu pry pidhotovtsi pytnoi vody”, *V International Scientific and Technical Conference «WATER. ECOLOGY. SOCIETY»* (1–2 october 2020, Kharkiv, Ukraine), Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2020. pp. 109–112. (In Ukrainian).
19. Janna H. (2016). “Effectiveness of using natural materials as a coagulant for reduction of water turbidity in water treatment”, *World Journal of Engineering and Technology*, 4. pp. 505–516.
20. Riashchenko B.P. (2011). “Analyz protsessa hlubokoi ochystky lialnykh vod sudov s uchetom kynetycheskoi teoryi heterokoahulianty DLFO”, *Sudovye enerhetycheskiye ustanovky: nauch.-tekhn. sb.*, 28. pp. 43–53. (In Russian).
21. Almojjly A., Johnson D., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. (2018). “Removal of Oil from Oil-Water Emulsion by Hybrid Coagulation/Sand Filter as Pre-Treatment”, *Journal of Water Process Engineering*, 26. pp. 17–27.
22. Parhamfar M., Bayat Z., Parhamfar M. Hassanshahian M., Hosseini S.S. (2018). “Investigation of Oil-in-Water Emulsions Treatment by Crude Oil Degrading Bacteria and Coagulation with Cationic Polyacrylamide”, *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 9(2). pp. 1–7.
23. Kyrychenko O.V.; Malovanyi M.S., Poliuzhyn I.P. (2009). “Otsinka metrolohichnykh kharakterystyk rezultatyv vyznachennia naftoproduktiv u vodi metodom ekstraktsiinoi infrachervonoj fotometrii”, *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 19(12). pp. 324–329. (In Ukrainian).
24. Khokhotva O.P. “Rozrobka kompleksu tekhnichnykh zakhodiv po zakhystu vodoim vid zabrudnennia naftoproduktamy”. Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk. – 2004, 135 p. (In Ukrainian).