УДК 66.081.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.15

М. С. КУЧУК
аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0007-7969-316X

О. Р. БЄЛЯНСЬКА
кандидат технічних наук з технології неорганічних речовин, доцент,
викладач загальних природничих дисциплін
Кам'янське вище професійне училище
ORCID: 0000-0001-8026-8004

О. В. КРАВЧЕНКО
доктор технічних наук з технології неорганічних речовин, професор,
професор кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0006-8833-3441

О. І. ОНОПРІЄНКО
здобувач бакалаврського рівня
кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0007-5631-0218

Л. В. ВАЩЕНКО
завідувач лабораторії кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0006-6464-2784

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ЗАБАРВЛЕНИХ РОЗЧИНІВ ПРИ АКТИВУВАННІ ДИСПЕРГУВАННЯМ КИСЕНЬ-ВОДНЕВИХ ПРОЦЕСІВ ІЗ НАСТУПНОЮ АДСОРБЦІЄЮ

У статті досліджено вплив попередньої механічної обробки забарвленого розчину на ефективність адсорбційного очищення від органічних барвників, зокрема метилоранжу та брильянтового зеленого. Як адсорбенти використовували силікагель і активоване вугілля. Основною метою дослідження було встановлення ефективності різних режимів перемішування розчину перед адсорбцією та їх впливу на подальше знебарвлення. Для механічної обробки застосовували фрезерну та рамну мішалки з частотами обертання 30 і 60 об/хв. Проведено серію експериментів із вимірювання зміни кольоровості розчину протягом 80 хвилин після обробки та подальшого очищення. Встановлено, що попереднє перемішування суттєво підвищує ефективність адсорбції порівняно з необробленим зразком: при відсутності обробки кінцева забарвленість становила 45°, тоді як після фрезерного перемішування з частотою 60 об/хв – лише 15°, без утворення каламутності. Найбільш ефективним виявилось перемішування фрезерною мішалкою перед адсорбцією на силікагелі: забарвленість знижувалась до 10–15° за 80 хвилин. Навіть при 30 об/хв вона демонструвала ефективність до 20°. Рамна мішалка показала гірші результати (35–38°), проте забезпечувала стабільність, що важливо при роботі з активованим вугіллям. Застосування фрезерної мішалки з вугіллям призводило до утворення високодисперсної суспензії, яка ускладнює пробовідбір і подальший аналіз. Таким чином, визначено оптимальні режими попередньої механічної обробки: для силікагелю – фрезерна мішалка, 60 об/хв; для активованого вугілля – рамна мішалка, 60 об/хв. Установлено, що застосування адсорбційного доочищення після попередньої обробки дозволяє досягти значного зниження залишкової концентрації барвника. Адсорбційна ємність активованого вугілля після механічної активації та окиснення зростає в 1,3–1,6 раза залежно від типу барвника. Отримані результати мають високу практичну значущість для вдосконалення технологій очищення стічних вод, зокрема у галузях, що пов'язані з використанням органічних барвників – текстильній, шкіряній, целюлозно-паперовій та харчовій промисловості. Запропонована комбінація методів є енергоефективною, не потребує значної кількості хімічних реагентів, знижує обсяг утворення шламів і дозволяє адаптувати процес до існуючих очисних споруд.

Ключові слова: *диспергування, водний розчин, кисень-водневий процес, адсорбція, силікагель, активоване вугілля.*

M. S. KUCHUK
Postgraduate Student at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0007-7969-316X

O. R. BYELYANSKA
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Lecturer in General Natural Sciences
Kamianske Higher Vocational School
ORCID: 0000-0001-8026-8004

O. V. KRAVCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0006-8833-3441

O. I. ONOPRIIENKO
Bachelor's Degree Candidate at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0007-5631-0218

L. V. VASHCHENKO
Laboratory Head at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0006-6464-2784

STUDY OF THE TECHNOLOGY FOR COLORED SOLUTIONS PURIFICATION THROUGH DISPERSION-ACTIVATED OXYGEN-HYDROGEN PROCESSES FOLLOWED BY ADSORPTION

The article investigates the effect of preliminary mechanical treatment of a colored solution on the efficiency of adsorption purification from organic dyes, specifically methyl orange and brilliant green. Silica gel and activated carbon were used as adsorbents. The main aim of the study was to determine the effectiveness of different mixing modes prior to adsorption and their impact on subsequent decolorization. For mechanical treatment, milling and frame stirrers were used at rotation speeds of 30 and 60 rpm. A series of experiments was conducted to measure the color change of the solution over 80 minutes following treatment and subsequent purification. It was found that pre-mixing significantly increases adsorption efficiency compared to untreated samples: without treatment, the final color intensity was 45°, while after milling at 60 rpm, it decreased to only 15°, with no turbidity formation. The most effective approach was mixing with a milling stirrer before adsorption on silica gel: color intensity decreased to 10–15° after 80 minutes. Even at 30 rpm, it showed efficiency down to 20°. The frame stirrer showed worse results (35–38°) but provided better stability, which is important when working with activated carbon. Using a milling stirrer with carbon led to the formation of a fine suspension, complicating sampling and further analysis. Thus, optimal pre-treatment modes were identified: for silica gel – milling stirrer at 60 rpm; for activated carbon – frame stirrer at 60 rpm. It was established that applying adsorption post-treatment after preliminary mechanical activation allows a significant reduction in the residual dye concentration. The adsorption capacity of activated carbon after mechanical activation and oxidation increased by 1.3–1.6 times, depending on the dye type. The obtained results have high practical relevance for improving wastewater treatment technologies, particularly in industries using organic dyes – textile, leather, pulp and paper, and food industries. The proposed combination of methods is energy-efficient, requires minimal chemical reagents, reduces sludge formation, and can be integrated into existing treatment facilities. This ensures the economic feasibility of implementing the developed technology in both centralized and local industrial wastewater treatment systems.

Key words: *dispersion, aqueous solution, oxygen-hydrogen process, adsorption, silica gel, activated carbon.*

Постановка проблеми

В умовах сучасних екологічних викликів та збройної агресії проти України проблема забезпечення населення якісною питною водою набула особливої актуальності [1]. Військові дії призводять до пошкодження та руйнування об'єктів цивільної інфраструктури, зокрема систем централізованого водопостачання та очисних споруд [2]. Це спричиняє підвищений ризик забруднення водних джерел органічними сполуками, у тому числі барвниками,

що можуть потрапляти у воду внаслідок руйнування промислових підприємств, логістичних складів, військової техніки, а також медичних і побутових засобів.

Традиційні методи адсорбційного очищення хоч і є ефективними [3], проте часто характеризуються тривалим часом обробки та зниженою ефективністю при високому навантаженні на систему. В умовах обмежених ресурсів, перебоїв з електро- та водопостачанням, необхідність швидкої, ефективної та доступної очистки води стає критично важливою.

З огляду на це постає завдання удосконалення процесів адсорбційного очищення шляхом попередньої механічної активації забарвлених розчинів, зокрема через диспергування. Такий підхід дозволяє інтенсифікувати кисень-водневі процеси, покращити контакт між забруднювачем і поверхнею адсорбенту, та підвищити ефективність очищення. Особливу цінність такі методи мають для створення компактних систем очищення, які можуть бути оперативно застосовані в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема на прифронтових територіях та в зонах гуманітарної кризи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні очищення стічних вод є однією з найважливіших екологічних проблем у світі. Значну загрозу становлять органічні барвники, які потрапляють у водойми переважно з неочищеними промисловими стоками. Вони підвищують рівень ХПК і БПК, змінюють колір води, ускладнюючи її подальше очищення та знижуючи екологічну якість [4].

Серед різних методів розділення речовин адсорбція вирізняється своєю доступністю, простотою та ефективністю у масштабних водоочисних процесах. Упродовж 2020 року було запропоновано багато нових адсорбентів для видалення барвників, але більшість досліджень мають суттєві недоліки:

1. Непорівнянність результатів. Показники адсорбційної здатності сильно варіюються, що ускладнює об’єктивне оцінювання ефективності запропонованих матеріалів.
2. Ігнорування етапу десорбції. Майже половина досліджень не охоплює повний цикл адсорбція-десорбція, а в тих, де десорбцію розглянуто, часто відсутня інформація про подальшу утилізацію забрудненого десорбційного розчину.
3. Брак аналізу технологічних параметрів. У більшості робіт не досліджуються важливі змінні, як-от швидкість та спосіб перемішування, які істотно впливають на ефективність адсорбційного процесу [4].

Особливу увагу заслуговують нові, альтернативні адсорбенти, зокрема відходи металургійного виробництва. Перспективним прикладом є використання кислотно-обробленого шлаку киснево-конвертерного виробництва (BOF-шлаку) для видалення синтетичних текстильних барвників (Reactive Blue 19, Reactive Black 5, Reactive Red 120). Дослідження показали, що при pH 2,0 BOF-шлак демонструє високу адсорбційну здатність – до 76 мг/г для RB5. Отримані результати добре описуються ізотермами Ленгмюра та Редліха-Петерсона, а кінетика процесу відповідає моделі псевдопершого порядку [5].

У пошуках більш сталих та екологічно безпечних рішень для очищення стічних вод все більше уваги приділяється природним біосорбентам [6]. Одним із перспективних підходів є використання агровідходів, які не лише є доступними, але й екологічно дружніми. У цьому контексті ця робота досліджує потенціал шкірки граната як зеленого адсорбенту для видалення шкідливих барвників, зокрема метиленового синього (МС), що є типовим забруднювачем у текстильних та фармацевтичних стоках. Основні результати продемонстрували, що гранатова шкірка найбільш ефективно видаляє МС при нейтральних і лужних значеннях pH. Аналіз ізотерм рівноваги та кінетики показав, що модель псевдо-другого порядку найкраще описує процес адсорбції, а рівноважні дані найточніше узгоджуються з моделлю Редліха-Петерсона [6].

Окрім очищення водних середовищ від органічних забруднювачів, адсорбційні технології набувають усе більшого значення в системах регенерації вологи та низькопотенційного тепла. У цьому напрямі було досліджено експлуатаційні параметри адсорбційного регенератора тепла та вологи, створеного на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат», отриманих золь-гель методом. Такі матеріали поєднують високу адсорбційну здатність силікагелю з термохімічними властивостями солей, забезпечуючи ефективне накопичення та регенерацію вологи й тепла [7-8].

У ході дослідження було встановлено кореляцію між температурним коефіцієнтом корисної дії (ТККД) та такими параметрами, як швидкість повітряного потоку, час перемикання потоків, а також температури внутрішнього та зовнішнього повітря. Зокрема, максимальна ефективність спостерігалася при швидкості повітря 0,22–0,32 м/с та часі перемикання 5–10 хвилин для композиту «силікагель – натрій сульфат» [7-8]. Таким чином, поєднання екологічних та технічних адсорбентів у багатофункціональних системах – від очищення води до утилізації тепла – відкриває широкі перспективи для розвитку адаптивних, ресурсоощадних технологій в умовах як мирного часу, так і надзвичайних ситуацій.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було дослідження нової технології очищення забарвлених розчинів при активуванні диспергуванням системи фарбник – розчинник, а саме кисень-водневих процесів із наступною адсорбцією на силікагелі і активованому вугіллі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження є модельний водний розчин, забарвлений метилоранжем, який піддається попередній механічній активації шляхом перемішування рамною та фрезерною мішалками, з подальшим очищенням шляхом адсорбції на активованому вугіллі та силікагелі.

Передбачалось, що попередня активація кисень-водневих процесів забарвлених модельних розчинів сприяє підвищенню ефективності адсорбційного очищення забарвленого розчину на твердому сорбенті – силікагелі, активованому вугіллі.

У дослідженні для визначення кольоровості води застосовано фотоколориметричний метод. Статистичний аналіз та обробка отриманих експериментальних даних і результатів вимірювань були виконані за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

У рамках розширення функціональності адсорбентів для різних технологічних застосувань, зокрема в енергетичних системах, вченими було досліджено вплив кисневих функціональних груп та наявності води на процес адсорбції водню через механізм перетікання водню (hydrogen spillover). Для модифікації активованого вугілля (AB), яке виступає вторинним акцептором водню після фізичного контакту з платиновим (Pt-) каталізатором, застосовано хімічну обробку гідроксидом калію (KOH) з метою підвищення концентрації кисневих поверхневих груп [9].

Результати рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) підтвердили збільшення атомної частки кисню та зростання вмісту функціональних груп карбонільного і хінонового типу. Такі зміни забезпечують ефективніше захоплення та перенесення водню, що особливо помітно за низького тиску (< 100 мбар). Зокрема, при температурі 300 К було зафіксовано поглинання водню на рівні 1,1 мас.% при 100 мбар, яке зростає до 1,4 мас.% при 20 бар, хоча лише 0,4 мас.% водню десорбується при нормальних умовах шляхом зниження тиску [9].

Ці результати свідчать про критичну роль слідових кількостей води, присутніх під час активації адсорбенту, у формуванні активних центрів, що відповідають за ефективне перетікання водню. Це підтверджується додатковим спектроскопічним аналізом за допомогою FTIR та XPS, які демонструють структурні зміни на поверхні після обробки [9]. Крім того, така стратегія функціоналізації активованого вугілля може бути адаптована для суміщення сорбційної здатності з каталізом у складних середовищах, зокрема у сфері водневої енергетики [9].

Під час адсорбції метилоранжу силікагелем та активованим вугіллям відбуваються кисень-водневі процеси. Адсорбція фарбників – це процес, у якому молекули барвника зв'язуються з поверхнею адсорбенту (в нашому випадку, силікагелю або активованого вугілля). При цьому можуть відбуватися окисно-відновні реакції, де ключову роль відіграють кисень і водень як активні компоненти середовища або функціональні групи на поверхні адсорбентів. Це пояснюється тим, що на поверхні активованого вугілля або силікагелю можуть бути функціональні групи, які взаємодіють з киснем, це є реакції типу окиснення – наприклад, розрив подвійних зв'язків у структурі метилоранжу.

У присутності водню можлива редукція барвника або модифікація активних центрів адсорбенту, що підвищує його здатність до утримання молекул. Крім того, активоване вугілля саме по собі має розвинену пористу структуру та функціональні групи (наприклад, гідроксильні, карбонільні), які можуть каталізувати кисень-водневі реакції. Водночас, силікагель має менш виражені редокс-властивості, проте добре утримує полярні молекули за рахунок водневих зв'язків та сил Ван дер Ваальса.

Тобто очікувалось, що фрезерна (диспергувальна) мішалка забезпечить інтенсивне перемішування, створюючи турбулентність для покращення масообміну, диспергування великих молекул або агломератів барвника на дрібніші частинки для кращої адсорбції, а також насичення рідини киснем із повітря (аерацію). Практичне значення дослідження полягає в тому, що у фармацевтичній, текстильній та екологічній галузях адсорбція барвників із залученням кисню-водню має значення для очищення стічних вод, каталізу та створення сорбентів з контрольованими властивостями. Вивчення цих процесів допомагає вдосконалити очисні фільтри, сенсори та каталітичні системи.

Методика експерименту. У перші чотири 100-мл циліндри помістили силікагель (20,4 г, 10 мл), а в інші чотири – активоване вугілля (9,3 г, 10 мл). У перші циліндри з кожним адсорбентом додали забруднену воду без попереднього перемішування. Забруднювачі: брильянтовий зелений та метилоранж. У наступні три циліндри наливали воду, попередньо перемішану при частоті 30 об/хв протягом 0,3 хв, 60 об/хв протягом 0,3 хв. Проби для визначення кольоровості розчину фотоколориметричним методом відбирали через 0, 20, 40, 60 та 80 хвилин адсорбції.

Якісний аналіз очищення забарвленого розчину метилоранжем із використанням активованого вугілля і силікагелю представлено на рис. 1.

Згідно рис. 1, очевидним є те, що циліндри із активованим вугіллям зліва мають світлішу воду, ніж останні два справа. Незважаючи на очікувану ефективність активованого вугілля як сорбенту, попереднє турбоперемішування (швидкість обертання ротора фрезерної мішалки 60 об/хв) призвело до збереження каламутності забарвленого розчину. Це може бути зумовлено надмірною турбулентністю, що перешкоджає фіксації барвника на сорбенті, а також інтенсивним диспергуванням часток вугілля до колоїдного стану. Крім того, кавітаційні ефекти могли викликати часткове руйнування барвника, утворення продуктів, які залишаються у зваженому стані й зберігають мутність розчину.

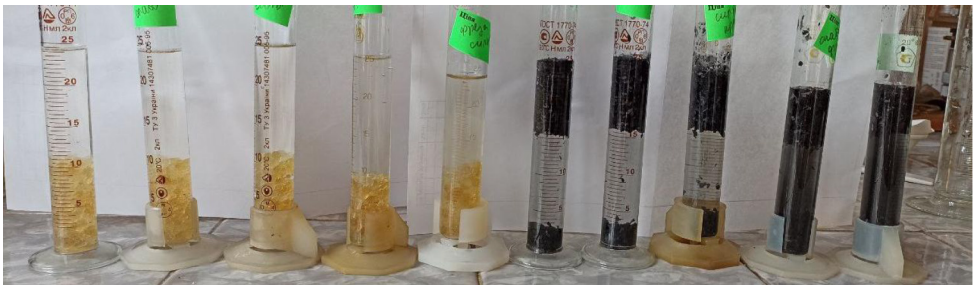

Рис. 1. Якісний аналіз очищення модельної забарвленої метилоранжем води після попередньої механічної обробки розчину

Так, через добу каламутність розчину, що очищували із використанням активованого вугілля зберігалась (рис. 2).

а)Через 80 хвилин б) Через добу

Рис. 2. Результати якісного аналізу попереднього диспергування забарвленого розчину метилоранжем і подальшого очищення активованим вугіллям

Видно, що при попередньому турбоперемішуванні розчин залишився каламутним, незважаючи на використання активованого вугілля, яке зазвичай добре адсорбує барвники.

Наочне порівняння проводили за допомогою використання другого барвника – брильянтового зеленого при використанні попередньої методики експерименту. За допомогою якісного аналізу встановили якість попередньої обробки перемішуючими приладами забарвлених розчинів брильянтовим зеленим – рис. 3.

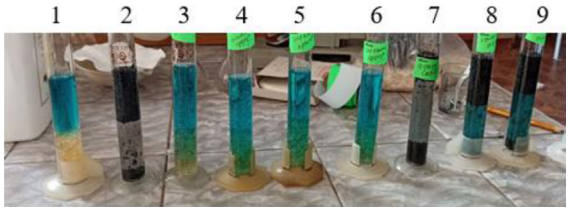

Рис. 3. Якісний аналіз очищення модельної забарвленої брильянтовим зеленим води після попередньої механічної обробки розчину: 1, 2 – Без механічної обробки; 3, 7 – Попередньо перемішаний розчин рамною мішалкою 30 об/хв; 4, 8 – Попередньо перемішаний розчин фрезерною мішалкою 30 об/хв; 5, 9 – Попередньо перемішаний розчин рамною мішалкою 60 об/хв; 6 – Попередньо перемішаний розчин фрезерною мішалкою 60 об/хв

Якісний аналіз попереднього диспергування, механічної обробки рамною мішалкою забарвленого розчину і подальшого очищення активованим вугіллям і силікагелем підтверджують і повторюють результати експерименту із метилоранжем. У першому циліндрі видно, як зафарбований розчин повільно очищується на адсорбентах і 80 хвилин експерименту не є достатнім для освітлення розчину, до того ж сам силікагель (циліндр 1) через 80 хв не мав кольору, тобто очищення проходило з малою ефективністю. Видно, що при використанні рамної мішалки, активоване вугілля якісніше змішується із розчином, не утворюючи каламутної звисі.

На рис. 4 представлено кількісний аналіз вищенаведеного досліду із метилоранжем у розчині при використанні активованого вугілля.

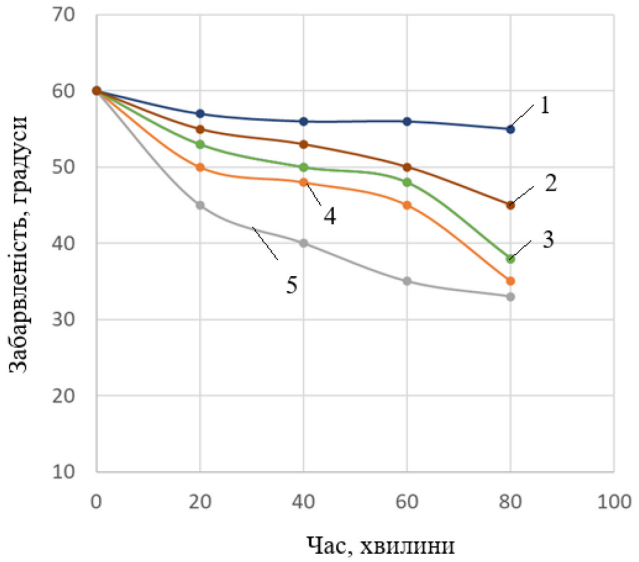

Рис. 4. Залежність зміни забарвленості розчину від часу адсорбції при використанні у якості адсорбенту активованого вугілля при попередній обробці рамною і фрезерною мішалкою на різних частотах: 1 – обробка розчину в турборежимі фрезою (60 об/хв); 2 – контрольна проба без попередньої обробки; 3 – попередня обробка рамною мішалкою (30 об/хв); 4 – попередня обробка (60 об/хв) рамною мішалкою; 5 – попередня обробка фрезерною мішалкою (30 об/хв)

Дослідження показали, що попереднє перемішування розчину рамною мішалкою перед адсорбцією на активованому вугіллі є доцільним з огляду на ефективність зниження забарвленості води та забезпечення стабільності процесу. Зокрема, при попередньому перемішуванні рамною мішалкою зі частотою 30 об/хв забарвленість зменшувалась з 60° до 38°, а при 60 об/хв – до 35°. У випадку, коли попереднє перемішування не проводилось, забарвленість після адсорбції становила 45°. Для порівняння, при використанні фрезової мішалки на частоті 30 об/хв забарвленість знижувалась до 32°, однак при збільшенні частоти до 60 об/хв спостерігалось утворення висококаламутної суспензії адсорбенту, яка стабілізувалась лише через добу. Таким чином, попереднє перемішування розчину рамною мішалкою забезпечує оптимальні умови для подальшої адсорбції на активованому вугіллі, що

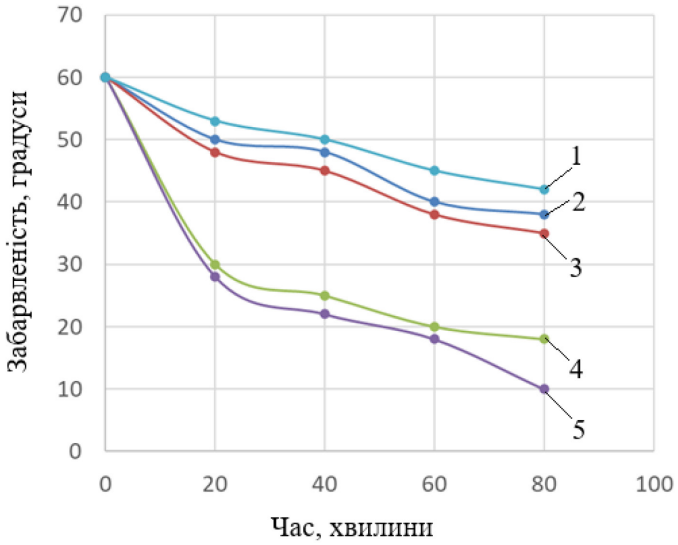

Рис. 5. Залежність зміни забарвленості розчину від часу адсорбції при використанні у якості адсорбенту силікагелю при попередній обробці рамною і фрезерною мішалкою на різних частотах: 1 – контрольна проба без попередньої обробки; 2 – попередня обробка на частоті 30 об/хв рамною мішалкою; 3 – попередня обробка на частоті 60 об/хв рамною мішалкою; 4 – попередня обробка на частоті 30 об/хв фрезерною мішалкою; 5 – попередня обробка забарвленого розчину на частоті 60 об/хв фрезерною мішалкою

робить її найбільш доцільним технічним рішенням для цього етапу процесу. На рисунку 5 наведено результати попередньої механічної обробки забарвлених розчинів при подальшій адсорбції фарбника на силікагелі.

Попереднє перемішування розчину перед адсорбцією на силікагелі значно покращує ефективність знебарвлення, порівняно з контрольним зразком без обробки, у якому забарвленість знижувалася лише до 45°. Найвищу ефективність адсорбції досягнуто при попередньому перемішуванні фрезерною мішалкою з частотою 60 об/хв – забарвленість зменшувалась до 15°, що є найкращим результатом серед усіх досліджених умов.

На відміну від активованого вугілля, силікагель не утворює надмірно диспергованої або каламутної суспензії при високочастотній фрезерній обробці, що дозволяє ефективно використовувати цей режим без ускладнень, пов'язаних із фазовою нестабільністю. Перемішування фрезерною мішалкою на 30 об/хв також забезпечує високу ефективність – кінцева забарвленість становила 20°, що є значно нижчим за показники рамної мішалки.

Рамна мішалка, хоча й забезпечує кращі результати, ніж контрольна проба (до 38° при 30 об/хв і до 35° при 60 об/хв), поступається фрезерній за ефективністю знебарвлення, що свідчить про обмежене перемішування у цьому режимі. Таким чином, оптимальним режимом попередньої обробки при адсорбції на силікагелі є фрезерне перемішування з частотою 60 об/хв, яке забезпечує максимальну адсорбційну ефективність без негативного впливу на стабільність системи.

Вищенаведені результати пояснюються також і кисень-водневими процесами при попередній обробці забарвленої рідини фрезерною мішалкою для подальшої адсорбції. Фрезерна (диспергувальна) мішалка забезпечує інтенсивне перемішування та турбулентність, що покращує масообмін; диспергування великих молекул або агломератів барвника до дрібніших форм, які краще адсорбуються, та аерацію – насичення рідини киснем із повітря.

Під час перемішування кисень активно залучається у часткове окиснення барвника (відбувається розрив ароматичних зв'язків, декольоризація, зміна структури). До того, висока турбулентність сприяє розчиненню молекулярного кисню, що запускає окисно-деструктивні процеси в органічних барвниках. Окиснені барвники краще взаємодіють із сорбентами через утворення нових полярних груп. Водневі зв'язки, що утворюються в процесі, впливають на міцність зв'язування барвника з поверхнею сорбенту (активоване вугілля, силікагель тощо).

Після попередньої обробки фрезерною мішалкою змінюється розмір часток, заряд та структура молекул барвника. Активована поверхня стає більш хімічно чутливою до сорбентів, адже барвник частково окиснений і має підвищену реакційну здатність, покращується доступність активних центрів адсорбентів, особливо у випадку з пористими матеріалами.

В умовах присутності кисню і води метилоранж на поверхні активованого вугілля зазнає часткового окиснення і руйнування структури, що сприяє зменшенню інтенсивності його забарвлення та покращенню адсорбції. Натомість силікагель, який не проявляє редокс-активності, сорбує метилоранж переважно завдяки утворенню водневих зв'язків між його сульфонатними групами та гідроксильними групами на поверхні сорбенту, при цьому молекули барвника зберігають свою хімічну структуру.

Висновки

1. Попередня обробка забарвленої рідини за допомогою фрезерної мішалки активізує кисень-водневі процеси, зокрема часткове окиснення молекул барвника, їх диспергування та модифікацію хімічної структури. Це суттєво підвищує ефективність подальшої адсорбції на силікагелі завдяки покращеному масообміну, підвищенню полярності молекул і створенню умов для утворення водневих зв'язків із сорбентами. Водночас, якщо адсорбція буде проходити при використанні активованого вугілля, доцільніше використовувати попереднє перемішування забарвленого розчину рамною мішалкою, задля уникнення каламутної звисі.

2. Попереднє перемішування розчину перед адсорбцією значно підвищує ефективність знебарвлення, порівняно з необробленим зразком (кінцева забарвленість – 45°). Для адсорбції на силікагелі найкращі результати досягнуті при перемішуванні фрезерною мішалкою з частотою 60 об/хв – забарвленість знижувалась до 15°, без утворення каламутної суспензії. Фрезерна мішалка на 30 об/хв також демонструє високу ефективність при адсорбції на силікагелі – забарвленість зменшувалась до 20°. Рамна мішалка менш ефективна (38° при 30 об/хв, 35° при 60 об/хв), але забезпечує стабільність і доцільна при використанні активованого вугілля як адсорбенту. Оптимальні режими попередньої обробки: для силікагелю – фрезерна мішалка, 60 об/хв; для активованого вугілля – рамна мішалка, 60 об/хв.

Список використаної літератури

1. Бондар О. І., Закорчевна Н. Б., Цвєткова А. М. Проблеми водозабезпечення населення питною водою у зв'язку із поглибленням дефіциту доступних водних ресурсів. / Науково-практичний журнал Екологічні науки № 7(34). 2023. С. 134–144. http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/7/25.pdf. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.23

2. Строкаль В. П., Ковпак А. В. Воєнні конфлікти та вода: наслідки й ризики. / Екологічні науки № 5(44). С. 94–102. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14

3. Шмичкова О., Проценко В., Велічко О. Очищення стічних вод від фармацевтичних препаратів: огляд літератури. / Питання хімії і хімічної технології. 2021. № 3. С. 4–31. DOI: http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-136-3-4-31

4. Francisco Jose Alguacil and Felix A. Lopez Adsorption Processes in the Removal of Organic Dyes from Wastewaters: Very Recent Developments. / Selection of our books indexed in the Book Citation Index in Web of Science™ Core Collection (BKCI). 2021. P. 1–11. https://scispace.com/pdf/adsorption-processes-in-the-removal-of-organic-dyes-from-1sjhg5wda9.pdf. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94164

5. Yongjie Xue, Haobo Hou, Shujing Zhu Adsorption removal of reactive dyes from aqueous solution by modified basic oxygen furnace slag: Isotherm and kinetic study./ Chemical Engineering Journal. 2009. № 147(2–3). P. 272–279. DOI:10.1016/j.cej.2008.07.017

6. Ghibate R., Chrachmy M., Alaqarbeh M., Ansari A., Baaziz Ben M., Bouachrine M., Taouil R., Senhaji O. Comprehensive analysis of hazardous dye adsorption onto a green adsorbent: Experimental profiling, theoretical modeling, and deciphering potential molecular interactions. / Desalination and Water Treatment. 2025. № 321. P. 100998. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.100998

7. Meyer F., Eigenbrod C., Wagner V. Apparatus to investigate liquid oxygen droplet combustion in hydrogen under microgravity conditions. 2020. № 91(10). P. 105110. DOI:10.1063/5.0020988

8. Belyanovskaya E. A., Lytovchenko R. D., Sukhyy K. M.., Yeremin O. O., Sukha I. V., Prokopenko E. M. Operating regime of adsorptive heat-moisture regenerators based on composites “silica gel – sodium sulphate” and “silica gel – sodium acetate”./ Journal of Chemistry and Technologies. 2019. № 27(2). P. 158–168. http://chemistry.dnu.dp.ua. DOI: https://doi.org/10.15421/081917

9. Li Q. X., Lueking A.D., Effect of Surface Oxygen Groups and Water on Hydrogen Spillover in Pt-Doped Activated Carbon. / The Journal of Physical Chemistry. 2011. № 115(10). P. 4273–4282. DOI:10.1021/jp105923a.

References

1. Bondar, O. I., Zakorchevna, N. B., & Tsvyetkova, A. M. (2023). Problemy vodozabezpechennya naselennya pytnoyu vodoyu u zv’yazku iz poglyblennyam defitsytu dostupnykh vodnykh resursiv [Problems of water supply of the population with drinking water due to the deepening deficit of available water resources]. *Ekolohichni Nauky*, *7*(34), 134–144. http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/7/25.pdf. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.23

2. Strokal, V. P., & Kovpak, A. V. (2022). Voyenni konflikty ta voda: Naslidky y ryzyky [Military conflicts and water: Consequences and risks]. *Ekolohichni Nauky*, *5*(44), 94–102. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14

3. Shmychkova, O., Protsenko, V., & Velichko, O. (2021). Ochyshchennya stichnykh vod vid farmatsevtychnykh preparativ: Ohlyad literatury [Wastewater treatment from pharmaceutical preparations: A literature review]. *Pytannya Khimiyi i Khimichnoyi Tekhnolohiyi*, *3*, 4–31. DOI: http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-136-3-4-31

4. Alguacil, F. J., & Lopez, F. A. (2021). Adsorption Processes in the Removal of Organic Dyes from Wastewaters: Very Recent Developments. In *Selection of our books indexed in the Book Citation Index in Web of Science™ Core Collection (BKCI)*. P. 1–11. https://scispace.com/pdf/adsorption-processes-in-the-removal-of-organic-dyes-from-1sjhg5wda9.pdf. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94164

5. Xue, Y., Hou, H., & Zhu, S. (2009). Adsorption removal of reactive dyes from aqueous solution by modified basic oxygen furnace slag: Isotherm and kinetic study. *Chemical Engineering Journal*, *147*(2–3), 272–279. DOI:10.1016/j.cej.2008.07.017

6. Ghibate, R., Chrachmy, M., Alaqarbeh, M., Ansari, A., Ben Baaziz, M., Bouachrine, M., Taouil, R., & Senhaji, O. (2025). Comprehensive analysis of hazardous dye adsorption onto a green adsorbent: Experimental profiling, theoretical modeling, and deciphering potential molecular interactions. *Desalination and Water Treatment*, *321*, 100998. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.100998

7. Meyer, F., Eigenbrod, C., & Wagner, V. (2020). Apparatus to investigate liquid oxygen droplet combustion in hydrogen under microgravity conditions. *Review of Scientific Instruments*, *91*(10), 105110. https://doi.org/10.1063/5.0020988

8. Belyanovskaya, E. A., Lytovchenko, R. D., Sukhyy, K. M.., Yeremin, O. O., Sukha, I. V., & Prokopenko, E. M. (2019). Operating regime of adsorptive heat-moisture regenerators based on composites “silica gel – sodium sulphate” and “silica gel – sodium acetate”. *Journal of Chemistry and Technologies*, *27*(2), 158–168. http://chemistry.dnu.dp.ua. DOI: https://doi.org/10.15421/081917

9. Li, Q. X., & Lueking, A. D. (2011). Effect of Surface Oxygen Groups and Water on Hydrogen Spillover in Pt-Doped Activated Carbon. *The Journal of Physical Chemistry*, *115*(10), 4273–4282. https://doi.org/10.1021/jp105923a