

**Іванченко А.В.**

Дніпровський державний технічний університет

**Сокол О.Д.**

Дніпровський державний технічний університет

## ОДЕРЖАННЯ ХІМІЧНО АКТИВОВАНИХ СОРБЕНТІВ ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ТА ЇХ ВИПРОБУВАННЯ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ БАРВНИКІВ ЗІ СТІЧНИХ ВОД

*У роботі вирішено актуальне завдання розробки сорбентів, які здатні ефективно вилучати барвники зі стічних вод. Використання вторинної сировини, зокрема шкаралупи волоського горіха, яка містить значну частку лігніну, целюлози та геміцелюлози, робить її перспективною основою для створення таких сорбційних матеріалів.*

*Створено методику отримання хімічно активованих сорбентів із шкаралупи волоського горіха шляхом поетапної кислотної та лужної хімічної активації. Одержано три зразки лігноцелюлозного сорбенту на основі шкаралупи волоського горіха; активація проводилася із застосуванням 20 % розчинів неорганічних мінеральних кислот  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $H_3PO_4$  при кімнатній температурі протягом 1 години. Матеріал промивали до нейтрального рН (7–8) та повторно висушували. Для покращення властивостей сорбент додатково обробляли 20 % розчином луку КОН.*

*Одержано експериментальні результати дослідження ефективності вилучення метилового оранжевого із модельних розчинів. У процесі сорбції застосовано витрату сорбенту  $1 \text{ г/дм}^3$ , початкова концентрація барвника становила  $100 \text{ мг/дм}^3$ . Виявлено оптимальний час контактування сорбенту зі стоками 20 годин. З'ясовано, що сорбент, активований нітратною кислотою, проявляє найбільш ефективну сорбцію метилового оранжевого, що складає 95 %. Ефективна сорбція барвника метилового оранжевого на кислотно активованому сорбенті вірогідно протікає завдяки великій кількості функціональних груп на поверхні сорбенту та розвиненій пористій структурі.*

*Окрему увагу приділено екологічним аспектам процесу хімічної активації, зокрема утилізації рідких стоків, що утворюються під час процесу хімічної обробки лігноцелюлозної сировини. Реакція між калій гідроксидом КОН та неорганічними мінеральними кислотами дозволяє отримувати калійні солі (калій сульфат, калій нітрат, калій фосфат), які використовуються як добрива у сільському господарстві. Це сприяє мінімізації негативного впливу процесу на довкілля та забезпечує вторинне використання побічних продуктів.*

*Запропонована технологічна схема одержання сорбентів, що включає технологічні операції: підготовку сировини, хімічну активацію, нейтралізацію побічних продуктів та отримання готового сорбенту й добрив. Використання автоматизованих систем і багатоступеневої обробки забезпечує високу ефективність процесу та придатність технології для промислового застосування. Отримані результати свідчать про перспективність використання хімічно активованих сорбентів із вторинної сировини для очищення стічних вод, що містять барвники, водночас сприяючи раціональному використанню природних ресурсів і зменшенню екологічного навантаження.*

**Ключові слова:** хімічна активація, лігноцелюлоза, метиловий оранжевий, водне очищення, очищення стічних вод, сорбція, шкаралупа волоського горіха, хімічна активація, карбонізація, добрива, екологічна ефективність.

**Постановка проблеми.** Зростання антропогенного навантаження на довкілля, зокрема на водні системи, є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Інтенсивна діяльність промислових підприємств, особливо текстильних, та харчових виробництв, призводить до значного забруднення стічних вод органічними та неорганічними сполуками, серед яких барв-

ники становлять окрему категорію. Барвники здатні накопичуватися в водоймах, та створювати токсичний вплив на водні екосистеми. Одним із перспективних методів очищення є використання сорбентів, здатних вилучати поллютанти зі стоків. Особливу увагу привертає можливість використання вторинної сировини для отримання хімічно активованих сорбентів. Вторинні матеріали, такі

як відходи сільського господарства, деревини, чи інші органічні відходи, мають значний потенціал як сировинна база для виробництва ефективних та екологічно безпечних сорбентів. Це не лише сприяє вирішенню проблеми утилізації відходів, але й дозволяє зменшити залежність від первинних ресурсів.

Однак, традиційні підходи до активації сорбентів передбачають використання агресивних хімічних реагентів, таких як концентровані кислоти чи луги, що створює додаткові екологічні виклики, адже їхня неконтрольована утилізація може спричинити додаткове навантаження на довкілля. Тому важливо розробляти технології, які забезпечують мінімізацію токсичних побічних продуктів активації та сприяють ефективному очищенню водних систем.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – одержати хімічно активовані сорбенти із вторинної сировини та випробувати їх для вилучення барвників зі стічних вод.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основну роль у підвищенні адсорбційних характеристик сорбентів відіграють процеси карбонізації та активації. Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації цих процесів, а також на пошуку інноваційних методів активації для забезпечення максимальної ефективності сорбентів. Карбонізація є початковим етапом обробки вихідної сировини, під час якого органічні матеріали піддаються термічному розкладу в умовах низького доступу кисню. Цей процес сприяє видаленню летких компонентів, концентруванню вуглецю та створенню базової пористої структури [1].

Температура та час карбонізації є критичними параметрами, які впливають на розмір пор та питомий об'єм сорбенту. Оптимальна температура для багатьох біоматеріалів, таких як лушпиння рису чи шкаралупа горіхів, становить 400–600 °C. Наприклад, карбонізація лушпиння рису при 500 °C протягом 2 годин призводить до формування мезопористої структури, яка є ефективною для адсорбції органічних барвників [2]. Активація є наступним етапом, який визначає адсорбційні властивості отриманого сорбенту. Основні методи активації поділяються на хімічну, фізичну та комбіновану. Хімічна активація передбачає обробку сировини активуючими реагентами, такими як фосфатна кислота ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), цинк хлорид ( $\text{ZnCl}_2$ ), або калій гідроксид ( $\text{KOH}$ ), що сприяють дегідратації органічної сировини, утворенню мікро- та мезопор і створенню активних функціональних груп на поверхні сорбенту. Застосування  $\text{KOH}$  як

активуєчого реагента дозволяє досягти питомої поверхні понад 2000  $\text{m}^2/\text{g}$ , що робить такі сорбенти надзвичайно ефективними у вилученні барвників. Прикладом є активація шкаралупи горіхів  $\text{KOH}$ , яка демонструє адсорбцію метиленового синього до 400  $\text{mg/g}$ . Фізична активація включає термічну обробку в інертній атмосфері (наприклад, нітроген чи аргон) або із застосуванням оксидантів, таких як водяна пара чи  $\text{CO}_2$ . Цей метод дозволяє розширити пористу структуру, одночасно зберігаючи екологічність процесу [3].

Доведено, що фізична активація при використанні водяної пари сприяє формуванню мезопористої структури, яка є ефективною для адсорбції великих молекул, таких як барвники. Наприклад, обробка стебел кукурудзи парою при температурі 800 °C забезпечує створення пор із діаметром 2–50 нм, що значно підвищує сорбційну здатність. Комбінована активація об'єднує хімічний та фізичний підхід, що дозволяє досягти синергетичного ефекту [4].

Попередня хімічна активація фосфатною кислотою із подальшою термічною обробкою при 700 °C забезпечує створення матеріалів із подвійною системою мікро- та мезопор. Комбінована активація забезпечує універсальну адсорбційну здатність, дозволяючи ефективно очищати стічні води, які містять різні типи барвників [5].

Однак, одним із недоліків хімічної активації лігноцелюлозної сировини є утворення токсичних відходів, що потребує розробки ефективних технологій їх утилізації.

**Виклад основного матеріалу.** Хімічна активація шкаралупи волоського горіха є перспективним методом створення сорбентів із покращеними адсорбційними властивостями, які ефективно використовуються для очищення водних ресурсів від токсичних органічних і неорганічних забруднень. Завдяки високому вмісту лігніну (25–30 %), целюлози (35–40 %) і геміцелюлози (20–25 %), шкаралупа волоського горіха має значний потенціал для використання як основа сорбційного матеріалу [6].

Методика хімічної активації включала кілька етапів. Спочатку шкаралупу промивали дистильованою водою для видалення механічних домішок і висушували у сушильній шафі за температури 120 °C протягом 1 години. Після висушування матеріал подрібнювали та класифікували, відбираючи фракції розміром 2–3 мм, що забезпечувало однорідність подальшої обробки. На наступному етапі проводили хімічну активацію із застосуванням кислот. Матеріал обробляли 20 %

розчином активатора ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  або  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) при співвідношенні сорбенту до розчину 1:2 (маса до об'єму). Активацію виконували за кімнатної температури протягом 1 години при постійному перемішуванні. Після активації матеріал ретельно промивали дистильованою водою до досягнення нейтрального рН (7–8) і висушували при температурі  $120^\circ\text{C}$  [7].

Для подальшого покращення адсорбційних властивостей проводилася додаткова обробка калій гідроксидом (KOH). Сорбент просочували в 20 % розчині KOH у співвідношенні 1:2 (сировина до розчину) та перемішували протягом 1 години при кімнатній температурі. Після обробки сорбент промивали дистильованою водою.

Рідкі стоки, що утворюються під час процесу хімічної активації, збираються в окрему ємність для подальшої утилізації. Реакції між гідроксидом калію (KOH) та кислотами, використаними в процесі активації, призводять до утворення відповідних солей і води.

Отримані солі (калій сульфат  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , калій нітрат  $\text{KNO}_3$  та калій фосфат  $\text{K}_3\text{PO}_4$  є цінними добривами, які можуть використовуватися в сільському господарстві. Вони забезпечують рослини необхідними елементами живлення, такими як калій, нітроген і фосфор, сприяючи підвищенню врожайності та сталому розвитку аграрного сектору. Отриманий калій сульфат ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) може бути використаний як добриво, оскільки є цінним джерелом калію, необхідного для росту та розвитку рослин. В результаті утворюється калій нітрат ( $\text{KNO}_3$ ), також відомий як калієва селітра. Ця сполука широко застосовується як азотно-калійне добриво в сільському господарстві, що сприяє підвищенню врожайності [8].

Заключним етапом була карбонізація (або піроліз), під час якої матеріал нагрівали до  $800^\circ\text{C}$ . Цей процес сприяв термічній деструкції органічних сполук, збільшенню вмісту карбону до 95 %, та формуванню вторинних пористих структур. Саме ці структури забезпечували високу адсорбційну здатність отриманих сорбентів, що робить їх ефективними для очищення води від забруднень [9].

Така методика демонструє високу екологічну ефективність, дозволяючи використовувати відходи як цінний ресурс для створення високоякісних сорбційних матеріалів.

#### Експериментальна частина

З метою визначення найбільш ефективного сорбенту та оптимальних технологічних параметрів для його промислового застосування, отри-

мані сорбенти використовували для очищення модельних розчинів від барвника. Для оцінки ефективності видалення метилового оранжевого проведено серію експериментальних досліджень. Початкова концентрація барвника в модельному розчині становила  $100\text{ мг/дм}^3$ , а витрата сорбенту  $1\text{ г/дм}^3$ . Сорбція тривала 24 години, при постійному перемішуванні на магнітних мішалках для забезпечення рівномірного контакту сорбенту з барвником. Відбирались проби об'ємом 1 мл кожні 4 години протягом доби для аналізу ступеня видалення барвника. Концентрацію метилового оранжевого у зразках визначали за допомогою фотометричного методу, вимірюючи оптичну густину розчину при довжині хвилі  $464\text{ нм}$  [10].

На основі отриманих даних побудовано графік залежності залишкової концентрації метилового оранжевого від часу адсорбції.

На рис. 1 представлено результати дослідження ефективності сорбентів, активованих різними хімічними реагентами, для вилучення барвника зі стічних вод.

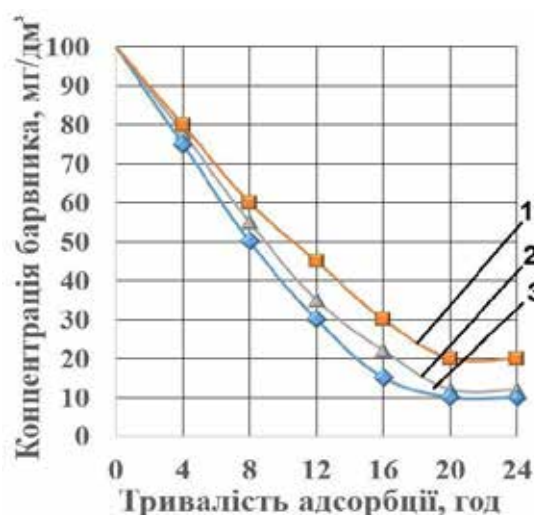


Рис. 1. Залежність залишкової концентрації метилового оранжевого від часу адсорбції при витраті сорбенту  $1\text{ г/дм}^3$ : 1 – сорбент лігноцелюлозний активований  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 2 – сорбент лігноцелюлозний активований  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; 3 – сорбент лігноцелюлозний активований  $\text{HNO}_3$

При витраті сорбенту  $1\text{ г/дм}^3$  після 12 годин контактування сорбент, активований нітратною кислотою ( $\text{HNO}_3$ ), знижує концентрацію барвника з  $100\text{ мг/дм}^3$  до  $30\text{ мг/дм}^3$ ; активований фосфатною кислотою ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) – до  $35\text{ мг/дм}^3$ , а активований сульфатною кислотою ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – до  $45\text{ мг/дм}^3$ .

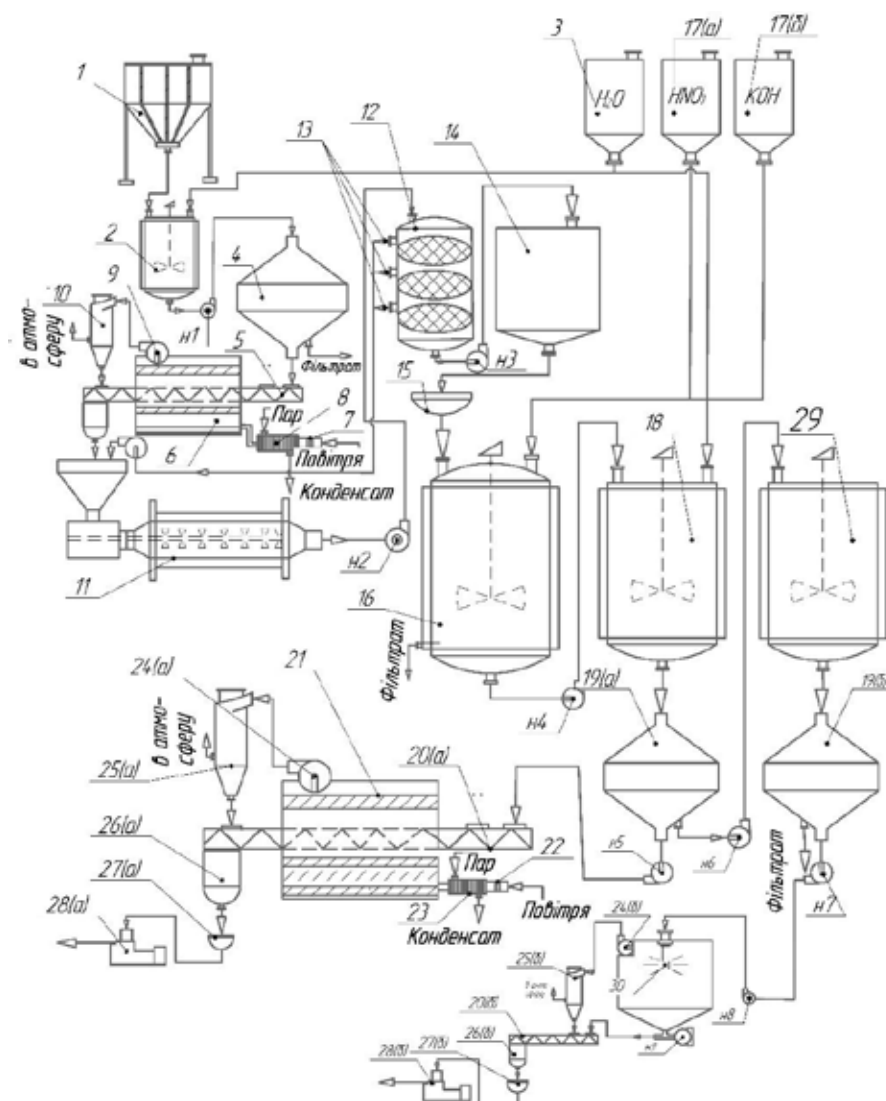
При збільшенні часу контактування до 20–24 годин спостерігається подальше зниження залишкової концентрації барвника. Активований

нітратною кислотою  $\text{HNO}_3$  – до  $10 \text{ мг/дм}^3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  – до  $12 \text{ мг/дм}^3$ ; для  $\text{H}_2\text{SO}_4$  –  $20 \text{ мг/дм}^3$ .

Найефективнішим серед досліджених методів активації є сорбент, активований нітратною кислотою ( $\text{HNO}_3$ ) демонструє найвищу ефективність видалення, досягаючи 95 % видалення барвника після 24 годин. Така ефективність може бути пов'язана з утворенням на поверхні сорбенту великої кількості функціональних груп (здебільшого карбоксильних), які активно взаємодіють із молекулами барвника. Формуванню пористої

структури сорбенту, яка забезпечує високу площу поверхні для адсорбції.

Сорбенти активовані  $\text{H}_2\text{SO}_4$  та  $\text{H}_3\text{PO}_4$  демонструють поступовий характер адсорбції з досягненням максимальної ефективності ближче до кінця досліду (20–24 години). Це може свідчити про більш повільне насичення активних центрів. Промислове використання сорбенту активованого нітратною кислотою є найбільш перспективним для застосування в промислових масштабах через його високу швидкість і ефективність видалення барвників.



**Рис. 2.** Технологічна схема хімічної активації сорбенту та утилізації фільтрату у добрива

1 – збірник сировини; 2 – промивна установка; 3 – збірник дистильованої води; 4 – сепаратор; 5 – шнековий транспортер; 6 – стрічкова сушарка; 7 – повітряний фільтр; 8 – паровий калорифер; 9 – вентилятор; 10 – циклон; 11 – дробильна установка; 12, 13 – розподільна система; 14 – збірник; 15 – автоматичні ваги; 16 – змішувач; 17(a), (б) – збірник з активатором; 18 – промивна установка; 19(a), (б) – сепаратор; 20(a), (б) – шнековий транспортер; 21 – муфельна піч; 22 – повітряний фільтр; 23 – паровий калорифер; 24 – повітряний фільтр; 25(a), (б) – циклон; 26(a), (б) – збірник висушеного сорбенту; 27(a), (б) – автоматичні ваги; 28(a), (б) – автомат для фасування; 29 – змішувач відпрацьованого активатора; 30 – сушарка Н1 – Н9 – насос

На основі експериментальних досліджень розроблено технологічну схему одержання кислотно активованого лігноцелюлозного сорбенту, яка організована наступним чином. Сировину (шкарлупу горіха) завантажують до збірника (1), де вона зберігається та поступово подається до промивної установки (2). Після цього до сировини подається дистильована вода (3) для видалення домішок і пилу. Надалі суміш нагнітають насосом (Н1) у сепаратор (4). Фільтрат, що відділяється під час сепарування, утилізується. Після цього сировина потрапляє на шнековий транспортер (5), а потім на стрічкову сушарку (6). Повітря для сушіння продукту з атмосфери поступає у повітряний фільтр (7), де його очищують від механічних забруднень, і передається до парового калорифера (8), де повітря нагрівається гострою парою до температури 100 °С.

Відпрацьоване повітря під час сушіння перекачується вентилятором (9) у циклон (10), де відбувається відділення часток сухого продукту від повітря. Очищене повітря викидається в атмосферу. Очищена та висушена сировина подається на дробильну установку (11), після чого суміш нагнітається насосом (Н2) до розподільної системи (12) для відсортування фракцій розміром 2–3 мм. Фракції більше 2–3 мм відсортовуються (13) та повторно подрібнюються (11).

Подрібнена сировина нагнітається насосом (Н3) до збірника (14). Далі поступово передається на автоматичні ваги (15) та у змішувач (16), куди подається 20 % розчин  $\text{HNO}_3$ . Після першого етапу активації застосовується додаткова обробка матеріалу 20 % розчином  $\text{KOH}$  (17б). Активованій сорбент нагнітається насосом (Н4) до промивної установки (18) куди подається дистильована вода (3) для промивання сировини. Суміш нагнітають у сепаратор (19а) фільтрат, що відділяється під час сепарування, утилізується у добрива.

Активованій сорбент нагнітається насосом (Н5) на шнековий транспортер (20), а потім до муфельної печі (21). Повітря для карбонізації продукту з атмосфери поступає у повітряний фільтр (22), де його очищують від механічних забруднень, і передається до парового калорифера (23). Відпрацьоване повітря, в процесі карбонізації, перекачується вентилятором (24) у циклон (25а), де відбувається відділення часток сухого продукту від повітря. Очищене повітря викидається в атмосферу. Готовий сорбент після (21) подається на шнековий транспортер (20). Разом з цим, на шнековий тран-

спортер (20а) подають виділені частки сухого продукту з циклону (25а). Шнековий транспортер (20а) перекачує продукт у збірник висушеного сорбенту (26а), де продукт зберігається та порційно подається на автоматичні ваги (27а). На автоматичних вагах (27а) відбувається зваження адсорбенту та передача у автомат для фасування (28а). Фільтрат що та утворився в процесі активації ( $\text{HNO}_3$ , та  $\text{KOH}$ ) нагнітається насосом (Н6) у змішувач (29) де відбувається нейтралізація реагентів з утворенням кристалів калієвої селітри далі суміш подається на сепаратор 19(б) після чого с нагнітається насосом (Н7,8) до сушарки (30). Відпрацьоване повітря, в процесі сушки, перекачується вентилятором (24б) у циклон (25б), де відбувається відділення часток сухого продукту від повітря. Очищене повітря викидається в атмосферу. Отримане добриво нагнітаються насосом (Н9) на шнековий транспортер (20б). Разом з цим, на шнековий транспортер (20б) подають виділені частки сухого продукту з циклону (25б). Шнековий транспортер (20б) перекачує продукт у збірник висушеного добрива (26б), де він зберігається та порційно подається на автоматичні ваги (27б). На автоматичних вагах (27б) відбувається зваження та передача у автомат для фасування (28б) [10].

Далі партія упаковок адсорбенту, та добрива, що пройшла контроль, відвантажується на склад.

**Висновки.** Одержано хімічно активовані сорбенти на основі шкарлупи волоського горіху. Активацію волоського горіху здійснено за участі хімічних агентів. Оптимальна методика активації, яка включає обробку 20 % розчинами  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  та додаткову обробку  $\text{KOH}$  із подальшою карбонізацією при 800 °С, забезпечує створення сорбентів із розвиненою пористою структурою. Експериментальні дослідження підтвердили, що сорбенти активовані  $\text{HNO}_3$ , мають найвищу ефективність у видаленні метилового оранжевого (до 95 %), завдяки великій кількості функціональних груп на поверхні та високій площі адсорбції. Рідкі стоки, що утворюються під час активації, ефективно нейтралізуються калій гідроксидом із утворенням калійних солей ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{K}_3\text{PO}_4$ ), які можуть використовуватися як добрива. Запропонована технологічна схема є економічно вигідною, екологічно безпечною та адаптованою для промислового впровадження, а отримані результати свідчать про перспективність використання хімічно активованих сорбентів.

## Список літератури:

1. Marquez-Montesinos F., Cordero T., Rodríguez-Mirasol J., Rodríguez J. Powdered activated carbons from pinus caribaea sawdust. *Separation Science and Technology*. 2001. No. 36(14). С. 3191–3206.
2. Ковальчук А., Почечун Т., Галиш В., Трус І. Фосфорилування шкаралуп волоських горіхів для підвищення ефективності очищення водних розчинів. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 236–244.
3. Будзуляк І.М., Ващинський В.М., Рачій Б.І. Адсорбційні властивості пористих вуглецевих матеріалів, отриманих методом хімічної активації. *Журнал фізики та інженерії поверхні*. 2015. № 1 (13). С. 84–90.
4. Єлатонцев Д.О., Мухачев, А.П., Супрунчук В. І. Сорбент лігноцелюлозний зі шкарлупи волоського горіха. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. № 29 (1) С. 110–115.
5. Alaya M.N., Girgis B.S., Mourad W.E. Activated carbon from some agricultural wastes under action of one-step steam pyrolysis. *Journal of Porous Materials*. 2000. Vol. 7. P. 509–517.
6. Daoud, M., Benturki, O., Girods, P., Donnot, A., Fontana, S. Adsorption ability of activated carbons from phoenix dactylifera rachis and ziziphus jujube stones for the removal of commercial dye and the treatment of dyestuff wastewater. *Microchemical Journal*. 2019. No.148(3–4). P. 493–502.
7. Khokhotva O. The influence of dissolved organic carbon on sorption of heavy metals on urea-modified pine bark. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 173(1–3). P. 689–696.
8. Сокол О.Д., Воронов В.В., Іванченко А.В. Хімічна активація природних сорбентів і утилізація промивних вод у добрива. *The 5th International scientific and practical conference "Perspectives of contemporary science: theory and practice" (June 24–26, 2024), Lviv, Ukraine*. 2024. 368–371.
9. Sentorun-Shalaby C., UcakAstarlioglu M. G., Artok L., Sarici C. Preparation and characterization of activated carbons by one-step steam pyrolysis activation from apricot stones. *Microporous and mesoporous materials*. 2006. Vol. 88. P. 126–134.
10. Ivanchenko A.V., Soroka O.V., Sokol O.D. Removal ions of ferrum(III) and zinc from aqueous environments by chemically activated sorbents from natural raw materials. *Journal of Chemistry and Technologies. Oles Honchar Dnipro National University*. 31 (2). 2023. P. 344–352.

#### Ivanchenko A.V., Sokol O.D. PRODUCTION OF CHEMICALLY ACTIVATED SORBENTS FROM SECONDARY RAW MATERIALS AND THEIR TESTING FOR THE REMOVAL OF DYES FROM WASTEWATER

*This study addresses the urgent task of developing sorbents capable of effectively removing dyes from wastewater. The use of secondary raw materials, particularly walnut shells, which contain significant amounts of lignin, cellulose, and hemicellulose, makes them a promising basis for creating such sorption materials.*

*A methodology for obtaining chemically activated sorbents from walnut shells has been developed through stepwise acidic and alkaline chemical activation. Three samples of lignocellulosic sorbents based on walnut shells were prepared. The activation was conducted using 20% solutions of inorganic mineral acids ( $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $H_3PO_4$ ) at room temperature for 1 hour. The material was washed to achieve a neutral pH (7–8) and then dried again. To further enhance the properties of the sorbents, an additional treatment with a 20% KOH solution was applied.*

*Experimental results on the efficiency of removing methyl orange from model solutions were obtained. During the sorption process, a sorbent dose of  $1\text{ g/dm}^3$  was used, with an initial dye concentration of  $100\text{ mg/dm}^3$ . The optimal contact time between the sorbent and the wastewater was determined to be 20 hours. It was found that the sorbent activated with nitric acid exhibited the highest sorption efficiency for methyl orange, reaching 95%. The effective sorption of methyl orange on the acid-activated sorbent is likely attributed to the large number of functional groups on the surface and its well-developed porous structure.*

*Special attention was paid to the environmental aspects of the chemical activation process, particularly the utilization of liquid waste generated during the chemical treatment of lignocellulosic raw materials. The reaction between potassium hydroxide (KOH) and inorganic mineral acids produces potassium salts (potassium sulfate, potassium nitrate, potassium phosphate), which can be used as fertilizers in agriculture. This minimizes the negative environmental impact of the process and ensures the secondary use of by-products.*

*The proposed technological scheme for obtaining sorbents includes the following operations: raw material preparation, chemical activation, by-product neutralization, and the production of final sorbents and fertilizers. The use of automated systems and multi-stage processing ensures high process efficiency and the suitability of the technology for industrial applications. The results obtained confirm the feasibility of using chemically activated sorbents from secondary raw materials for cleaning wastewater containing dyes, while promoting the rational use of natural resources and reducing environmental impact.*

**Key words:** Chemical activation, lignocellulose, methyl orange, sorption, water purification, wastewater treatment, sorption, walnut shell, chemical activation, carbonization, fertilizers, ecological efficiency.