

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-3(29)-114-125  
УДК 677.494

**Юрій Будаш<sup>1</sup>, Вікторія Плаван<sup>2</sup>, Наталія Тарасенко<sup>3</sup>,  
Олена Іщенко<sup>4</sup>, Роксолана Петрунько<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [budash.yo@knutd.edu.ua](mailto:budash.yo@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8718-1577>  
ResearcherID: [H-6012-2018](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577). SCOPUS Author ID: [9134072100](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577)

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [plavan.vp@knutd.edu.ua](mailto:plavan.vp@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>  
ResearcherID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962). SCOPUS Author ID: [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

<sup>3</sup>асистент кафедри загальної та неорганічної хімії  
Національний технічний університет КПІ ім. І. Сікорського (Київ, Україна)  
аспірантка кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [tarasenko.nv@ukr.net](mailto:tarasenko.nv@ukr.net). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1062-5533>. ResearcherID: [J-7632-2017](https://orcid.org/0000-0003-1062-5533)

<sup>4</sup>доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [ishhenko.ov@knutd.com.ua](mailto:ishhenko.ov@knutd.com.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>  
Researcher ID: [GYV-0809-2022](https://orcid.org/0000-0002-9510-6005). SCOPUS Author ID: [57200013816](https://orcid.org/0000-0002-9510-6005)

<sup>5</sup>магістрант кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)  
E-mail: [ktpthv@knutd.edu.ua](mailto:ktpthv@knutd.edu.ua)

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗМІРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИНОК ГІБРИДНИХ ТА МІНЕРАЛЬНИХ АДСОРБЕНТІВ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ВОДООЧИЩЕННЯ

*У роботі виконано порівняльний морфометричний аналіз різних типів вітчизняних адсорбентів, призначених для застосування в технологіях водоочищення. Кількісне оцінювання розмірів частинок адсорбентів проводили методом аналізу цифрових зображень. Визначали площу й периметр окремих частинок та розраховували їхній еквівалентний діаметр і показник форми. Показано, що найбільш прийнятними адсорбентами для процесів водоочищення можна вважати колоїдно-графітовий препарат та глинопорошок монтморилонітового типу, для яких спостерігається висока однорідність розподілу частинок за показником форми. Це, у свою чергу, може забезпечити вищу ефективність сорбції в технологіях водоочищення.*

**Ключові слова:** адсорбент, морфометричний аналіз, еквівалентний діаметр, показник форми, водоочищення.  
Рис.: 4. Табл.: 6. Бібл.: 24.

**Актуальність теми дослідження.** Вода є важливим природним ресурсом для живих організмів на землі, і будь-яке її забруднення має значний негативний вплив на навколишнє середовище. На жаль, індустріалізація та зростання чисельності населення світу призвели до серйозного погіршення якості водних ресурсів. Гірничодобувна, сільськогосподарська, фармацевтична, шкіряна та текстильна промисловість випадково або навмисно вводять різноманітні неорганічні та органічні забруднювачі у водні системи, змінюючи якість води [1; 2]. Крім того, забруднення води стічними водами відбувається через перелив неочищених стічних вод, протікання каналізаційних ліній або частково очищених стічних вод. Надлишок дощу або руйнування каналізаційних ліній, як наслідок, призводить до скидання стічних вод у проточні річкові системи та/або підземні точки водопостачання [3].

**Постановка проблеми.** Для очищення стічних вод використовуються кілька методів, таких як фільтрація, екстракція розчинником, іонний обмін, хімічне окислення та осадження, коагуляція, флоатація, седиментація та мембранний процес [4]. Ефективній роботі кожного методу заважає властивий йому недолік. Наприклад, використання хлору під час хімічного окислення спричиняє неминуче утворення побічних продуктів і викликає корозію металу відповідного обладнання. Незважаючи на те, що для фільтрації потрібен невеликий простір і низький тиск, потреба в енергії дуже висока [5; 6]. Натомість

© Юрій Будаш, Вікторія Плаван, Наталія Тарасенко, Олена Іщенко, Роксолана Петрунько, 2022

процес адсорбції, добре відомий метод для розділення газів та промислового каталізу, протягом останніх років отримав додатковий імпульс для використання в технологіях водоочищення. Процес адсорбції простий у проектуванні та експлуатації. Крім того, процес адсорбції не створює надлишкових побічних продуктів, а тверді матеріали можна регенерувати шляхом термічної десорбції [7].

Природні адсорбенти, такі як вугілля, цеоліти, глина та деревина, використовуються для видалення катіонів, барвників та органічних сполук зі стічних вод [8]. Вибір мінеральних адсорбентів залежить від галузі використання сорбційного матеріалу й визначається складом стічних вод, які підлягають очищенню; експлуатаційною надійністю, можливістю регенерації і повторної переробки, доступністю та вартістю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо використання силікатних мінералів [9] для сорбції деяких важких металів, присутніх у промислових стічних водах. Ці мінерали легкодоступні, недорогі, показують високу сорбційну ємність у порівнянні з іншими мінеральними сорбентами, але вибірково, зокрема сорбційна ємність зменшується в такому порядку:  $Cd^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$ . Авторами [10] розроблений сорбційний метод вилучення іонів важких металів за допомогою цеоліту із стічних вод з концентрацією їх від 50 до 300 мг/л. Недоліком вказаного методу є різна сорбційна ємність цеоліту щодо різних важких металів. Зокрема, при вилученні Cd сорбується близько 32 % металу, а для Pb ступінь поглинання становить 99 %. Існують численні дослідження, пов'язані з сорбцією іонів важких металів Cu (II), Cd (II), Zn (II), Pb (II), хрому (VI) з використанням активованого вугілля і біовугілля [11,12] отриманих в результаті утилізації сільськогосподарських органічних відходів кукурудзи, соломи та інших культур. Однак ці технології доволі складні для реалізації, потребують використання дорогого устаткування, відрізняються підвищеною енергоємністю і складністю регенерації сорбенту.

Адсорбенти – це пористі матеріали з великою площею поверхні. Розміри пор коливаються від 2-5 нм для мікропор, 5-50 нм для мезопор і 50-100 нм для макропор [1]. Висока пористість забезпечує легкий масообмін матеріалів усередині пор, тобто більш швидку кінетику видалення забруднюючих речовин. Крім пористості, не менше значення для процесів сорбції відіграє дисперсність адсорбенту, а саме розмір і форма частинок та розподіл за цими показниками.

Взаємодія адсорбату і адсорбенту може відбуватися як за участі фізичних, так і хімічних сил. При фізичній адсорбції домінуючими є сили взаємодії Ван-дер-Ваальса; навпаки, хемосорбція передбачає взаємодію адсорбенту з адсорбатом за допомогою хімічних сил (рис. 1).



Рис. 1. Схема механізму взаємодії поверхня-адсорбент у процесах:  
а – фізичної сорбції; б – хемосорбції [13]

Основною метою виробництва мінеральних адсорбентів, зокрема вуглецевих, є збільшення площі поверхні за рахунок збільшення кількості мікропор, які мають велику адсорбційну здатність. Характеристики пор можуть бути змінені в процесі попередньої обробки сорбентів під час виробництва. Здебільшого виробництво активованого вугілля включає високі температури та додаткову активацію, наприклад, парою, CO<sub>2</sub> або хімічним способом, залежно від характеристик матеріалу. Крім того, твердість та дисперсність активованого вугілля також є іншими важливими факторами його якості, як сорбенту [14]. Завдяки цілеспрямованому впливу на структуру адсорбентів можливе надання їм комплексу нових характеристик, що сприятиме розширенню галузей їх застосування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** До параметрів, що характеризують структуру адсорбентів відносять: кількість пор та їх об'єм, склад поверхневих функціональних груп та величина питомої поверхні. Завдяки цим параметрам визначається придатність для вирішення питань екологічної безпеки, зокрема, що стосується комплексного очищення стічних вод і газових викидів [15; 16].

Використання адсорбентів різної природи може суттєво розширити можливості цілеспрямованого та тонкого керування структурою та властивостями сорбційних матеріалів, що дозволить цілеспрямовано регулювати їхню фільтрувальну й сорбційну здатність, селективність щодо різних забруднювачів, що сприятиме підвищенню ефективності водоочищення.

**Мета дослідження** – порівняльний морфометричний аналіз частинок різних типів і марок вітчизняних адсорбентів для обґрунтованого вибору їх застосування в процесах водоочищення.

**Викладення основного матеріалу.** В роботі були досліджені чотири типи вітчизняних адсорбентів:

1. Вуглецевий адсорбент «*Möbius*» виробництва компанії «Мебіус груп» (МБ). Це новий клас адсорбенту гібридного типу, що складається, в основному, з вуглецю (до 94-97% в перерахунку на беззольний продукт) [17]. Являє собою порошкоподібну речовину чорного кольору з коротковолокнистим армуючим компонентом. Матеріал призначений для сорбційної очистки води та твердих поверхонь від розчинених органічних речовин і нафтопродуктів середньої і високої молекулярної маси, барвників, ПАР і пестицидів і інших речовин. Використовується при ліквідації розливів нафти, для очищення промислових стоків, первинного очищення комунальних стоків методом фільтрації, при виробництві фільтрів високої продуктивності, а також фільтрів малої і середньої продуктивності. Основні характеристики МБ представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості адсорбенту МБ

Показник	Значення
Насипна щільність при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	345,5
Масова частка золи, %	5,2
Масова частка загальної сірки, %	0,8
Масова частка вологи, %	2,7
рН водної витяжки, рН, од.	4,5
Плавучість, %	98

2. Глинопорошок марки П<sub>1</sub>Т<sub>1</sub>КА (АТ «Дашуківські бентоніти», Україна) (ГПМ). Відноситься до глин монтморилонітового типу та широко використовується як сорбційний реагент для очищення харчових рідких середовищ, природних, технічних та стічних вод [18]. Основні характеристики ГПМ представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні властивості адсорбенту ГПМ

Показник	Значення
Масова частка монтморилоніту, %	85
Масова частка карбонатів у перерахунку на CaCO <sub>3</sub> , %	7
Масова частка сульфідної сірки, %	0,06
Масова частка заліза в перерахунку на Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	4,6
Залишок на ситі №0071, %	2,1
Масова частка вологи, %	9,4

3. Сажа марки ДГ-100 (ТОВ «Будіндустрія») (СДГ). Дисперсний вуглецевий продукт неповного згоряння або термічного розкладання вуглеводнів. Відносно дешевий і поширений побічний продукт промислових виробництв. Використовується, при очищенні промислових вод від солей важких металів (наприклад, іонів свинцю).

Основні характеристики адсорбенту СДГ представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Фізико-хімічні властивості адсорбенту СДГ

Показник	Значення
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	1900
Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	320
Зольність, %	0,1
Питома умовна поверхня, м <sup>2</sup> /г	16
pH водної суспензії	8,5
Маслоємність, г/100г	75

4. Колоїдно-графітовий препарат марки С-1 (ТД «Укрспецмасла») (КГП).

Цей препарат складається з високодисперсного подрібненого порошку натурального графіту. У промисловості застосовується як компонент для приготування графітових сумішей і технологічних мастил, виготовлення хімічного й антикорозійного покриття, як добавка пластифікатора при таблетуванні, як компонент клею для прогумованих тканин, для контактів і резисторів, для інших цілей. Графіт С-1 безпечний і нетоксичний для людини. Основні характеристики адсорбенту КГП представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Фізико-хімічні властивості адсорбенту СДГ

Показник	Значення
Масова частка вуглецю, %	99,3
Масова частка золи, %	0,6
Масова частка сірки, %	0,02
Масова частка нерозчинних в соляній кислоті речовин, %	0,2
Масова частка вологи, %	0,3
Зниження масової частки графіту в водній суспензії після відстоювання протягом 1 години, %	35

Морфометричний аналіз частинок адсорбентів проводили методом оптичної поляризаційної мікроскопії (мікроскоп марки «Біолам»). Мікрофотографії попередньо диспергованих в імерсійній рідині частинок отримували за допомогою цифрової фотокамери «Olympos» з високороздільною матрицею (10 Мп). На рис. 2 наведено мікрофотографії частинок досліджених адсорбентів.

Кількісне оцінювання розмірів частинок адсорбентів проводили методом аналізу цифрових зображень (програмний пакет «ImageJ») [19]. Визначали площу ( $S_p$ ) й периметр ( $P_p$ ) окремих частинок та розраховували їх еквівалентний діаметр ( $D_e = (4S_p/\pi)^{0.5}$ ) і показник форми ( $SF = 4\pi \cdot S_p/P_p^2$ ). Для різних зразків загальне число аналізованих частинок складало від 896 до 11839. Статистичну обробку експериментальних даних проводили за допомогою програмного пакету «Statistica».

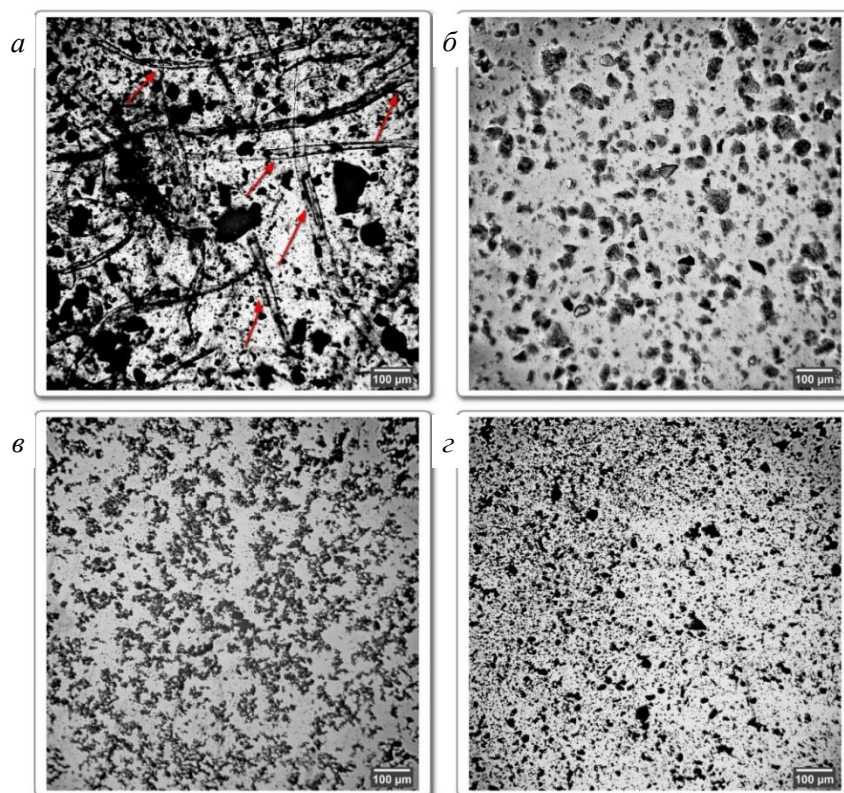


Рис. 2. Мікрофотографії в прохідному світлі частинок досліджених адсорбентів:  
а – вуглецевий адсорбент «Möbius»; б – глина марки П<sub>1</sub>Т<sub>1</sub>КА;  
в – сажа марки DF-100; г – колоїдно-графітовий препарат марки С-1

Програмними засобами пакету «Statistica» розраховували медіану, як величину, що розташована посередині ранжованого ряду вибірки, та моду, як значення, що трапляється найчастіше в сукупності спостережень. Число спостережень у цьому випадку відповідало кількості частинок, що аналізувались.

Встановлено, що зразки суттєво відрізняються за характером дисперсної структури, розмірними характеристиками частинок та ступенем їх агрегації в імерсійній рідині при мікроскопічних дослідженнях. Для МБ адсорбента (рис. 2, а) спостерігаються два типи частинок: глобулярні вуглецеві з достатньо широким розподілом за розмірами, а також фібрилярні (показано стрілками) з вузьким розподілом за поперечними розмірами (20-30 мкм). Останні мають пласку, стрічкоподібну структуру, з вираженою оптичною анізотропією, що дозволяє віднести їх до природних целюлозних волокон [20; 21]. Ймовірно, їх додавання до вуглецевих частинок мало на меті забезпечити певні текстурні характеристики та часткову зв'язність адсорбенту при його практичному використанні. Зразок адсорбенту СДГ (рис. 2, в) демонструє помітну агрегацію окремих частинок в імерсійній рідині, що може бути пов'язано з їх поверхневими властивостями. Для зразків ГПМ та КГП (рис. 2, б, г) характерний достатньо широкий розподіл частинок за формою та розмірами. Водночас помітної агрегації частинок не спостерігається.

На рис. 3 представлені гістограми розподілу частинок досліджених адсорбентів за еквівалентним діаметром ( $D_e$ ).

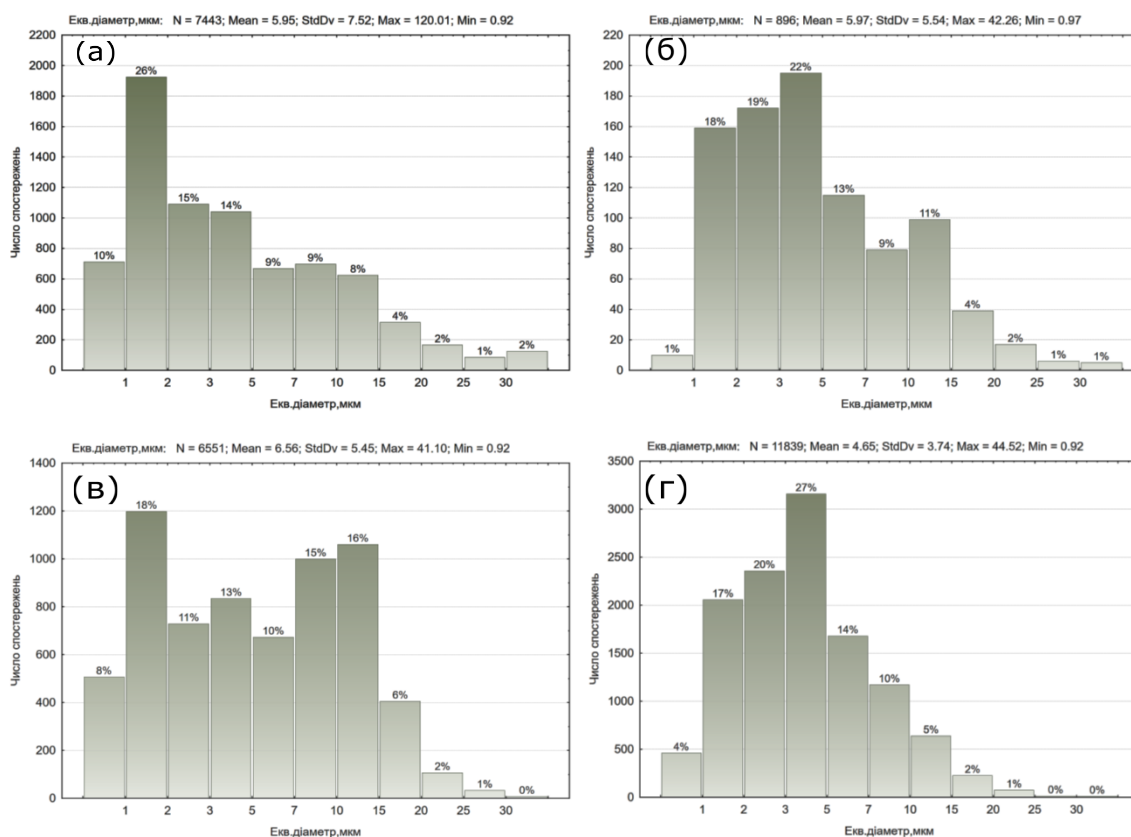


Рис. 3. Гістограми розподілу частинок адсорбентів за еквівалентним діаметром:  
 а – вуглецевий адсорбент «М'юбіус»; б – глина марки ПТГКА;  
 в – сажка марки DF-100; г – колоїдно-графітовий препарат марки С-1

З наведених даних можна зробити висновок про те, що для частинок МБ адсорбенту (рис. 3, а) найбільша фракція частинок ( $\sim 26\%$ ) відноситься до достатньо вузького розмірного інтервалу  $D_e$  (1-2 мкм). Водночас для ГПМ зразку (рис. 3, б) більша частина аналізованих частинок ( $\sim 59\%$ ) знаходиться в більш широкому розмірному інтервалі  $D_e$  (1-5 мкм). Для СДГ адсорбенту (рис. 3, в) розподіл частинок за еквівалентним діаметром має бімодальний характер. Фракція частинок з розмірами 1-2 мкм складає  $\sim 18\%$ . В той же час майже третина частинок ( $\sim 31\%$ ) відповідає розмірному інтервалу 7-15 мкм. Як зазначалося вище, це може бути свідченням агрегації частинок в імерсійній рідині при мікроскопічних дослідженнях. Зразок КГП (рис. 3, г) демонструє симетричний розподіл частинок за  $D_e$ , близький до нормального. Для переважної більшості аналізованих частинок КГП зразка ( $\sim 64\%$ ) значення  $D_e$  відповідає інтервалу 1-5 мкм.

Середні статистичні показники розподілу частинок досліджених зразків адсорбентів за  $D_e$  представлені в табл. 5. Узагальнені результати свідчать, що найбільше середньоарифметичне значення еквівалентного діаметру частинок спостерігається для СДГ адсорбенту (6,6 мкм), а найменше – для КГП зразка (4,7 мкм). Для всіх зразків медіанні та модальні значення  $D_e$  помітно менше за середньоарифметичні, що свідчить про асиметричність розподілу за цією характеристикою. Для гібридного МБ адсорбенту спостерігаються найбільші значення коефіцієнтів варіації та осциляції, що суттєво перевищують аналогічні значення інших зразків. Це може бути свідченням наявності в ньому двох різних типів частинок.

Таблиця 5 – Статистичні показники розподілу частинок досліджених зразків адсорбентів за еквівалентним діаметром ( $D_e$ )

Зразок	Число об'єктів	Середнє значення, мкм	Інт. -95%	Інт. +95%	Медіана, мкм	Мода, мкм	Коеф. варіації, %	Коеф. осциляції
МБ	7443	6,0	5,8	6,1	3,0	0,9	126,4	20,0
ГПМ	896	6,0	5,6	6,3	3,9	1,2	92,8	6,9
СДГ	6551	6,6	6,4	6,7	5,0	0,9	83,2	6,1
КГП	11839	4,7	4,6	4,7	3,6	0,9	80,4	9,4

Поряд з розмірними характеристиками, не меншу роль відіграє й форма частинок адсорбентів. Фактор форми суттєво впливає на питому площу поверхні частинок, а отже визначає ефективність міжфазної взаємодії адсорбенту й адсорбату в робочому процесі.

На рис. 4 представлені гістограми розподілу частинок досліджених адсорбентів за показником форми ( $SF$ ). Середні статистичні показники розподілу частинок досліджених зразків адсорбентів за показником форми  $SF$  представлені в табл. 6.

Таблиця 6 – Статистичні показники розподілу частинок досліджених зразків адсорбентів за показником форми ( $SF$ )

Зразок	Число об'єктів	Середнє значення	Інт. -95 %	Інт. +95 %	Медіана	Мода	Коеф. варіації, %	Коеф. осциляції
МБ	7443	0,736	0,731	0,741	0,746	1,000	30,0	1,1
ГПМ	896	0,686	0,674	0,699	0,713	0,967	27,3	1,3
СДГ	6551	0,736	0,732	0,741	0,732	1,000	27,0	1,1
КГП	11839	0,799	0,796	0,803	0,828	1,000	22,5	1,0

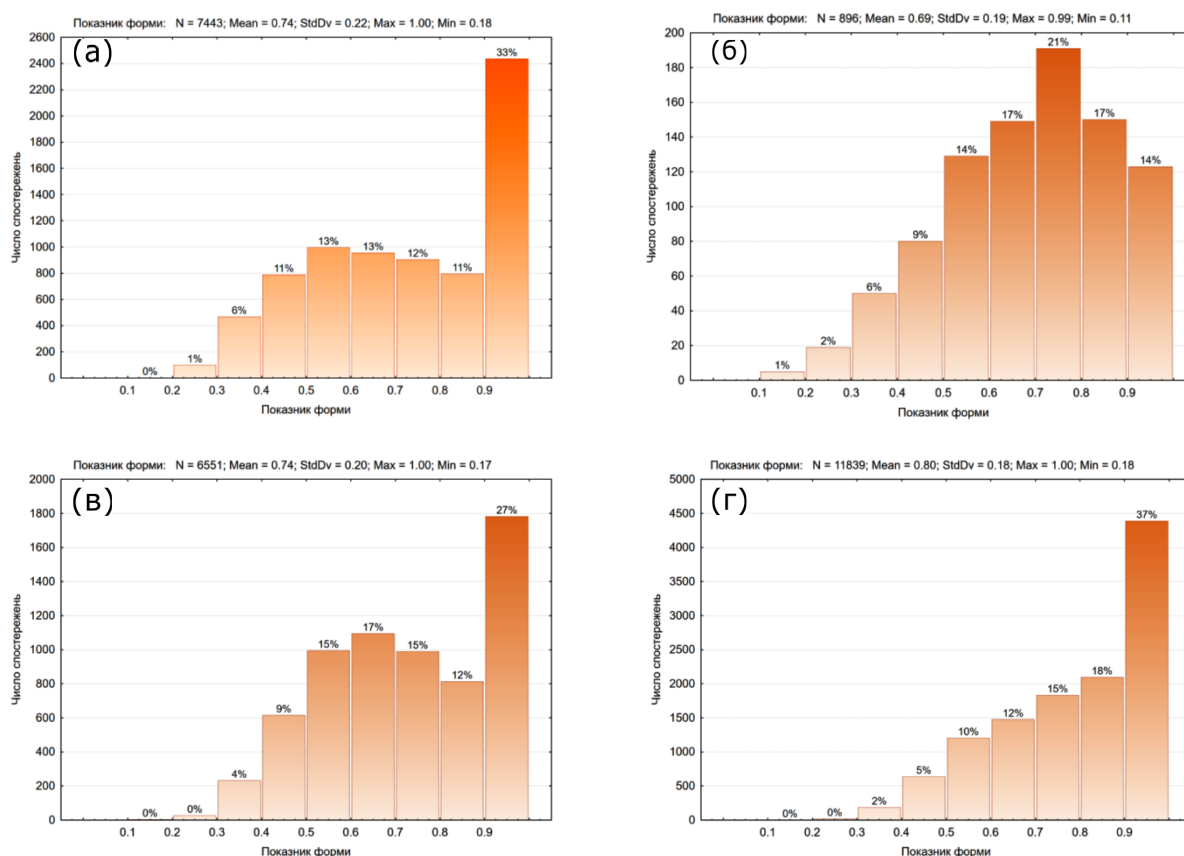


Рис. 4. Гістограми розподілу частинок адсорбентів за показником форми: а – вуглецевий адсорбент «Möbius»; б – глина марки ПТІКА; в – сажка марки DF-100; г – колоїдно-графітовий препарат марки С-1

Для всіх досліджених вуглецевих адсорбентів характерний схожий характер розподілу (рис. 4, *a, в, з*). Виражена та найбільша за кількістю фракція (27-37 %) відповідає частинкам з формою близькою до округлої ( $SF > 0.9$ ). В той же час для глинистого адсорбенту ГПМ (рис. 4, *б*) кількість таких частинок більш ніж у 2 рази менша (14 %), а найбільша фракція (21 %) відповідає частинкам з  $SF$  в інтервалі 0,7-0,8. Таку помітну анізотричність частинок ГПМ можна пояснити специфічною будовою частинок та агрегатів глинистих мінералів [22; 23].

Статистична обробка підтверджує що найменші значення середньо арифметичних, медіанних та модальних значень  $SF$  частинок спостерігається для глинопорошку ГПМ монтморилонітового типу (0,69; 0,71; 0,97, відповідно), що свідчить про їх високу однорідність. Середні значення показника форми та характер розподілу за цим показником для глинопорошку ГПМ можуть вказувати на певну анізотричність частинок. Коефіцієнт варіації показника форми найбільший для МБ зразку (30 %), що свідчить про суттєву неоднорідність адсорбенту за формою частинок. У той же час найменші значення коефіцієнтів варіації (22,5 %) та осциляції (1,0) спостерігаються для зразку колоїдно-графітового препарату КГП, що свідчить про найвищу однорідність розподілу частинок за показником форми для цього типу адсорбенту. Це, в свою чергу може забезпечити вищу ефективність сорбції в технологіях водоочищення. Підтвердженням цьому є отримані авторами результати визначення сорбційних властивостей волокнистих матеріалів, наповнених глиною монтморилонітового типу [24].

Як було зазначено вище, дисперсність адсорбенту визначає активну питому площу поверхні, яка приймає участь в процесах адсорбції. З цієї точки зору, найбільш прийнятними адсорбентами для технологій водоочищення можна визначити колоїдно-графітовий препарат КГП марки С-1 та глинопорошок ГПМ монтморилонітового типу марки П<sub>1</sub>Т<sub>1</sub>КА.

**Висновки.** Виконано порівняльний морфометричний аналіз частинок різних типів і марок адсорбентів вітчизняного виробництва. Встановлено, що характер розподілу частинок досліджених типів адсорбентів за еквівалентним діаметром ( $D_e$ ) залежить від типу зразка, та може ускладнюватися процесами агрегації частинок. Найбільші величини середньоарифметичних та медіанних значень  $D_e$  спостерігаються для зразку сажі (6,6 та 5,0 мкм), а найменші – для вуглецевого адсорбенту МБ (6,0 та 3,0 мкм) та колоїдно-графітового препарату КГП (4,7 та 3,6 мкм) зразків.

Показано, що для всіх досліджених вуглецевих адсорбентів характерний схожий характер розподілу за показником форми  $SF$ . Виражена та найбільша за кількістю фракція (27-37%) відповідає частинкам з формою, наближеною до округлої ( $SF > 0,9$ ). Водночас для глинопорошку ГПМ монтморилонітового типу кількість таких частинок менша більш ніж у двічі (14 %), а найбільша фракція (21 %) відповідає частинкам з  $SF$  в інтервалі 0,7-0,8.

Найбільш прийнятними адсорбентами для процесів водоочищення можна вважати колоїдно-графітовий препарат КГП марки С-1 та глинопорошок ГПМ монтморилонітового типу марки П<sub>1</sub>Т<sub>1</sub>КА. Для першого зразку спостерігаються найменші значення коефіцієнтів варіації (22,5 %) та осциляції (1,0), що свідчить про найвищу однорідність розподілу частинок за показником форми для цього типу адсорбенту. Це, у свою чергу, може забезпечити вищу ефективність сорбції в технологіях водоочищення.

Використання методу оптичної поляризаційної мікроскопії в поєднанні з морфометричним аналізом частинок дозволяє обґрунтовано підійти до вибору марки адсорбентів для їх застосування в технологіях водоочищення. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть бути направлені на процеси поверхневої модифікації частинок адсорбентів для підвищення їх питомої ємності та селективної здатності.



**Список використаних джерел**

1. Kennedy K. Selected Adsorbents for Removal of Contaminants from Wastewater: Towards Engineering Clay Minerals / K. Kennedy, K. Maseka and M. Mbulo // *Open Journal of Applied Sciences*. – 2018. – № 8. – Pp. 355-369. – Accede mode: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2018.88027>.
2. Kümmerer K. The Presence of Pharmaceuticals in the Environment Due to the Human Use / K. Kümmerer // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – № 90. – Pp. 2354-2366. – Accede mode: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.023>.
3. Pedersen T. Contamination of Water and Soil by Sewage and Water Treatment Sludge / T. Pedersen. – 1997. – Accede mode: <http://extoxnet.orst.edu/faqs/safedrink/sewage.htm>.
4. Ali M. E. Conventional to Nano-Green Adsorbents for Water Pollution Management: A Review / M. E. Ali, M. Ullahb, S.B.A. Hamid // *Advanced Materials Research*. – 2014. – № 925. – Pp. 674-678. – Accede mode: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.925.674>.
5. Barakat M. New Trends in Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater. [Electronic resource] / M. Barakat // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2011. – № 4. – Pp. 361-377. – Accede mode: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>.
6. Gupta V. K. Application of Low-Cost Adsorbents for Dye Removal – A Review / V. K. Gupta and Suhas // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – № 90. – Pp. 2313-2342. – Accede mode: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>.
7. Removal of Emerging Contaminants from Water and Wastewater by Adsorption Process / M. Grassi, G. Kaykioglu, V. Belgiorno, G. Lofrano // *Emerging Compounds Removal from Wastewater*, Springer, Dordrecht. – 2012. – Pp. 15-37. – Accede mode: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-3916-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-3916-1_2).
8. Bhatnagar A. Conventional and Non-Conventional Adsorbents for Removal of Pollutants from Water [Electronic resource] / A. Bhatnagar, A. Minocha // *Indian Journal of Chemical Technology*. – 2006. – № 13. – Pp. 203-217. – Accede mode: <http://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/7020/1/IJCT%2013%283%29%20203-217.pdf>.
9. Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite / M. Karnib, A. Kabbani, H. Holail, Z. Olama // *Energy Procedia*. – 2014. – № 50. – Pp. 113-120. – Accede mode: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>.
10. Sabry M. Shaheen. Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution by Zeolite in Competitive Sorption System / Sabry M. Shaheen, Aly S. Derbalah, Farahat S. Moghanm // *International Journal of Environmental Science and Development*. – 2012. – Vol. 3. – № 4. – Pp. 362-367. – Accede mode: <https://doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.248>.
11. Duan C. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: a review / C. Duan, T. Ma, J. Wang, Y. Zhou // *Journal of Water Process Engineering*. – 2020. – № 101339. – Vol. 37. – Accede mode: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>.
12. Kołodzinska D. Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon / Kołodzinska D., Krukowska J., Thomas P. // *Chemical Engineering Journal*. – 2017. – № 307. – Pp. 353-363. – Accede mode: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.088>.
13. Asep Nandiyanto. Isotherm adsorption characteristics of carbon microparticles prepared from pineapple peel waste / Asep Nandiyanto, Gabriela Chelvina, Santiuly Girsang, Rina Maryanti et al. // *Communications in Science and Technology*. – 2020. – № 5(1). – Pp. 31-39. – Accede mode: <http://dx.doi.org/10.21924/cst.5.1.2020.176>.
14. Activated Carbon Production From Coconut Shell and Palm Kernel Shell [Electronic resource] // *Biomass Industrial Innovative Projects*. – 2017. – Accede mode: <http://biomassproject.blogspot.com/2017/02/activated-carbon-production-from.html>.
15. Adsorption extraction of chromium ions (III) with the help of bentonite clays / M. Malovanyy, O. Palamarchuk, I. Trach, H. Petruk, H. Sakalova, K. Soloviy, ... & N. Vronska // *Journal of Ecological Engineering*. – 2020. – № 21(7). – Pp. 178-185. – Accede mode: <http://dx.doi.org/10.12911/22998993/125545>.
16. Preparation of Environmentally Friendly Adsorbent Using Oil Palm Boiler Ash, Bentonite and Titanium Dioxide Nanocomposite Materials [Electronic resource] / N. Bukit, E. M. Ginting, E. Frida & B. F. Bukit // *Journal of Ecological Engineering*. – 2020. – № 23(12). – Pp. 75-82. – Accede mode: <https://doi.org/10.12911/22998993/155020>.

17. Ecology, Science, Efficiency, Möbius [Electronic resource]. – Accede mode: <http://www.mobius.ua/en/index.html>.

18. PJSC “Dashukivsky Bentonites” – a leading Ukrainian manufacturer of products from bentonite and paligorskite clays. – Accede mode: <http://dash-bent-pjsc.com>.

19. Pérez J. M. M. Image processing with ImageJ [Electronic resource] / Pérez J. M. M., Pascau J. // Packt Publishing Ltd. – 2013. – Accede mode: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjet55.\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2168809](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjet55.))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2168809).

20. Порівняльний аналіз розмірних характеристик недеревних волокон різної природи / Ю. О. Будаш, Є. В. Кучеренко, В. П. Плаван, Я. В. Фещенко, О. І. Верейко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2018. – № 118(1). – Рр. 43–50. – DOI: 10.30857/1813-6796.2018.1.5.

21. Вплив процесу механічної переробки природних волокон на їх розмірні характеристики / Ю. О. Будаш, Є. В. Кучеренко, В. П. Плаван, В. О. Создана // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 6(2). – Рр. 43–50. – DOI: 10.31891/2307-5732-2018-267-6(2)-115-120.

22. Bergaya F. Handbook of clay science [Electronic resource] / F. Bergaya, G. Lagaly // Newnes. – 2013. – Accede mode: <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-clay-science/bergaya/978-0-08-099364-5>.

23. Визначення розмірних характеристик частинок глинопорошків як нанонаповнювачів полімерних композицій / Ю. О. Будаш, В. І. Ступа, М. В. Лубська, К. В. Пушкаренко, І. П. Силенок // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2019. – № 138(5). – Рр. 122-131. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.5.14>.

24. Дослідження сорбційних властивостей волокнистих матеріалів, модифікованих глинистими мінералами [Електронний ресурс] / Н. В. Тарасенко, В. П. Плаван, Ю. О. Будаш, І. М. Ткаченко // Технології та інжиніринг. – 2021. – № 140(3). – С. 70-78. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.7>.

### References

1. Kennedy, K., Maseka, K. and Mbulo, M. (2018). Selected Adsorbents for Removal of Contaminants from Wastewater: Towards Engineering Clay Minerals. *Open Journal of Applied Sciences*, 8, 355-369. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2018.88027>.

2. Kümmerer, K. (2009). The Presence of Pharmaceuticals in the Environment Due to the Human Use. *Journal of Environmental Management*, 90, 2354-2366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.023>.

3. Pedersen, T. (1997). Contamination of Water and Soil by Sewage and Water Treatment Sludge. <http://extoxnet.orst.edu/faqs/safedrink/sewage.htm>.

4. Ali, M.E., Ullahb, M. and Hamid, S.B.A. (2014). Conventional to Nano-Green Adsorbents for Water Pollution Management: A Review. *Advanced Materials Research*, 925, 674-678. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.925.674>.

5. Barakat, M. (2011). New Trends in Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4, 361-377. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>.

6. Gupta, V.K., & Suhas (2009). Application of Low-Cost Adsorbents for Dye Removal – A Review. *Journal of Environmental Management*, 90, 2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>.

7. Grassi, M., Kaykioglu, G., Belgiorno, V., & Lofrano, G. (2012). Removal of Emerging Contaminants from Water and Wastewater by Adsorption Process. *Emerging Compounds Removal from Wastewater*, Springer, Dordrecht, 15-37. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-3916-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-3916-1_2).

8. Bhatnagar, A. and Minocha, A. (2006). Conventional and Non-Conventional Adsorbents for Removal of Pollutants from Water. *Indian Journal of Chemical Technology*, 13, 203-217. <http://nopr.niscares.in/bitstream/123456789/7020/1/IJCT%2013%283%29%20203-217.pdf>.

9. Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., & Olama, Z. (2014). Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite. *Energy Procedia*, 50, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>.

10.Sabry, M. Shaheen, Aly S. Derbalah, Farahat S. Moghanm. (2012). Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution by Zeolite in Competitive Sorption System. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(4). <https://doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.248>.

11.Duan, C., Ma, T., Wang, J., Zhou, Y. (2020). Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: a review. *J. Water Process Eng.*, 37, 101339. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>.

12.Kołodynska, D., Krukowska, J., & Thomas, P. (2017). Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon. *Chemical Engineering Journal*, 307, 353–363. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.088>.

13.Rina Maryanti at all (2020). Isotherm adsorption characteristics of carbon microparticles prepared from pineapple peel waste Asep Nandiyanto, Gabriela Chelvina Santiuly Girsan. *Communications in Science and Technology*, 5(1), 31-39. <http://dx.doi.org/10.21924/cst.5.1.2020.176>.

14.Biomass Industrial Innovative Projects. (2017). *Activated Carbon Production From Coconut Shell and Palm Kernel Shell*. <http://biomassproject.blogspot.com/2017/02/activated-carbon-production-from.html>.

15.Malovanyy, M., Palamarchuk, O., Trach, I., Petruk, H., Sakalova, H., Soloviy, K., ... & Vronska, N. (2020). Adsorption extraction of chromium ions (III) with the help of bentonite clays. *Journal of Ecological Engineering*, 21(7). <http://dx.doi.org/10.12911/22998993/125545>.

16.Bukit, N., Ginting, E. M., Frida, E., & Bukit, B. F. (2022). Preparation of Environmentally Friendly Adsorbent Using Oil Palm Boiler Ash, Bentonite and Titanium Dioxide Nanocomposite Materials. *Journal of Ecological Engineering*, 23(12), 75-82. <https://doi.org/10.12911/22998993/155020>.

17.Ecology, Science, Efficiency, Möbius. URL: <http://www.mobius.ua/en/index.html>.

18.PJSC “Dashukivsky Bentonites” – a leading Ukrainian manufacturer of products from bentonite and paligorskite clays]. <http://dash-bent-pjsc.com>.

19.Pérez, J. M. M., & Pascau, J. (2013). Image processing with ImageJ. Packt Publishing Ltd. [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjet55.\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2168809](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjet55.))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2168809).

20.Budash, Yu. O., Kucherenko, Ye. V., Plavan, V. P., Feshchenko, Ya. V., & Vereiko, O. I. (2018). Porivnialnyi analiz rozmirnykh kharakterystyk nederevnykh volokon riznoi pryrody [The influence of the process of mechanical processing of natural fibers on their dimensional characteristics]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii Tekhnichni nauky – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Series Technical sciences*, 118(1), 43-50. DOI: 10.30857/1813-6796.2018.1.5.

21.Budash, Yu. O., Kucherenko, Ye. V., Plavan, V. P., Sozdana, V. O. (2018). Vplyv protsesu mekhanichnoi pererobky pryrodnykh volokon na yikh rozmirni kharakterystyky [The influence of the process of mechanical processing of natural fibers on their dimensional characteristics]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, (6(2)), 115-120. doi: 10.31891/2307-5732-2018-267-6(2)-115-120.

22.Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). Handbook of clay science. Newnes. <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-clay-science/bergaya/978-0-08-099364-5>.

23.Budash, Yu. O., Stupa, V. I., Lubska, M. V., Pushkarenko, K. V., & Sylenok, I. P. (2019). Vyznachennia rozmirnykh kharakterystyk chastynok hlynoporoshkiv yak nanonapovniuvachiv polimernykh kompozytsii [Determination of dimensional characteristics of clay powder particles as nanofillers of polymer compositions]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii Tekhnichni nauky – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Series Technical sciences*, 138(5), 122-131. <http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.5.14>.

24.Tarassenko, N.V., Plavan, V.P., Budash, Yu.O., Tkachenko, I.M. (2021). Doslidzhennia sorbtsiinykh vlastyvostei voloknystykh materialiv, modyfikovanykh hlynystymy mineralamy [Investigation of sorption properties of fibrous materials modified with clay minerals]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technology and engineering*, 140(3), 70-78. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.7>.

Отримано 24.09.2022

**Yurii Budash<sup>1</sup>, Viktoriia Plavan<sup>2</sup>, Natalia Tarasenko<sup>3</sup>,  
Olena Ishchenko<sup>4</sup>, Roksolana Petrunko<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers

Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [budash.yo@knutd.edu.ua](mailto:budash.yo@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8718-1577>

ResearcherID: [H-6012-2018](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577). SCOPUS Author ID: [9134072100](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577)

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers

Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [plavan.vp@knutd.edu.ua](mailto:plavan.vp@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962). SCOPUS Author ID: [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

<sup>3</sup>Assistant of the Department of General and Inorganic Chemistry

KPI National Technical University named after I. Sikorskyi (Kyiv, Ukraine)

graduate student of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers

Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [tarasenko.nv@ukr.net](mailto:tarasenko.nv@ukr.net). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1062-5533>. ResearcherID: [I-7632-2017](https://orcid.org/0000-0003-1062-5533)

<sup>4</sup>Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers

Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [ishhenko.ov@knutd.com.ua](mailto:ishhenko.ov@knutd.com.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>

Researcher ID: [GYV-0809-2022](https://orcid.org/0000-0002-9510-6005). SCOPUS Author ID: [57200013816](https://orcid.org/0000-0002-9510-6005)

<sup>5</sup>Master's Student of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers

Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [ktpthv@knutd.edu.ua](mailto:ktpthv@knutd.edu.ua)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF DIMENSIONAL CHARACTERISTICS FOR PARTICLES OF HYBRID AND MINERAL ADSORBENTS FOR WATER PURIFICATION PROCESSES

*In the work, a comparative morphometric analysis of various types of domestic adsorbents intended for use in water purification technologies is performed. Four types of adsorbents were investigated: «Möbius» carbon adsorbent, P<sub>1</sub>T<sub>1</sub>KA clay powder of the montmorillonite type, DG-100 carbon black, C-1 colloidal graphite preparation.*

*Morphometric analysis of adsorbent particles was carried out by the method of optical polarization microscopy («Biolam» brand microscope). Photomicrographs of particles pre-dispersed in the immersion liquid were obtained using a digital camera with a high-resolution matrix. Quantitative assessment of the sizes of adsorbent particles was carried out by the method of digital image analysis (ImageJ software package). The area and perimeter of individual particles were determined and their equivalent diameter and shape index were calculated. Statistical processing of experimental data was carried out using the «Statistica» software package.*

*It was established that the nature of the distribution of particles of the investigated types of adsorbents in terms of equivalent diameter depends on the type of sample, and may be complicated by the processes of particle aggregation.*

*It is shown that a similar nature of distribution is observed for all investigated carbon adsorbents according to the shape index. The pronounced and largest fraction (27-37%) corresponds to particles with a shape close to round. The most acceptable adsorbents for water purification processes can be considered a colloidal graphite preparation and clay powder of the montmorillonite type, for which there is a higher homogeneity of the distribution of particles according to the shape indicator. This, in turn, can provide higher sorption efficiency in water treatment technologies.*

*The application of the method of optical polarization microscopy in combination with the morphometric analysis of particles makes it possible to reasonably approach the selection of the brand of adsorbents for their use in water purification technologies. Further research in this direction can be directed to the processes of surface modification of adsorbent particles to increase their specific capacity and selective ability.*

**Keywords:** adsorbent; morphometric analysis; equivalent diameter; shape index; water treatment.

Fig.: 4. Table: 6. References: 24.