

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОЧЕТОВ МИКИТА СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 504.06:628.477:663.93

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ**  
**ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА ТА**  
**СПОЖИВАННЯ КАВИ**

Спеціальність 101 – Екологія  
Галузь знань 10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



М.С. Кочетов

Наукові керівники:

Тихомирова Тетяна Сергіївна

Кандидат технічних наук, доцент

Черкашина Ганна Миколаївна

Кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Кочетов М.С.* Розробка та впровадження екологічно безпечної технології утилізації виробництва та споживання кави. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 «Екологія» (10 – Природничі науки) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2026.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

*Об'єктом дослідження* є процес екологічно безпечного управління та утилізації відходів кавової індустрії.

*Предмет дослідження* – екологічні, організаційні та фізико-хімічні засади технологій рециклінгу кавовмісних відходів.

Дисертаційне дослідження присвячене розв'язанню науково-практичної задачі зменшення екологічного навантаження відходів кавової індустрії шляхом розробки комплексної системи їх утилізації та вторинного використання.

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Показано, що проблема поводження з кавовими відходами не обмежується лише питанням утилізації органічної сировини, а пов'язана з ширшим комплексом екологічних, технологічних, економічних та соціальних чинників. До таких чинників належать глобалізація кавової торгівлі, просторовий розрив природних біогеохімічних циклів, концентрація органічних відходів у великих містах, зростання обсягів відходів пакування та недостатній рівень локальної інфраструктури для рециклінгу

*У першому розділі* проаналізовано світові тенденції та еколого-технологічні аспекти поводження з відходами кавової індустрії. Розглянуто

вплив глобалізаційних процесів на територіальний розподіл утворення кавових відходів, показано, що сучасна модель споживання кави супроводжується переміщенням органічної речовини з країн вирощування до країн споживання, де вона накопичується у вигляді відпрацьованої кавової гущі та супутніх відходів. Проаналізовано розвиток ринку кави в Україні, зокрема вплив імпорту зеленого зерна, поширення локального обсмажування та зростання кількості кав'ярень на формування децентралізованих потоків кавових відходів. Визначено основні екологічні ризики, пов'язані з накопиченням кавової гущі та кавової луски, серед яких анаеробне розкладання з утворенням парникових газів, формування фільтратів, локальне закислення ґрунтів, потенційна фітотоксичність, забруднення каналізаційних систем ліпідними компонентами та збільшення частки складноперероблюваного пакування. Систематизовано основні напрями вторинного використання відходів обсмаження та споживання кави, включаючи біологічні, механічні, хімічні та матеріальні способи валоризації.

У *другому розділі* описано матеріали та методи дослідження. Основними об'єктами стали відходи кавової індустрії (гуща, луска), мильні основи, ґрунтові субстрати, текстиль та біополімерні матриці, для яких наведено детальну фізико-хімічну характеристику. Застосовано комплекс стандартизованих та спеціальних методик для оцінки екологічних (фітотоксичність, здатність до біорозкладання), фізико-механічних і технологічних властивостей досліджуваних зразків. Достовірність результатів підтверджено методами математичної статистики.

У *третьому розділі* виконано еколого-технологічне обґрунтування напрямів утилізації відпрацьованої кавової гущі у комунальному та сільському господарстві. Встановлено, що головним обмеженням для її використання є висока вологість і швидкий розвиток плісняви, що зумовлює необхідність стабілізації сировини шляхом сушіння. Доведено доцільність застосування конвекційного методу в закладах харчування, зокрема із залученням залишкового тепла промислового пекарського обладнання. Досліджено

ефективність висушеної кавової гущі як природного абразивного наповнювача у мильних композиціях для видалення складних забруднень. Встановлено, що технологічні та очищувальні властивості таких засобів залежать від типу мильної основи, вмісту, дисперсності та рівномірності розподілу наповнювача в матриці.

Проаналізовано перспективи використання ВКГ як антислизького агенту для відкритих територій у зимовий період. Показано, що завдяки структурі частинок вона підвищує коефіцієнт тертя на засніжених і обмерзлих поверхнях. Водночас визначено експлуатаційні обмеження (ризик стійкого забарвлення текстилю через наявність олій та пігментів), що звужує сферу доцільного застосування агенту виключно до відкритих вуличних просторів.

У *четвертому розділі* досліджено перспективи використання відпрацьованої кавової гущі як екологічного наповнювача для біорозкладних полімерних композитів. Розглянуто технологічні передумови введення лігноцелюлозної органічної сировини у полімерні матриці, зокрема питання сумісності гідрофільної кавової гущі з полімерним середовищем, впливу розміру частинок, вологості та попередньої підготовки наповнювача на властивості композиту. Проаналізовано фізико-хімічні характеристики кавової гущі, що визначають її поведінку у складі полімерних матеріалів, а також вплив органічного наповнювача на технологічні, структурно-механічні та експлуатаційні властивості біорозкладних композицій. Показано, що використання кавової гущі у складі таких матеріалів може сприяти зменшенню частки первинної полімерної сировини, підвищенню ресурсної ефективності та формуванню нових напрямів матеріальної валоризації кавових відходів.

*П'ятий розділ* присвячено розробці та обґрунтуванню модель утилізації відходів виробництва та споживання кави в умовах циркулярної економіки. Показано, що для сфери HoReCa найбільш доцільним є поетапний підхід, за якого кав'ярні виступають первинними вузлами роздільного збирання, стабілізації та підготовки кавових відходів до подальшого використання. Запропонована модель передбачає окремий збір кавової гущі, її сушіння



різними методами, використання у складі мильних композицій, компостів, біополімерних матеріалів або як антислизького агенту, а також повторне використання джутових мішків з-під кави у соціальних, волонтерських, аграрних чи дизайнерських напрямках. Встановлено, що складні багат шарові пакувальні матеріали, зокрема окремі типи капсул та дріп-пакетів, можуть бути спрямовані на рециклінг лише за наявності налагодженої системи сортування; за її відсутності вони залишаються відходами, що підлягають видаленню або захороненню.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше розроблено схему локального екологічно безпечного управління відходам виробництва та споживання кави, яка відповідає ієрархії управління відходами та забезпечує мінімізацію екологічного навантаження на урбанізовані території;
- вперше розроблено енергозберігаючу технологію дегідратації відходів споживання кави з використанням вторинних теплових ресурсів, що дозволяє запобігти її неконтрольованому мікробіологічному розпаду та емісії парникових газів;
- вперше встановлено закономірності зміни фізико-механічних та водно-фізичних параметрів ґрунтів за умов довготривалого внесення кавовмісних відходів, що дозволило науково обґрунтувати межі їхнього екологічно безпечного використання як ґрунтових меліорантів;
- удосконалено наукові засади створення екологічно безпечних очищаючих засобів шляхом заміни синтетичних абразивів на відпрацьовану кавову гущу певного гранулометричного складу;
- набули подальшого розвитку науково-практичні засади екологічно безпечної утилізації відходів кавової індустрії шляхом їх використання у складі здатних до біорозкладання полімерних композицій.

*Ключові слова:* кавова гуща, відходи, поводження з відходами, сталий розвиток, сільськогосподарські відходи, зменшення відходів, енергія з

відходів, харчові відходи, циркулярна економіка, композити, ґрунт, компост, біодеградація, модифікація, переробка

## ABSTRACT

*Kochetov M. S.* Development and implementation of an eco-friendly recycling technology for coffee production and consumption waste. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 101 "Ecology" (10 – Natural Sciences) – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2026.

The dissertation research was carried out at the Chemical Engineering and Industrial Ecology Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

*The research object* encompasses environmentally safe management and utilization processes regarding coffee industry waste.

*The research subject* covers environmental, organizational, and physicochemical principles behind coffee-containing waste recycling technologies.

This dissertation aims to solve a scientific and practical problem: reducing environmental impacts caused by coffee industry waste through developing a comprehensive utilization and secondary use system.

*The introduction* substantiates the topic's relevance, defining the research goal, objectives, object, and subject, while outlining the scientific novelty and practical significance regarding the obtained results. It demonstrates that coffee waste management extends beyond mere organic raw material disposal, involving a broader set encompassing environmental, technological, economic, and social factors. These factors include coffee trade globalization, spatially disrupted natural biogeochemical cycles, and massive organic waste concentration within large cities. Furthermore, growing packaging waste volumes alongside insufficient local recycling infrastructure exacerbate this issue.

*The first chapter* analyzes global trends and eco-technological aspects regarding coffee industry waste management. The globalization impact on territorial coffee waste generation distribution is examined. The modern coffee consumption

model involves transferring organic matter from producing countries to consuming nations, where it accumulates as spent coffee grounds and associated waste. Ukrainian coffee market development is analyzed, specifically highlighting green bean import influences, local roasting expansion, and coffee shop proliferation on decentralized coffee waste streams. Primary environmental risks associated with spent coffee grounds and coffee silverskin accumulation are identified. These include anaerobic decomposition producing greenhouse gases, leachate formation, and local soil acidification. Additional risks involve potential phytotoxicity, sewer system contamination by lipid components, and an increasing share regarding hard-to-recycle packaging. Main avenues for secondary coffee roasting and consumption waste utilization are systematized, encompassing biological, mechanical, chemical, and material valorization methods.

*The second chapter* describes the research materials and methods. Primary objects include coffee industry waste (spent coffee grounds, coffee silver skin), soap bases, soil substrates, textiles, and biopolymer matrices. A detailed physicochemical characterization is provided for these materials. A standardized and specialized technique set was applied to evaluate environmental (phytotoxicity, biodegradability), physical-mechanical, and technological properties characterizing the studied samples. Result reliability is confirmed using mathematical statistics methods.

*The third chapter* provides an eco-technological rationale for utilizing spent coffee grounds within municipal and agricultural sectors. High moisture content and rapid mold development act as main limitations against its utilization, necessitating raw material stabilization through drying. Applying convective methods in food service establishments proves feasible, particularly by recovering residual heat from industrial baking equipment. Dried spent coffee ground effectiveness as a natural abrasive filler in soap compositions designed to remove stubborn stains is investigated. Technological and cleansing properties characterizing these products depend on soap base types, alongside filler content, dispersion, and uniform matrix distribution.

Prospects regarding spent coffee ground application as an outdoor anti-slip agent during winter are analyzed. Thanks to their particle structure, they increase friction coefficients on snow-covered and icy surfaces. Simultaneously, operational limitations are identified (persistent textile staining risks due to oils and pigments), restricting appropriate agent application exclusively to open street spaces.

*The fourth chapter* explores prospects for utilizing spent coffee grounds as eco-friendly fillers inside biodegradable polymer composites. Technological prerequisites for introducing lignocellulosic organic raw materials into polymer matrices are examined. Specifically, compatibility between hydrophilic spent coffee grounds and polymer environments is addressed, alongside particle size, moisture, and preliminary filler preparation influences on composite properties. Physicochemical characteristics dictating spent coffee ground behavior within polymer materials are analyzed. Furthermore, organic filler impacts on technological, structural-mechanical, and operational properties regarding biodegradable compositions are evaluated. Using spent coffee grounds inside such materials can reduce virgin polymer raw material shares. This approach enhances resource efficiency and establishes new avenues for material coffee waste valorization.

*The fifth chapter* develops and substantiates a utilization model covering coffee production and consumption waste within a circular economy framework. For the HoReCa sector, a phased approach is most appropriate, where coffee shops act as primary nodes facilitating separate collection, stabilization, and coffee waste preparation for subsequent use. The proposed model involves separate spent coffee ground collection and subsequent drying using various methods. These grounds are then used inside soap compositions, composts, biopolymer materials, or as an anti-slip agent. Additionally, jute coffee bags are reused for social, volunteer, agricultural, or design purposes. Complex multilayer packaging materials, such as specific capsule types and drip bags, can only be recycled if a well-established sorting system exists. Without it, they remain waste destined for disposal or landfilling.

The scientific novelty characterizing the obtained results is as follows:

- for the first time, a local environmentally safe management scheme covering coffee production and consumption waste has been developed; this scheme complies with waste management hierarchies and ensures minimized environmental impacts on urbanized areas;
- for the first time, an energy-saving dehydration technology targeting coffee consumption waste using secondary heat resources has been developed, preventing its uncontrolled microbiological decomposition and greenhouse gas emissions;
- for the first time, patterns characterizing changes within soil physical-mechanical and hydro-physical parameters under long-term coffee-containing waste application have been established; this allowed scientific substantiation regarding limits for their environmentally safe use as soil ameliorants;
- scientific principles underlying environmentally safe cleaning agent creation have been improved by replacing synthetic abrasives with spent coffee grounds having a specific granulometric composition;
- scientific and practical principles concerning environmentally safe coffee industry waste utilization have been further developed through their incorporation into biodegradable polymer compositions.

*Keywords:* Spent coffee grounds, waste, waste management, sustainable development, agricultural waste, waste reduction, waste to energy, food waste, circular economy, composites, soil, compost, biodegradation, modification, recycling.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, які відображають основні наукові результати дисертації.*

1. Лебедєв В. В., Мірошніченко Д. В., Тихомирова Т. С., Савченко Д. О., Мазченко М. В., Мисяк В. Р., Кочетов М. С., Соловей Л. В. Дослідження гібридних екологічно безпечних біодеградабельних композитів на основі полілактиду, кавової гущі та гумінових речовин. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 4. С. 46–54. <https://doi.org/http://doi.org/10.20998/2078-5364.2022.4.05>

2. Тихомирова Т. С., Шестопапов О. В., Разно М. Р., Кочетов М. С. Дослідження впливу складу компосту на його здатність покращувати якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 72–78. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.12>

3. Тихомирова Т. С., Кочетов М. С. Дослідження впливу відходів обсмаження та споживання кави на якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2025. № 29. С. 155–161. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.29.25>

4. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Використання кавової гущі у складі очищаючих засобів як елемент сталого управління відходами. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 3. С. 132–141. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.3.12>

5. Шестопапов О.В., Цейтлін М.А, Крючкова В.В., Кочетов М.С. Дослідження можливості вторинного використання мішків для транспортування кави в системі циркулярної економіки. *Екологічні науки*. № 5 (62), ч. 2. С. 122-128. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.20>

6. Кочетов М.С., Черкашина Г.М. Дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 4. С. 125-134. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.4.11>

*Опубліковані праці апробаційного характеру*

7. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Пріоритетні напрямки використання залишків виробництва та споживання кави. *Євроінтеграція екологічної політики України* : матеріали четвертої Всеукр. наук.-практ. конф., м. Одеса, 25 жовтня 2022 р. Одеса : ОДЕУ, 2022. С. 110.

8. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Перспективи використання відходів споживання кави в якості антислизького агенту. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, м. Харків, 14–16 грудня 2022 р. Харків : НТУ «ХП», 2022. С. 339.

9. Кочетов М. С., Сахнюк Д. М. Використання залишків пакування кави для виготовлення маскувального одягу як елемент сталого розвитку України під час війни. *Екологічна безпека держави* : тези доп. 17-ї Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 20 квітня 2023 р. Київ : НАУ, 2023. С. 12–13.

10. Кочетов М. С. Вплив пересувних кав'ярень на урбоекосистему. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України* : матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., до дня пам'яті Ф. В. Стольберга, Харків, 02–03 листопада 2023 р. Харків, 2023. С. 37–38.

11. Кочетов М. С., Васильєв М. І. Використання залишків споживання кави в сільському господарстві. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. 31-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, м. Харків, 17–20 травня 2023 р. Харків : НТУ «ХП», 2023. С. 353.

12. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Дослідження впливу відходів споживання кави на рівень рН ґрунтів. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 16 травня 2024 р. Харків : НУЦЗУ, 2024. С. 306–307.

13. Кочетов М. С., Разно М. Р. Дослідження впливу складу компосту на родючість ґрунтів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія,*



*освіта, здоров'я* : тези доп. 32-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2024, 22–25 травня 2024 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 362.

14. Кочетов М. С., Косенкова І. Д. Довгостроковий вплив кавової гущі на властивості ґрунтів. *Консолідація заради майбутнього: наукові здобутки вчених задля перемоги та післявоєнної відбудови України* : зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та спеціалістів, 29 серпня 2024 р. Полтава, 2024. С. 14–16.

15. Кочетов М. С. Використання відходів споживання кави для отримання біопалива: перспектив для України. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 18-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 19–22 листопада 2024 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 662–663.

16. Адашевський О. В., Кочетов М. С. Дослідження потенціалу використання харчових відходів в якості компонентів палива. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 14 травня 2025 р. Харків : НУЦЗУ, 2025. С. 338–339.

17. Кочетов М. С., Бутко В. С. Стале управління відходами пакування зеленого кавового зерна. *Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування* : матеріали Міжнар. наук. конф., 14–15 травня 2025 р. Харків, 2025. С. 218–219.

18. Кочетов М. С., Пітак Р. О. Дослідження процесів розвитку плісневих грибів на відходах споживання кави. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. 33-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14–17 травня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 438.

19. Tykhomyrova T., Kochetov M., Pavlenko R. Kariev A., Kopylov S., Vitalii Lavryk V., Masikevych Yu. Environmentally Safety Biodegradable Composites Based On Renewable Biopolymer Materials And Coffee Grounds: Mechanical and Dielectric Properties. 2025 *IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2025. P.1-4.

20. Крючкова В.В., Кочетов М.С. , Тихомирова Т.С., Шестопапов О.В. Мішківина як відновлюваний ресурс у системі циркулярної економіки: екологічний та технологічний потенціал. *XIX Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»*, 19–21 листопада 2025 року: матеріали конференції. Харків, 2025. С. 678 -679.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1 СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ЕКОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ КАВОВОЇ ІНДУСТРІЇ.....	14
1.1 Вплив глобалізації на територіальний розподіл та динаміку утворення відходів кавової індустрії.....	14
1.2 Аналіз ринку кави в Україні.....	20
1.3 Вплив відходів виробництва та споживання кави на компоненти екосистем .....	23
1.4 Основні напрямки вторинного використання відходів обсмаження та споживання кави.....	26
1.5 Обґрунтування напрямку досліджень .....	35
1.6 Висновки до розділу 1.....	39
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	40
2.1 Матеріали досліджень .....	40
2.2 Методи дослідження властивостей кавової гущі.....	45
2.3 Методики дослідження властивостей мильних композицій.....	47
2.4 Методи дослідження впливу кавової гущі на ґрунти .....	50
2.5 Методика дослідження здатності до очищення текстильних матеріалів, забруднених кавовою гущею.....	52
2.6 Методика дослідження основних властивостей полімерних композиційних матеріалів.....	53
2.7 Методики визначення товщини та міцносних характеристик джутових матеріалів.....	56
2.8 Методика обробки результатів досліджень .....	57
2.9 Висновки до розділу 2.....	58

РОЗДІЛ 3	ЕКОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	
НАПРЯМКІВ	УТИЛІЗАЦІЇ КАВОВИХ ВІДХОДІВ У	59
КОМУНАЛЬНОМУ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....		
3.1	Дослідження процесів сушіння кавової гущі.....	59
3.2	Дослідження можливості використання кавової гущі у складі очищаючих засобів.....	70
3.3	Дослідження використання кавової гущі та кавової луски у сільському господарстві .....	79
3.4	Дослідження перспектив використання кавової гущі в якості антислизького агенту .....	88
3.5	Висновки до розділу 3.....	91
РОЗДІЛ 4	ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ	
ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КАВОВОЇ ГУЩІ ЯК ЕКОЛОГІЧНОГО		93
НАПОВНЮВАЧА ДЛЯ БІОРОЗКЛАДНИХ КОМПОЗИТІВ.....		
4.1	Технологічні основи використання кавової гущі у складі полімерних матеріалів .....	93
4.2	Дослідження фізико-хімічних характеристик кавової гущі.....	98
4.3	Дослідження технологічних та експлуатаційних властивостей біорозкладних композитів, наповнених кавовою гущею .....	104
4.4	Висновки до розділу 4.....	117
РОЗДІЛ 5	ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ	
ВІДХОДАМИ КАВОВОЇ ІНДУСТРІЇ НА ПРИНЦИПАХ		119
ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ.....		
5.1	Обґрунтування засад циркулярної економіки як чинника сталого розвитку сфери виробництва та споживання кави.....	119
5.2	Соціально-комунікативна роль кав'ярень у системі екологічного просвітництва та поширення циркулярних товарів	122
5.3	Комплексна характеристика супутніх відходів виробництва та споживання кави та перспективи їх рециклінгу.....	125
5.4	SWOT аналіз розробленої моделі управління відходами	139

виробництва пакування та споживання кави.....	
5.5 Висновки до розділу 5.....	144
ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	148
Додаток А.....	166
Додаток Б.....	170
Додаток В.....	171
Додаток Г.....	172
Додаток Д.....	173

## ВСТУП

**Актуальність теми.** За останні 120 років кава перейшла з категорії елітного напою, який був дорогим та доступним лише обраним, до категорії напою, який можна приготувати як власноруч на домашній кухні, так й придбати у різноманітних за місцем розташування та цінової категорію кав'ярнях або інших закладах харчування. Причинами такої різкої зміни є як соціокультурні та економічні чинники, так й феномен глобалізації, який значно знизив ціну на каву завдяки міжнародній логістиці. Окремо слід виділити маркетингові кампанії великих мережових кав'ярень, наприклад Starbucks, Costa Coffee, Tim Hortons які зумовили кардинальну зміну світових споживчих звичок. Агресивні маркетингові стратегії транснаціональних мереж перетворили каву з фізіологічного стимулятора на потужний соціокультурний конструкт та маркер соціального статусу. Масштабування феномену «кави з собою» (coffee to-go) стимулює неперервне гіперспоживання продукту поза межами базової фізіологічної потреби людини.

Стрімке зростання обсягів споживання кави призвело до зростання обсягів утворених відходів, які супроводжують весь процес приготування та споживання кавового напою. Враховуючі, що кавовмісні відходи за своїм походженням мають органічну природу, вони не асоціюються з екологічною небезпекою та вважаються більшість населення такими, які не потребують спеціальних методів поводження з ними. Насправді, накопичення на полігонах кавової гущі та відходів виробництва кави – кавової луски або silver skin, має значний негативний вплив на довкілля, який переважно проявляється в утворенні полігонного газу з переважаючим вмістом у ньому метану, одного з головних парникових газів. Додатковим чинником негативного впливу кавових відходів на локальні екосистеми є їхня специфічна еколого-хімічна інвазивність. Оскільки кавове дерево є рослиною екваторіальних та тропічних широт, відходи його переробки містять комплекс біологічно активних сполук (високі концентрації кофеїну, хлорогенової кислоти, специфічних танінів), які

є еволюційно чужорідними (алохтонними) наприклад, для ґрунтів помірного кліматичного поясу європейського континенту. Потрапляючи у невластиве їм природне середовище під час стихійного захоронення, ці багатотоннажні відходи діють надзвичайно агресивно. Вони чинять потужний алелопатичний тиск на місцеві біоценози, що проявляється у різкому локальному закисленні ґрунтів, токсичному пригніченні аборигенної ґрунтової мікрофлори та хімічному блокуванні процесів проростання насіння місцевих видів рослин.

Окрім безпосередньо кавовмісних відходів сфера виробництва та споживання кави генерує значну кількість різних за хімічною природою відходів пакування, які створюють додаткове навантаження на міські полігони. Зменшення їх обсягу можливо як за рахунок підвищення екологічної культури, так й розробці нових матеріалів, здатних до швидкої деградації на полігонах.

Для України характерною рисою є значна децентралізація місць утворення відходів споживання кави, оскільки за останні 15 років сегмент кав'ярень переважно представлена маленькими та середніми стаціонарними та пересувними унікальними закладами, кожен з яких має окремого власника. Відповідно, централізований збір та подальше вторинне використання відходів споживання кави є бажаним, але фактично не реалізуєним сценарієм. Відсутність інвестицій у сферу рециклінгу кавової луски, яка утворюється більш централізовано, також є фактичною перешкодою на шляху до сталого та екологічно безпечного поводження з даним типом відходів.

Таким чином, проблема розробки та впровадження екологічно безпечної системи утилізації відходів виробництва та споживання кави, яка враховує фактор децентралізованого їх утворення та поточний інвестиційний клімат є актуальним завданням для країни.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дане дисертаційне дослідження було виконано на кафедрі «Хімічна техніка та промислова екологія» НТУ «ХПІ», отримані дані були використані при виконанні ініціативної тематики К5306 «Розробка наукових основ управління та утилізації твердих відходів» (номер держреєстрації: 0124U001841).

Запропонована система збору, сушки та подальшого використання кавової гущі та використання кавової луски, а також соціально-екологічний вплив отриманих продуктів зі значною додатковою вартістю відповідають національній стратегії поводження з відходами, яка закріплена у Законі України «Про управління відходами» №2320-IX від 20.06.2020р, а також сприяють прогресу на національному рівні у цілях сталого розвитку, а саме: завданні 8.3 «Підвищити рівень зайнятості населення» цілі сталого розвитку №8; завданні 11.5 «Зменшити негативний вплив забруднюючих речовин у т. ч. на довкілля міст, зокрема шляхом використання інноваційних технологій» цілі сталого розвитку №11; 12.4 «Зменшити обсяг утворення відходів і збільшити обсяг їх переробки та повторного використання на основі інноваційних технологій та виробництв» цілі сталого розвитку №12.

**Мета і задачі дослідження.** Дисертаційне дослідження спрямоване на розв’язання актуальної науково-практичної задачі екологічної безпеки, пов’язаної з управлінням відходами кавової індустрії. Основний акцент зроблено на вирішенні проблеми багатотонного накопичення твердих органічних залишків виробництва та споживання кави завдяки розробці екологічно безпечної технології їхньої комплексної утилізації та повернення у виробничий цикл як цінної вторинної сировини.

Для досягнення поставленої мети необхідно послідовно на основі системного підходу вирішити наступні теоретичні та практичні завдання:

- проаналізувати соціокультурні та економічні чинники інтенсифікації споживання кави і дослідити закономірності просторового накопичення супутніх відходів в умовах урбанізованих територій;
- провести комплексну оцінку екологічної небезпеки полігонного захоронення відходів кавової індустрії з метою обґрунтування імперативності впровадження нових технологій їхньої утилізації;
- обґрунтувати еколого-технологічні параметри низькоенергоємного процесу термічної стабілізації відпрацьованої кавової гущі з метою запобігання її мікробіологічному псуванню;



- провести комплексну еколого-агрохімічну оцінку наслідків безпосереднього внесення неферментованих кавових відходів на структурно-механічні властивості та загальний агроекологічний стан ґрунтів;
- встановити кореляційну залежність між дисперсністю відпрацьованої кавової гущі та мийною здатністю екологічно безпечних композицій на її основі;
- науково обґрунтувати еколого-технологічну доцільність використання відпрацьованої кавової гущі як наповнювача для біорозкладних полімерів та дослідити експлуатаційні властивості отриманих екокомпозитів;
- науково обґрунтувати та розробити комплексну модель екологічно безпечного управління децентралізованими потоками відходів споживання кави в умовах урбанізованих територій.

*Об'єктом дослідження* є процес екологічно безпечного управління та утилізації відходів кавової індустрії.

*Предмет дослідження* - екологічні, організаційні та фізико-хімічні засади технологій рециклінгу кавовмісних відходів.

**Методи дослідження.** Для визначення гранулометричного складу кавової гущі використовували ваговий ситовий метод. Для визначення очисної здатності миючих засобів з додаванням кавової гущі була розроблена власна шкала оцінки, яка базувалась на візуальній фіксації зменшення різних типів забруднення в залежності від тривалості миття та температури води під час процесу. Для визначення довгострокового впливу внесення відходів виробництва та споживання кави на фізиком-механічні та гідрофізичні властивості ґрунту використовували лабораторний метод визначення коефіцієнту фільтрації. Форму частинок зразків кавової гущі та кавового лушпиння, візуальне підтвердження розвитку плісневих грибів аналізували за методом мікроскопії та проводили за допомогою електронного мікроскопа Digital Microscope HD color CMOS Sensor.

Хімічний склад розроблених полімерних композицій з додаванням відходів споживання кави досліджували за допомогою інфрачервоної

спектроскопії. Для визначення основних технологічних характеристик полімерних композиційних матеріалах використовували гідростатичний метод, для визначення стійкості зразків полімерних композицій до дії вологого середовища використовували прискорений метод визначення коефіцієнту дифузії. Дослідження здатності полімерних композиційних матеріалів з додаванням кавової гущі до біологічного розкладання проводили методом лабораторної ґрунтової інкубації (із подальшим гравіметричним контролем втрати маси зразків).

Математична обробка результатів, побудова тривимірних графіків проводилась за допомогою програмного забезпечення SoftStatistica v6.0, для візуальної інтерпретації розроблених схем та блок-схеми використовували інструменти програмного забезпечення Microsoft Office Visio. В якості допоміжних інструментів обробки даних використовували інструменти програмного забезпечення Microsoft Office Excel.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше розроблено схему локального екологічно безпечного управління відходам виробництва та споживання кави, яка відповідає ієрархії управління відходами та забезпечує мінімізацію екологічного навантаження на урбанізовані території;
- вперше розроблено енергозберігаючу технологію дегідратації відходів споживання кави з використанням вторинних теплових ресурсів, що дозволяє запобігти її неконтрольованому мікробіологічному розпаду та емісії парникових газів;
- вперше встановлено закономірності зміни фізико-механічних та водно-фізичних параметрів ґрунтів за умов довготривалого внесення кавовмісних відходів, що дозволило науково обґрунтувати межі їхнього екологічно безпечного використання як ґрунтових меліорантів;
- удосконалено наукові засади створення екологічно безпечних очищаючих засобів шляхом заміни синтетичних абразивів на відпрацьовану кавову гущу певного гранулометричного складу;

- набули подальшого розвитку науково-практичні засади екологічно безпечної утилізації відходів кавової індустрії шляхом їх використання у складі здатних до біорозкладання полімерних композицій.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані наукові та практичні результати стали основою для розроблення екологічно безпечної схеми локального управління відходами виробництва та споживання кави в Україні, яка відповідає ієрархії відходів та дозволяє зменшити обсяги таких відходів на полігонах шляхом їх використання в якості вторинної сировини. Розроблені композиції очищаючих засобів та біорозкладних полімерних композицій з високим вмістом відходів споживання кави дозволяють отримати якісну продукцію з низькою собівартістю та можуть бути використані в якості елементів сталих практик у кав'ярнях.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія» НТУ «ХПІ» при підготовці студентів спеціальності E2 «Екологія» та G2 «Технології захисту навколишнього середовища», в тому числі при викладанні таких освітніх компонентів як «Екологічні засади сталого розвитку», «Агроекологія», «Комплексне управління відходами» тощо.

Розроблені рекомендації щодо поводження з відходами обсмаження кави використовуються у підприємницькій діяльності ФОП Ківа Є.О; рекомендації щодо поводження з відпрацьованою кавовою гущею використовуються у закладах громадського харчування ФОП Копилов Д.В.

### **Особистий внесок здобувача.**

Здобувач особисто провів заплановані наукові та практичні дослідження за темою дисертаційної роботи та визначив основні положення, які виносяться на захист. Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто та в співавторстві опубліковані у публікаціях (Додаток А):

1) фахові видання України:

[1] – здобувачу належить проведення дослідницького пошуку на тему світових тенденцій в галузі розробки нових композицій біорозкладних

полімерів. Співавторами: Лебедєв В.В. провів експериментальні дослідження сумісності кавової гущі та полімерних матриць; Мірошніченко Д.В. провів технічний аналіз бурого вугілля; Тихомирова Т.С. провела дослідження показнику плинності розтопу розроблених композицій; Савченко Д.О. провів дослідження ударної в'язкості розроблених композицій, Мазченко М. В. провела дослідження біодеградабельності розроблених полімерних композицій, Мисяк В. Р. визначив температур топлення розроблених композицій, Соловей Л. В. систематизовано отримані дані;

[2] – здобувачем надано дані щодо утворення відходів кавової гущі на деокупованих територіях та проаналізовано вміст відходів кави на рН ґрунтів. Співавторами: Тихомирова Т.С. проведено літературний пошук за темою дослідження; Шестопапов О.В. систематизовано отримані дані; Разно М.Р. досліджено впливу компостів різного складу на його здатність підвищувати родючість ґрунтів;

[3] – здобувачем особисто проведені дослідження з довготривалого впливу внесення кавовмісних відходів на родючість ґрунтів та систематизовано отримані дані. Співавторами: Тихомирова Т.С. проведено літературний пошук за темою дослідження;

[4] – здобувачем особисто розроблено рецептуру очищаючих засобів та експериментально досліджено їх властивості. Тихомирова Т.С. проведено літературний пошук за темою дослідження;

[5] – здобувачем особисто досліджено можливість вторинного використання мішків з-під транспортування кави та проведено дослідження характеристик та властивостей джутового волокна у різних умовах. Співавторами: Шестопапов О.В. проведено літературний пошук за темою дослідження; Цейтлін М.А систематизовано отримані дані; Крючкова В.В. розроблено схему життєвого циклу мішків з-під кави;

[6] – здобувачем особисто проведені дослідження властивостей біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі. Співавторами: Черкашина Г.М. проведено

літературний пошук за темою дослідження;

2) інші видання апробаційного характеру

[7] – здобувачем визначено пріоритетні напрямки використання залишків виробництва кави;

[8] – здобувачем досліджено наслідки використання кави в якості антислизького агенту на стан екосистеми;

[9] – здобувачем проаналізовано перспективи використання залишків пакування кави для виготовлення маскувального одягу;

[10] – здобувачем досліджено вплив пересувних кав'ярень на урбоекосистему;

[11] – здобувачем досліджено вплив залишків споживання кави на агроекосистеми;

[12] – здобувачем досліджено вплив відходів споживання кави на рівень рН ґрунтів;

[13] – здобувачем досліджено вміст окремих фракцій у компості;

[14] – здобувачем систематизовано дані щодо довгострокового впливу кавової гущі на властивості ґрунтів;

[15] – здобувачем проаналізовано перспективи використання відходів споживання кави для отримання біопалива;

[16] – здобувач особисто дослідив технологічні перепони для використання кавовмісних відходів в якості компонентів палива;

[17] – здобувачем розроблено схему сталого управління відходами пакування зеленого кавового зерна;

[18] – здобувачем досліджено динаміку розвитку плісневих грибів на поверхні кавової гущі;

[19] – здобувачем досліджено біодеградабельність розроблених полімерних композицій, наповнених кавовою гущею;

[20] – здобувачем проведена екологічна та технологічна оцінка мішковина як відновлюваного ресурсу у системі циркулярної економіки.

**Апробація результатів роботи.** Матеріали дисертації доповідались та

обговорювались на всеукраїнських та міжнародних конференціях: 4-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Євроінтеграція екологічної політики України» (м. Одеса, 2022 р.); XVI, XVIII, XIX Міжнародній науково-практичній конференції магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених» (м. Харків, 2022, 2024, 2025 рр.); 17-ї Всеукраїнській науково-практичній конференції «Екологічна безпека держави» (м. Київ, 2023 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет конференції «Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України» (м. Харків, 2023 р.); XXXI, XXXII, XXXIII Міжнародній науково-практичній конференції MicroCAD «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2023–2025 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2024, 2025 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та спеціалістів «Консолідація заради майбутнього: наукові здобутки вчених задля перемоги та післявоєнної відбудови України» (м. Полтава, 2024 р.); Міжнародній науковій конференції «Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування» (м. Харків, 2025 р.); Міжнародній конференції IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (м. Харків, 2025 р.).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 6 статей, що входять до переліку наукових фахових видань МОН України, 14 тез доповідей всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференцій.

### **Структура і обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи викладено на 165 сторінках, обсяг основного тексту – 147 с. 39 рисунків за текстом, 46 таблиць за текстом, список використаних джерел з 159 найменування на 19 сторінках та 5 додатків на 9 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ЕКОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ КАВОВОЇ ІНДУСТРІЇ

#### 1.1 Вплив глобалізації на територіальний розподіл та динаміку утворення відходів кавової індустрії

Глобалізаційні процеси, виступаючи рушійною силою трансформації світових ресурсних циклів, зумовлюють глибокі зміни в економічних, політичних та соціокультурних структурах окремих держав. Водночас традиційне трактування глобалізації виключно як механізму економічної інтеграції виробництв та капіталів є обмеженим, оскільки воно не дозволяє повною мірою оцінити детермінований цими процесами вплив на стан навколишнього природного середовища та трансформацію відходів [1–3].

Вплив глобалізаційних процесів на стан довкілля має чітко виражений суперечливий характер. З одного боку, інтенсифікація транскордонних зав'язків та виробництва стала каталізатором низки масштабних екологічних криз, а з іншого – саме формування єдиного світового простору створює необхідне підґрунтя для консолідації зусиль міжнародної спільноти та впровадження уніфікованих інструментів природоохоронної діяльності [4]. Систематизуючи дані багатьох дослідників, можна виділити наступні глобальні екологічні проблеми, які прямо чи опосередковано викликані глобалізаційними процесами [2–6]:

1) глобальний транспортний вуглецевий слід та зміна клімату – трансатлантична доставка товарів та сировини, яка здійснюється судами та літаками є найпотужнішим джерелом викидів парникових газів;

2) екологічний демпінг та перенесення забруднень – транснаціональні корпорації переносять екологічно небезпечні етапи виробництва або видобуток сировини у країни, що розвиваються (де екологічне законодавство не таке суворе), залишаючи чистими країни-

споживачі;

3) виснаження ресурсів та деградація екосистем «Глобального Півдня» – масовий світовий попит на певні товари (каву, какао боби, сою, пальмову олію) стимулює вирубування тропічних лісів, виснаження водних ресурсів та деградацію ґрунтів у країнах-експортерах заради розширення плантацій;

4) трансфер відходів через розрив природних ресурсних циклів – ресурси вилучаються з екосистеми на одному континенті, а у вигляді відходів накопичуються на іншому, тобто відходи більше не повертаються туди, де вони утворилися.

Фундаментальним технічним підґрунтям глобалізації став науково-технічний прогрес, зокрема винахід парового двигуна (Т. Ньюкомен, 1712 р.) та двигуна внутрішнього згоряння (Е. Ленуар, 1860 р.), що забезпечили механізацію виробництва та революцію у транспортній логістиці. Водночас у науковій літературі [4, 7–9] виділяють й інші історичні передумови глобалізаційних процесів: від військово-торговельної експансії античних імперій та функціонування Великого шовкового шляху до епохи Великих географічних відкриттів, які сформували перші транскордонні зв'язки.

Щорічно зростає у всьому світі споживання кави є одним з найяскравіших прикладів впливу глобалізації на культурно-соціальну сферу життя всього людства. Безперервна еволюція глобальної торгівлі та логістики перетворила каву з локального ендемічного ресурсу на один із наймасовіших транскордонних товарів. Унаслідок цього багатомісячного процесу відбувся глобальний просторовий розрив природного біогеохімічного циклу: органічна речовина вилучається з екосистем екваторіальних країн, переміщується на тисячі кілометрів та акумулюється у вигляді багатотонних відходів в урбанізованих центрах країн-споживачів. Отже, глобалізація породила проблему "відірваних від ґрунту" біовідходів (зокрема кавової гущі), що зумовлює гостру потребу у впровадженні систем їх локального децентралізованого рециклінгу (рис.1.1) [10, 11]. Основні біогенні елементи у





а



б

а – до глобалізаційна модель; б – глобалізаційна модель

Рисунок 1.1 – До глобалізаційна та глобалізаційна моделі поводження з кавовою сировиною

структурі кавової ягоди розподіляються не рівномірно, що стає причиною негативного впливу на довкілля при сучасній глобалізаційній моделі споживання кави [12–14]. Кавова пульпа (м'яка оболонка кавової ягоди) утримує значну частку калію (до 3,5 % сухої маси) й саме кавова пульпа залишається в зоні вирощування як в доглобалізаційній (рис.1.1а) так й в

глобалізаційній моделі (рис.1.1б), але найбільш цінні для родючості ґрунту елементи – азот та фосфор – акумулюються саме в зеленому зерні, яке й є основним експортним продуктом (табл. 1.1). Оскільки концентрація азоту в експортованому зерні майже вдвічі перевищує його вміст у пульпі традиційна практика залишення оболонки на плантації не здатна компенсувати швидке вилучення біогенних елементів (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Вміст основаних біогенних елементів у різних частинах плоду кавового дерева [12–14]

Елемент	Вміст, % сухої маси	
	у зеленому зерні	у кавовій пульпі
Азот (N)	3,00–3,5	1,20–1,8
Фосфор (P)	0,30–0,40	0,10–0,25
Калій (K)	1,50–1,80	2,50–3,50

Глобалізаційна модель також призводить до зростання експорту кавового зерна й появи нових негативних екологічних наслідків. Частина з них пов'язаних з викидами парникових газів при транспортуванні зелених кавових зерен, а інша – з розривом природного вуглецевого циклу. В автентичних екосистемах органічна маса кавових насаджень бере участь у процесах гуміфікації, забезпечуючи депонування вуглецю в ґрунті. Натомість у сучасній парадигмі мільйони тонн органічного вуглецю, акумульованого в зеленому зерні, щорічно транспортуються до урбанізованих центрів. Після екстракції напою цей вуглецевий масив у вигляді кавової гущі потрапляє на муніципальні полігони твердих побутових відходів. В умовах анаеробного розкладу на сміттєзвалищах біогенний вуглець трансформується не в ґрунтовий гумус, а в метан – парниковий газ, глобальний потенціал потепління якого у десятки разів перевищує діоксид вуглецю. Таким чином, ресурсний потенціал, призначений для підтримки ґрунтової екосистеми, перетворюється на потужний антропогенний фактор кліматичних змін. Це доводить, що лінійна модель руху кавової сировини за глобалізаційною моделлю формує незворотний екологічний борг у країнах-експортерах.

Безпрецедентні масштаби глобалізації кавової індустрії чітко простежуються через стійке зростання світового споживання кави починаючи з середини XX століття (рис. 1.2) [15,16].

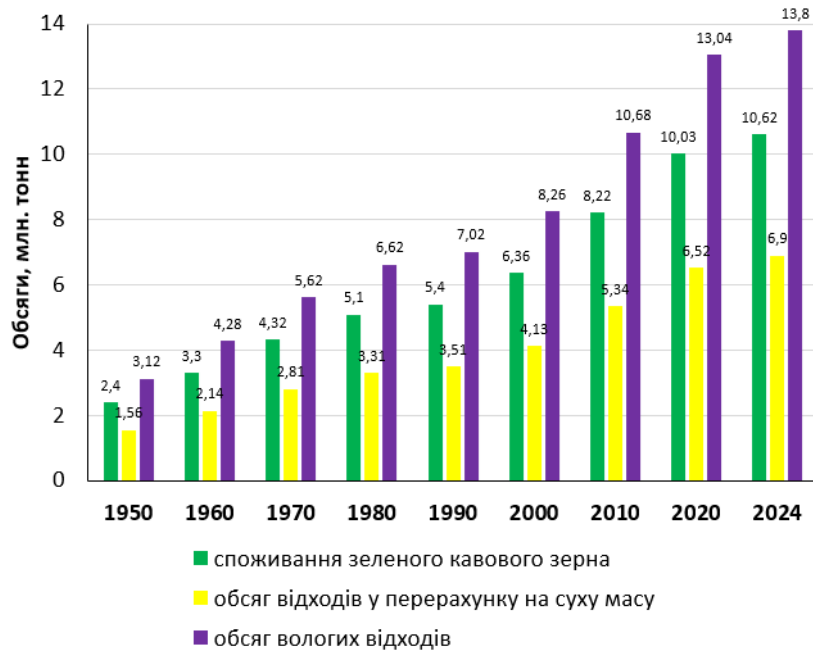


Рисунок 1.2 – Світове споживання кави та обсяги утворених відходів

Головним негативним наслідком глобалізаційної моделі поводження з кавової сировиною є накопичення відходів кавової гущі та silver skin у місцях споживання та виготовлення розчинної кави. З 1 т зеленого зерна утворюється ~0,65 т сухої кавової гущі, яка після заварювання має вологість до 60 мас.%, що призводить до утворення 1,3 – 1,5 т вологої кавової гущі, яка у більшості випадків потрапляє на полігони [17].

За останні 70 років обсяги споживання кави збільшились в 4 рази (рис.1.2), що є результатом синергетичної дії функціонально-економічних та соціокультурних факторів. З одного боку, інтенсифікація глобальної економіки та прискорення темпу життя в урбанізованих центрах сформували стійку потребу населення у фізіологічних стимуляторах для підтримання високої продуктивності, й кава у цьому випадку стала одним з легальних та базових стимулюючих продуктів. З іншого боку, процеси глобалізації трансформували каву з виключно фізіологічно необхідного продукту на потужний

соціокультурний конструкт і маркер соціального статусу. Культура споживання, що активно масштабується транснаціональними мережами, зокрема феномен «кави з собою» (coffee to-go) та перетворення кав'ярень на ключові простори для комунікації, стимулює неперервне гіперспоживання поза межами базової фізіологічної потреби. Як наслідок, ця конвергенція економічного ритму та нав'язаної культури престижу призводить до того, що колосальні обсяги відпрацьованої кавової гущі щоденно й невідворотно акумулюються як відходи на полігонах великих міст, суттєво поглиблюючи просторову екологічну диспропорцію [11,16].

Додатковим наслідком глобалазаційної моделі поводження з кавовою сировиною є т.з. «кавовий парадокс», який окрім суто економічних наслідків має й додатковий негативний вплив на навколишнє природне середовище. З економічної точки зору сутність «кавового парадоксу» полягає у тому, що виробники кави на Глобальному Півдні отримують мінімум прибутку, тоді як корпорації на Півночі заробляють мільярди на перепродажі тієї ж сировини у вигляді готового продукту. Країни-виробники залишаються на початковому щаблі ланцюга (сировинному, з низьким прибутком), а європейські країни контролюють вищі щаблі (високотехнологічна переробка, брендинг, роздрібна торгівля), де формується найбільша додана вартість (табл. 1.2) [15,18,19].

Таблиця 1.2 – Експорт кави у грошовому еквіваленті [15,18,19]

Країна	Статус на глобальному ринку	Вартість експорту, млрд дол. США, у період		Основний вид експортованої продукції
		2019	2023	
Бразилія	Виробник	4,55	7,40	Зелене зерно (арабіка та робуста)
В'єтнам		2,41	3,38	Зелене зерно (переважно робуста)
Колумбія		2,62	2,91	Зелене зерно (мита арабіка)
Гондурас		1,06	1,70	Зелене зерно
Індонезія		0,88	0,93	Зелене зерно, частково розчинна кава
Швейцарія	Реекспорт	2,51	3,60	Смажена кава, преміальні капсули
Німеччина		2,37	3,41	Смажена кава, купажі, кава без кофеїну
Італія		1,75	2,60	Смажена кава
Бельгія		0,85	1,31	Смажена кава, реекспорт зеленого зерна
Франція		1,24	1,27	Смажена та розчинна кава

Реекспорт готового кавового продукту – обсмаженої кави, розчинної кави, кавових купажів тощо – є причиною наступного додаткового негативного впливу на навколишнє природне середовище:

1) збільшення вуглецевого сліду через логістику – через подвійний експорт кава долає десятки тисяч зайвих кілометрів на вантажних суднах та автомобілях. Транспортування сировини в один кінець світу, а потім розвезення готової продукції в інший, супроводжується значними викидами парникових газів;

2) проблема надмірного пакування – перевезення зеленого зерна відбувається у великих джутових мішках, цей вид пакування вважається достатньо екологічним. Натомість експорт готової європейської продукції вимагає складного індивідуального пакування: багатошарової фольги, пластику, скла та алюмінію (зокрема для популярних кавових капсул). Більшість із цих матеріалів складно переробляти, що призводить до зростання обсягів відходів пакування;

3) енергоємність виробництва – промислове обсмажування, декофеїнізація та створення розчинної кави (особливо методом сухого заморожування) потребують значних витрат електроенергії та водних ресурсів на європейських заводах. Поодинокі випадки використання відходів кави як енергоресурсу не здатне кардинально вирішити дану проблему.

Найбільшими експортерами серед країн, які не вирощують каву на своїй території, є Швейцарія, Німеччина, Італія. Слід відзначити, що Швейцарія у 2023 р., не будучи країною-виробником кави, експортувала кави на суму, більшу ніж В'єтнам або Колумбія, де під каву відведені тисячі гектарів землі (табл. 1.2).

## 1.2 Аналіз ринку кави в Україні

Відлік історії масового споживання кави на території сучасної України починається у м. Кам'янці-Подільському. Після захоплення міста у 1672р.

Османською імперією та виникають кав'ярні як елемент традиційної турецької культури, яка поступово проникає й в українську культуру [20]. Подальший розвиток культури споживання кави на території сучасної України пов'язаний з м. Львів, який наприкінці XVIII – у XIX столітті увійшов до складу Габсбурзької монархії (Австрійської імперії). Період радянської влади пов'язаний з занепадом культури споживання кави, оскільки натуральна кава або якісна розчинна кава була дефіцитним продуктом, не доступним для більшості. Відповідно, культура «ранкової кави» стала поступово повертатися у домівки українців лише у 1990х роках, а справжній розквіт культури споживання натуральної кави та формування нових кавових традицій припадає на період після 2010 року.

Щорічне зростання імпорту кави в Україну після 2010 року (рис.1.3а) [21] є наслідком дії комплексів факторів, а саме:

1) нульове мито ввезення зеленого кавового зерна – на рівні держави зелена каву була прирівняна до базової сільськогосподарської сировини, яка не вирощується в Україні через кліматичні умови, що дозволило встановити повну та пільгову ставку ввізного мита на рівні 0%. Нульова ставка мита на ввіз зеленого кавового зерна зберігається станом на кінець 2025 р. [22];

2) впровадження та стабільне функціонування спрощеної системи оподаткування, обліку та звітності для фізичних осіб-підприємців. Зокрема, можливість використання 2-ї групи платників єдиного податку (з низькою фіксованою ставкою, що становить 20% від мінімальної заробітної плати) для роздрібних кав'ярень, а також 3-ї групи (зі ставкою 5% від доходу) для підприємств із локального обсмажування та гуртового продажу кави. Це суттєво знизило початкові витрати на організацію бізнесу, мінімізувало витрати на ведення бухгалтерії та зумовило вибухове зростання кількості кав'ярень третьої хвилі по всій країні, особливо у великих містах

3) інтеграція України у культурний простір ЄС та відновлення власних традицій, що зумовлює формування культури споживання кави й зростання попиту на неї.

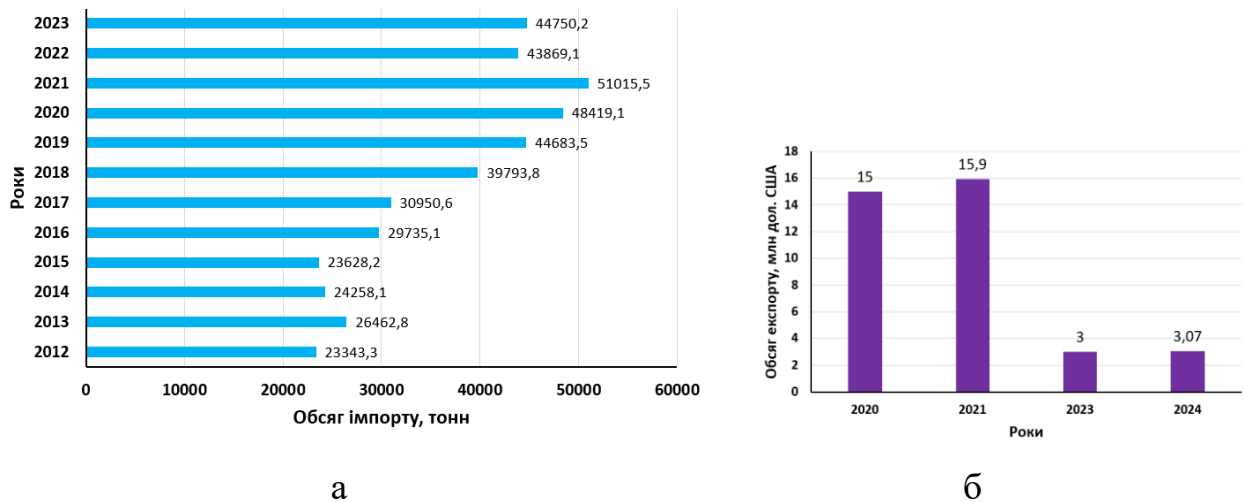


Рисунок 1.3 – Імпорт зеленого кавового зерна в Україну та експорт кави з України у 2012 – 2023 рр. [23,24].

Одночасно зі зростанням обсягів імпорту зеленого кавового зерна в Україну спостерігається поступове зростання експорту з України кави (рис.1.3б), при цьому до 27% експорту займає обсмажена кава, а решта – дрібні партії зеленої кави [23, 24]. До 2022 року динаміка експорту кави з України свідчила про поступову інтеграцію у глобальний процес «реекспорту з доданою вартістю», що мало позитивний вплив для економіки, адже країна отримувала валютну виручку за продаж товарів, а не сировини. З початком повномасштабного вторгнення та ведення активних бойових дій на значній території України експорт кави з України зменшився у 5 разів (рис.1.3б), але має тенденцію до поступового зростання.

Спрощена система оподаткування (ФОП) призвела не тільки до розвитку ринку споживання та обсмаження кави, що має позитивні соціальні та економічні наслідки, а й значно ускладнила управління кавовмісними відходами. Майже повна децентралізація точок споживання кави – стаціонарні та пересувні кав'ярні, призвело до того, що тисячі власників через відсутність доступної інфраструктури роздільного збору та віднесення кавової гущі до IV класу відходів фактично передають її на захоронення на полігони разом з іншими компонентами утвореного побутового сміття, збільшуючи

навантаження на міські полігони. Відходи виробництва, а саме обсмаження кави (silver skin) утворюється більш централізовано, адже підприємців, які займаються обсмаженням набагато менше, ніж кав'ярень, проте й цей тип відходів майже у повному обсязі потрапляє на полігони в Україні [25, 26].

### 1.3 Вплив відходів виробництва та споживання кави на компоненти екосистем

Життєвий цикл кавового напою починається з плантації, де вирощують кавове дерево та найближчих до плантацій територій, де відбувається очищення кавової вишні від зовнішньої оболонки. Окрім вказаних на рис. 1.16 локальних екологічних проблем, при вирощуванні кавових дерев та первинної обробки плодів можна додатково виділити наступні [27–29]:

- 1) вирубка тропічних лісів, які виконували, в тому числі, роль затінювачів для кавових дерев, призводить також до значної водної ерозії ґрунтів, адже відсутність потужних коренів дерев-затінювачів пришвидшує процеси вимивання гумусу з ґрунту в умовах тропічних злив;
- 2) вирощування кавових дерев без дерев-затінювачів на промислових плантаціях призводить до збільшення їх вразливості шкідниками (наприклад, кавовим жуком-бурильником) та хвороб (кавової іржі), що в свою чергу призводить до використання агресивних пестицидів;
- 3) забруднення ґрунтових вод внаслідок вимивання хімікатів поверхневим стоком. Це призводить до хімічного забруднення локальних водоносних горизонтів та евтрофікації прилеглих відкритих водойм;
- 4) виснаження локальних водних ресурсів внаслідок зміни клімату та збільшення періоду посух;
- 5) надмірні локальні викиди метану внаслідок розкладання відходів первинної обробки кави – м'якої оболонки кавової вишні (кавової пульпи) на звалищах або при недостатньому аераційному компостуванні;
- 6) надмірне надходження оксидів азоту (450–525 мг/м<sup>3</sup>) при спалюванні таких відходів, як кавова луска та пергаментна оболонка, які



утворюються на стадіях сушки кавового зерна, та розглядається як джерело альтернативного палива або спалюється з метою зменшення обсягів даного типу відходів.

Негативний вплив відходів виробництва та споживання кави на екосистему у більшості випадків пов'язаний з їх накопиченням на полігонах або несанкціонованих звалищах та відсутністю ефективних методів вторинного використання (рис.1.4).



Рисунок 1.4 – Вплив відходів обсмаження та споживання кави на екосистему

Забруднення ґрунтів та ґрунтових вод меланоїдинами є наразі недостатньо дослідженою проблемою, масштаб якої часто недооцінюється під час оцінки впливу кавових відходів на довкілля. Меланоїдини, що утворюються за реакцією Маяра під час обсмажування кави та концентруються в кавовій лусці (silver skin), є стійкими високомолекулярними сполуками [30]. Їхня поведінка у ґрунтах та ступінь контамінації ґрунтових вод майже не враховуються під час аналізу екологічних ризиків від захоронення кавових відходів (рис.1.4).

Ліпідне забруднення ґрунтових вод та труб міської каналізації виникає

внаслідок наявності у кавовій гущі, за різними оцінками, до 15 – 22 мас.% кавової олії, яка не переходить з кави у напій. Вимиваючись у ґрунтові води або потрапляючи у каналізаційні системи (наприклад, якщо гущу змивають у раковину), ці нерозчинні ліпіди утворюють плівку, що блокує кисневий обмін, та сприяють утворенню фатбергів – великих агрегатів з жиру від харчових продуктів, залишків пластмас, тканини тощо які стають причиною непрохідності труб (рис.1.4). Децентралізоване змивання кавової гущі у великій кількості у міську каналізацію збільшує кількість випадків утворення фатбергів.

Некомпостовані відходи кавової гущі мають високу кислотність та містять значну кількість поліфенолів, дубильних речовин і залишків кофеїну. При прямому потраплянні у ґрунт у великих обсягах вони діють як інгібітори: пригнічують проростання насіння інших рослин, порушують природний ґрунтовий мікробіом та можуть призводити до локального закислення і деградації земель [26, 31, 32].

Негативний вплив на атмосферу відходів виробництва, а саме обсмаження та споживання кави більшість дослідників [27, 28, 33–35] пов'язують з викидами парникових газів, точніше полігонного газу, який складається переважно з метану й утворюється при захороненні кавової гущі на полігоні замість її компостування. Це пов'язано з тим, що під товщею іншого сміття на полігонах твердих побутових відходів створюються анаеробні (безповітряні) умови, за яких розкладання органіки відбувається не шляхом окислення, а шляхом метаногенезу.

Концентрація часток кавової луски (silver skin) є важливим параметром для повітря робочої зони цехів з обсмаження кави, тоді як для у сукупності факторів пилового забруднення повітря урбанізованих територій її внесок не виділяють, класифікуючи як органічний пил. Такий підхід є виправданим, адже у більшості випадків silver skin накопичується у бункерах апаратів для обсмаження та передається на захоронення у мішках, не потрапляючи у повітря.

## 1.4 Основні напрямки вторинного використання відходів виробництва та споживання кави

Комплекс унікальних властивостей кавової гущі та silver skin, а також фактична безкоштовність цих відходів зумовлюють широкі можливості для їх використання в якості сировини у різних напрямках, головними серед яких є агропромисловий комплекс, індустрія полімерних матеріалів та косметична галузь (рис.1.5, 1.6). Кавова гуща та кавова луска мають різний хімічний склад, а також різні фізичні характеристики, тому конкретні області їх застосування відрізняються.



Рисунок 1.5 – Основні напрямки використання кавової гущі



Рисунок 1.6 – Основні напрямки використання silver skin

Зважаючи на високий екологічний ризик неконтрольованого анаеробного розкладання кавової гущі на полігонах твердих побутових відходів, оптимальним сценарієм її утилізації є керована термохімічна та біологічна валоризація. Кавова гуща та silver skin, є цінним джерелом для виробництва біопалива та інших видів енергії. Їхнє використання відповідає принципам циркулярної економіки, сприяючи зменшенню відходів та зниженню залежності від викопних ресурсів. Дослідження [36] показують, що використання кавової гущі як біопалива для виробництва енергії (наприклад, у тригенераційних системах) значно знижує вуглецевий слід виробництва. Найефективнішим є сценарій із застосуванням тригенераційної системи, яка зменшує викиди CO<sub>2</sub> на 45,2% порівняно з традиційними методами.

Кавова гуща містить до 21,5% олії, яку можливо перетворити на біодизель шляхом переестерифікації. Використання метанолу або етанолу у присутності каталізаторів дозволяє отримати високий вихід біодизелю (до 82%) [37]. Інноваційні методи, такі як ультразвукова екстракція або застосування надкритичного CO<sub>2</sub>, підвищують ефективність процесу [38, 39]. Отриманий біодизель має низький вміст кофеїну, що зменшує викиди оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) при згорянні [40].

Після видалення олії залишки кавової гущі можуть бути перетворені на цукри за допомогою кислотного гідролізу з подальшою ферментацією за участі дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*. Цей процес дозволяє отримати біоетанол з виходом до 8,3% [41]. Однак наявність тригліцеридів та жирних кислот у необробленій кавової гущі може інгібувати ферментативний процес, тому попереднє видалення олії є необхідною технологічною стадією [42].

Кавова гуща є потенційно ефективною сировиною для анаеробного зброджування, оскільки містить вуглеводи, білки та мінерали. Використання лужної попередньої обробки (наприклад, NaOH) підвищує вихід метану до 392 мл/г летких речовин, що пов'язано з кращим розкладанням лігніну [43]. Інтегровані процеси, такі як комбінація біологічного та фізико-хімічного методів, дозволяють одночасно отримувати біодизель, лігнін та біогаз [44].

Піроліз кавової гущі при температурах 500–1000 °C у інертній атмосфері дає змогу отримати біоолію, біовугілля та синтез-газ. Оптимальні умови (наприклад, температура 250 °C та співвідношення сировини 1:1) забезпечують високий вихід біоолії та покращену якість продукту [45].

Кавові відходи можуть бути використані у сільському господарстві для виробництва добрив, біопестицидів та субстратів для вирощування грибів. Однак через високий вміст кофеїну, танінів і хлорогенових кислот, які можуть негативно впливати на ґрунт і рослини, кавові відходи потребують попередньої обробки. Наприклад, кавова гуща та silver skin можуть бути використані для виробництва біогазу або компосту після ферментації, що знижує їх токсичність [46, 47]. Також кавові відходи використовуються для культивування грибів, таких як *Pleurotus ostreatus*, де вони слугують основним субстратом, а залишки після вирощування можуть бути перероблені на добрива [48].

Кавова гуща також знаходить своє застосування як цінна вторинна сировина для харчової промисловості завдяки високому вмісту харчових волокон, білків, ліпідів та біологічно активних речовин. Завдяки своїй структурі КГ володіє чудовою водо- та маслоутримуючою здатністю, а також високою емульгуючою активністю, що дозволяє ефективно використовувати її

як природний стабілізатор та емульгатор у харчових продуктах. Зокрема, висушена та знежирена кавова гуща перетворюється на «кавове борошно», яке не містить глютену і успішно застосовується як інноваційний інгредієнт для випічки хліба, печива, тортів та інших кондитерських виробів. Крім пекарської справи, кавові відходи також знайшли своє застосування у виробництві ферментованих та дистильованих алкогольних напоїв, яким вони надають специфічних органолептичних властивостей та кавового аромату. Введення кавової гущі до рецептур значно підвищує загальну антиоксидантну здатність готових харчових продуктів за рахунок наявності у її складі поліфенолів, хлорогенової кислоти та меланоїдинів. З фізіологічної точки зору, споживання таких функціонально збагачених продуктів здійснює виражений пребіотичний ефект, сприяє формуванню здорової мікробіоти кишечника та позитивно впливає на метаболізм глюкози і контроль маси тіла. Інтеграція кавової гущі у сучасні харчові технології є дієвим інструментом циркулярної економіки, що дозволяє створювати екологічно безпечні функціональні продукти з високою доданою вартістю та доведеними терапевтичними властивостями. Також використання кавової гущі у складі харчових продуктів дозволяє досягати прогресу у цілі сталого розвитку №2 «Подолання голоду» [49, 50].

Кавова гуща у косметичній промисловості найчастіше використовується в якості абразивного компонента для м'якого відшарування мертвих шарів шкіри, який додатково має антиоксидантні властивості та сприяють звуженню пор [51, 52]. Проте, останнім часом намітилась тенденція до використання антиоксидантних властивостей компонентів кавової гущі шляхом їх екстракції для косметичних композицій. Косметична цінність хлорогенової, кавової та галової кислот, які містяться у кавовій гущі є настільки високою, що з метою їх екстракції без допомоги летких органічних сполук (метанолу) запропоновано використовувати екологічно безпечні природні глибокі евтектичні розчинники (Natural Deep Eutectic Solvents, NADES) [53]. Отримані таким чином кислоти при введенні до складу косметичних емульсій для зовнішнього застосування дозволяють отримати повністю біосумісні та

структурно стабільні креми, які здатними значно підвищувати рівень зволоженості шкіри. Також за допомогою тестування безпеки на 2D та 3D моделях клітин шкіри була доведена абсолютна відсутність цитотоксичності та здатність цієї олії значно знижувати рівень активних форм кисню у клітинах. Це науково обґрунтовує безпечність та ефективність використання ліпідів з кавової гущі як активного екологічного інгредієнта для лосьйонів, сироваток, кремів [54].

Silver skin також має потенціал використання в косметичній галузі в якості анти-вікового компонента, в тому числі її водних екстрактів [55]. Автори [55] експериментально доводять, що завдяки значній концентрації фенольних речовин, зокрема хлорогенової кислоти, такий інгредієнт успішно захищає клітини епідермісу від передчасного старіння, викликаного окислювальним стресом. Проведені *in vitro* тести підтвердили безпечність розроблених формул та відсутність цитотоксичної дії на епітеліальну тканину. Таким чином доведена доцільність впровадження технологій біорефайнінгу, які дозволяють перетворювати залишки після обсмажування кави на цінні активи згідно з принципами циркулярної економіки.

Використання кавової гущі та silver skin при синтезі полімерних матеріалів або з метою направленої модифікації їх властивостей є важливим напрямком для реалізації концепції сталого розвитку та циркулярної економіки, оскільки у підсумку дозволяє отримувати здатні до біорозкладання матеріали, що зменшує кількість відходів, які мають значний термін розкладання. Полігідроксіалканоати (РНА) є інноваційними біопластиками, які синтезуються різними штамами мікроорганізмів у вигляді внутрішньоклітинних гранул як резерв вуглецю та енергії. Вони виступають екологічно безпечною альтернативою традиційним нафтовим полімерам, оскільки відзначаються абсолютною біологічною розкладністю, високою біосумісністю та відсутністю токсичності. Широке комерційне впровадження РНА стримується високою вартістю ферментативних субстратів, проте відпрацьована кавова гуща є надзвичайно перспективною сировиною для

їхнього виробництва. Специфічні бактерії (наприклад, *Pseudomonas resinovorans* чи *Cupriavidus necator*) здатні ефективно метаболізувати кавові ліпіди через механізм  $\beta$ -окиснення жирних кислот, трансформуючи поглинутий матеріал безпосередньо у полімерну матрицю. Такий підхід до валоризації кавових відходів не лише суттєво здешевлює процес отримання біопластику, але й повною мірою відповідає принципам циркулярної економіки, вирішуючи проблему утилізації багатотоннажних органічних залишків [56, 57]. Відпрацьовану кавову гущу активно використовують як відновлюваний природний наповнювач під час створення екологічних полімерних композитів. Її введення до матриць полімолочної кислоти (PLA) чи полібутиленадипат-ко-терефталату (PBAT) допомагає скоротити частку використання синтетичних пластиків. Перед змішуванням кавові відходи ретельно висушують. Часто їх додатково знежирюють або хімічно модифікують задля покращення зчеплення між гідрофільними частинками гущі та гідрофобним полімерним середовищем. Інтеграція кавової гущі методом екструзії робить кінцевий матеріал дешевшим і термічно стабільнішим. Додавання такого лігноцелюлозного наповнювача до біорозкладних полімерів значно пришвидшує процеси їхньої мікробіологічної деструкції в природних умовах. Отримані біокомпозити успішно застосовують для виробництва екологічного пакування та філаментів під 3D-друк [58–60].

Дослідження впливу кавової гущі на властивості цементних розчинів демонструє перспективність її використання як часткової заміни дрібних заповнювачів. Додавання оптимальної кількості кавової гущі (зокрема 0,9 % від маси цементу) здатне підвищити міцність матеріалу на стиск порівняно з традиційними розчинами. Проте перевищення концентрації кавової гущі понад 3,0 % призводить до різкого зниження механічної міцності через високу водопоглинальну здатність кавових відходів, що перешкоджає повноцінній гідратації цементу. Важливою перевагою додавання кавової гущі є стабільне зниження теплопровідності цементних матеріалів зі збільшенням її частки. Це пояснюється мікропористою структурою кавової гущі, яка захоплює повітря,



діючи як ефективний природний теплоізолятор. Отже, інтеграція кавових відходів у цементні суміші може сприяти підвищенню енергоефективності будівель шляхом зменшення витрат на кондиціонування та опалення, проте вимагає точного дотримання пропорцій для збереження міцнісних характеристик [33].

Використання кавової гущі у мистецтві не можна розглядати як основний напрямок, проте він є доволі цікавим з точки зору привернення уваги до проблеми накопичення та подальшого сталого поводження з відходами споживання кави. У цьому напрямку кавова гуща стає дедалі популярнішим ресурсом і як безпечна біорозкладна альтернатива токсичним синтетичним барвникам. Висока концентрація меланоїдинів, танінів і флавоноїдів робить ці відходи потужним джерелом природних стійких пігментів. У сучасній художній практиці концентровані водні екстракти кави застосовують як екологічну акварель для створення монохромних зображень у теплих сепієвих тонах або як засіб для тонування крафтового паперу задля надання йому вінтажної текстури. Водночас саму висушену гущу художники змішують із природними смолами чи акриловими базами, отримуючи рельєфні фактурні фарби. На промисловому рівні пігменти з кавових відходів успішно впроваджують для екологічного фарбування натуральних та синтетичних текстильних волокон (шовку, бавовни, нейлону). Завдяки наявності азотистих сполук таке фарбування забезпечує тканинам не лише стійкий природний відтінок, але й виражені антибактеріальні та дезодорувальні властивості. Такий напрямок валоризації є зразковим прикладом мистецького та промислового апсайклінгу, що підтримує парадигму безвідходного виробництва [61, 62].

У загальному випадку всі методи обробки кавової гущі та *silver skin* можна поділити на механічні, хімічні та біологічні, кожен з яких має свої переваги та обмеження (табл. 1.3).

Механічні методи є найпростішими та найменш енерговитратними, але дозволяють отримувати лише базові продукти, такі як паливні брикети або

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика методів переробки кавової гущі

Критерій	Механічні методи	Хімічні методи	Біологічні методи
Принцип дії	Фізична обробка (сушіння, подрібнення, пресування)	Хімічні реакції (екстракція, гідроліз, піроліз)	Біологічні процеси (компостування, ферментація)
Енерговитрати	Низькі (01-0,5, кВт·год/кг)	Високі (2-5 кВт·год/кг)	Середні (0,5-1,5 кВт·год/кг)
Вихідні продукти	Порошки, брикети, абразиви	Олії, біопаливо, активоване вугілля	Компост, біогаз, біогумус
Час обробки	1-24 години	2-48 годин	2-8 тижнів
Капітальні витрати	Низькі (\$1000-5000)	Високі (\$10000-50000)	Середні (\$5000-15000)
Екологічний вплив	Мінімальний (відсутність хімічних відходів)	Середній (можливі токсичні побічні продукти)	Мінімальний (повна біодеградація)
Ефективність переробки	70-85 % сухої маси	80-95 % органічних компонентів	60-75 % органічної маси
Області застосування	Паливо, косметика, будівництво	Хімічна промисловість, енергетика	Сільське господарство, відновлювана енергетика

косметичні скраби. Вони ідеально підходять для малих підприємств через низьку вартість обладнання.

Хімічні методи, такі як екстракція олій або піроліз, дають більш цінні продукти, але вимагають значних енергетичних витрат і можуть супроводжуватися утворенням токсичних відходів. Наприклад, процес гідролізу для отримання біостанолу потребує кислот або лугів, що ускладнює його застосування в екологічно орієнтованих технологіях.

Біологічні методи, такі як компостування або вермікультивування, є найбільш екологічно чистими, але потребують тривалого часу для повної переробки.

Вибір методу переробки залежить від цілей використання відходів, доступних ресурсів та екологічних вимог. Комбінування різних методів

(наприклад, попереднє механічне подрібнення з подальшим біологічним компостуванням) може підвищити ефективність утилізації кавової гущі.

Більшість напрямків використання відходів споживання та виробництва кави мають не меті створення додаткової вартості (валоризації) продуктів їх рециклінгу. Більшість відомих технології створення продуктів рециклінгу таких відходів з високим ступенем валоризації є малопоширеними, в тому числі в Україні. Причинами цього є комплексна дія декількох чинників, а саме:

1) логістичні та фізичні бар'єри. Внаслідок децентралізації утворення кавової гущі організація спеціальної логістики для її збору (роздільний збір, транспорт, паливо) створює додатковий вуглецевий слід, а сама вона для тривалого зберігання потребує термічної сушки, яка є надзвичайно енергоємною, що часто зводить нанівець економічну та екологічну вигоду від її використання. Silver skin надзвичайно легка і пухка. Вона займає величезні об'єми при дуже малій масі. Це робить її транспортування економічно не вигідним (вантажівки фактично «везуть повітря»);

2) біохімічна складність. Як і будь-яка рослинна біомаса, SCG та CS складаються з міцної матриці целюлози, геміцелюлози та лігніну. Ця структура еволюційно створена так, щоб протистояти руйнуванню. Щоб мікроорганізми (дріжджі чи бактерії) могли дістатися до корисних цукрів, цю матрицю треба зруйнувати. Для цього потрібна попередня обробка (pre-treatment) – вплив кислотами, лугами, паровим вибухом або дорогими ферментами. Ті самі речовини, які роблять кавові відходи безцінними для косметології та фармакології (кофеїн, меланоїдини, хлорогенова кислота, таніни), є потужними природними антимікробними агентами. Якщо завантажити непідготовлену кавову гущу в біореактор для отримання біогазу чи біопластику, ці поліфеноли фактично вб'ють або критично пригнітять робочу мікрофлору;

3) технологічні складнощі. Складність валоризації полягає у необхідності створення багатостадійних технологічних ліній для каскадного

біорефайнінгу. Це вимагає значних капітальних інвестицій у складне обладнання (екстрактори, гідролізні апарати, біореактори), що наразі робить переробку кавових відходів менш економічно привабливою порівняно з традиційним спалюванням або захороненням.

### 1.5 Обґрунтування напрямку досліджень

Проведений аналіз світових та вітчизняних тенденцій поводження з кавовими відходами дозволяє констатувати наявність глибокого еколого-економічного протиріччя. З одного боку, відпрацьована кавова гуща та кавова луска (silver skin) є цінною біомасою з високим потенціалом для отримання енергії, біополімерів, косметичних та харчових інгредієнтів. З іншого боку, домінуюча глобалізаційна лінійна модель споживання кави призводить до їх масового захоронення на муніципальних полігонах, що перетворює цей ресурс на джерело небезпечних парникових газів (метану) та токсичних фільтратів.

Незважаючи на значну кількість теоретичних розробок, їхнє практичне впровадження в умовах українського ринку гальмується низкою невирішених організаційних та технологічних проблем, серед яких ключовими є:

1. Відсутність адаптованих моделей управління відходами для децентралізованих джерел утворення. Специфіка українського ринку полягає у майже повній децентралізації точок споживання кави (стаціонарні та пересувні кав'ярні). Власники малого бізнесу через відсутність доступної інфраструктури роздільного збору та відповідних управлінських рішень фактично змушені передавати ці відходи на захоронення. Існує гостра нестача ефективних логістичних та організаційних моделей управління, які б дозволили консолідувати ці багатотоннажні відходи та перенаправляти їх на переробку з мінімальним вуглецевим слідом та економічними витратами.

2. Потреба у розробці низько затратних технологій локальної валоризації (зокрема, у косметичній та санітарно-гігієнічній галузях). Відпрацьована кавова гуща містить цінні ліпіди (кавову олію), антиоксиданти (поліфеноли) та

має виражені абразивні властивості. Проте її висока вологість (до 60%) призводить до швидкого мікробіологічного псування. Невирішеною залишається задача мінімізація енерговитрат на сушку кавової гущі з метою її тривалого зберігання без мікробіологічного псування. Наразі недостатньо дослідженими залишаються доступні (некапіталоємні) технології стабілізації та безпосереднього використання кавової гущі і її компонентів у рецептурах мийних засобів та твердого мила. Такий підхід дозволив би локальним підприємцям впроваджувати принципи циркулярної економіки безпосередньо у місцях утворення відходів.

3. Невирішені питання фізико-хімічної сумісності при створенні полімерних композитів. Використання кавової гущі та silver skin як наповнювачів при синтезі полімерних матеріалів є важливим напрямком зменшення використання синтетичних пластиків. Проте, введення лігноцелюлозної гідрофільної біомаси у гідрофобне полімерне середовище потребує вирішення проблем їхньої адгезійної сумісності. Залишаються відкритими питання оптимізації параметрів попередньої підготовки кавових відходів (знежирення, модифікації) та дослідження їхнього впливу на експлуатаційні, структурно-механічні властивості та здатність до біодеградації отриманих пластмас.

З огляду на вищезазначене, виникає об'єктивна необхідність у розробці комплексної системи поводження з відходами кавової індустрії, яка б гармонійно поєднувала створення сучасної організаційно-управлінської моделі з впровадженням доступних технологій їх матеріальної валоризації (шляхом інтеграції у виробництво санітарно-гігієнічних засобів та екологічних полімерних матеріалів).

Теоретико-методологічне підґрунтя роботи спирається на комплексний науковий аналіз існуючих систем управління екологічною безпекою. Алгоритм реалізації такого системного підходу структуровано за ключовими етапами дослідження, які графічно відображено на рисунку 1.7.

Для розробки комплексної екологічно-безпечної технології утилізації

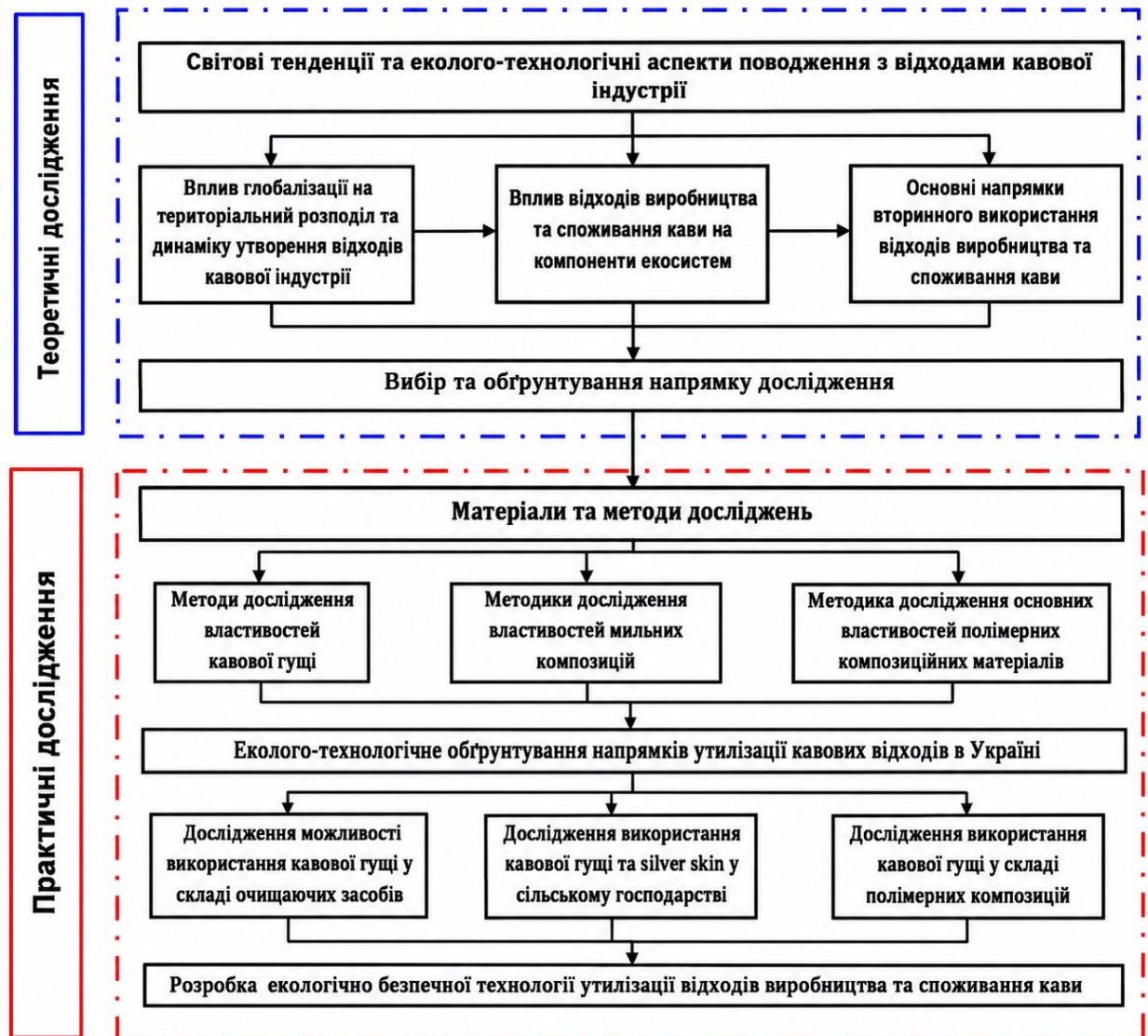


Рисунок 1.7 – Блок-схема досліджень

відходів виробництва та споживання кави необхідно здійснити наступні етапи:

- проаналізувати світові тенденції у сфері використання відходів обсмаження та споживання кави;
- виявити негативні наслідки для екосистем існуючої системи поводження з відходами виробництва та споживання кави;
- розробити методику досліджень ефективності додавання кавової гущі до складу очищаючих засобів;
- провести експериментальні дослідження екологічної безпеки використання виробництва та споживання кави в сільському господарстві та у

складі полімерних композиційних матеріалів;

- розробити комплексну екологічно-безпечну технологію децентралізованої утилізації відходів виробництва та споживання кави з урахуванням поточних умов в Україні.

Проведення досліджень за обраним напрямком має значне практичне значення та сприятиме не тільки вирішенню проблеми зменшення обсягів відходів виробництва та споживання кави на локальному та регіональному рівнях з урахуванням вимог екологічної безпеки, а й сприятиме соціально-економічному розвитку та формуванню екологічної свідомості основних споживачів кавового напою.

Метою дисертаційного дослідження є забезпечення екологічної безпеки в кавовій індустрії шляхом удосконалення системи управління відходами, що базується на розробці та впровадженні екологічно безпечної технології комплексної утилізації твердих органічних залишків (виробництва та споживання) та їхнього повернення у ресурсний обіг як цінної вторинної сировини для запобігання багатотонному накопиченню.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати соціокультурні та економічні чинники інтенсифікації споживання кави і дослідити закономірності просторового накопичення супутніх відходів в умовах урбанізованих територій;

- провести комплексну оцінку екологічної небезпеки полігонного захоронення відходів кавової індустрії з метою обґрунтування імперативності впровадження нових технологій їхньої утилізації;

- обґрунтувати еколого-технологічні параметри низькоенергоємного процесу термічної стабілізації відпрацьованої кавової гущі з метою запобігання її мікробіологічному псуванню;

- провести комплексну еколого-агрохімічну оцінку наслідків безпосереднього внесення неферментованих кавових відходів на структурно-механічні властивості та загальний агроекологічний стан ґрунтів;

- встановити кореляційну залежність між дисперсністю відпрацьованої кавової гущі та мийною здатністю екологічно безпечних композицій на її основі;
- науково обґрунтувати еколого-технологічну доцільність використання відпрацьованої кавової гущі як наповнювача для біорозкладних полімерів та дослідити експлуатаційні властивості отриманих екокомпозитів;
- науково обґрунтувати та розробити комплексну модель екологічно безпечного управління децентралізованими потоками відходів споживання кави в умовах урбанізованих територій.

## 1.6 Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано вплив глобалізаційних процесів на виникнення проблеми утилізації чи вторинного використання відходів обсмаження та споживання кави.

2. Аналіз ринку кави в Україні показав тенденцію до зростання обсягів імпорту зеленого кавового зерна у період до 24.02.2022 року, чому сприяли нульове мито на ввезення даного продукту та розвиток системи спрощеного оподаткування.

3. Визначено, що децентралізоване утворення відходів споживання кави є основою причиною низького рівня її використання в якості ресурсу.

4. Проаналізовано основні напрямки потенційного використання відходів обсмаження та споживання кави та визначено, які з них створюють продукт з високою доданою вартістю.

Зміст розділу відображено у наступних наукових публікаціях [25], [26], [31], [32], [52], [60].



## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Матеріали досліджень

Матеріалами досліджень виступали кавова гуща, утворена при різних способах приготування натурального кавового напою у закладах харчування, а також кавове лушпиння, яке утворюється при обсмаженні зелених кавових зерен (рис.2.1).



а



б

а – кавова гуща, б – кавове лушпиння

Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд відходів споживання та обсмаження кави

Для подальших досліджень, було проаналізовано хімічний склад кавової гущі (табл. 2.1) та хімічний склад кавового лушпиння (табл. 2.2) [63–65].

Таблиця 2.1 – Усереднений хімічний склад кавової гущі

Компонент	Вміст, мас.% (від сирової маси)
Органічна речовина	60–70
Лігнін	20–27
Целюлоза	8–15
Геміцелюлоза	30–39
Ліпіди	10–20
Білки	10–17
Зола	1–2
Кофеїн	0.8–2.5
Поліфеноли	3–6

Таблиця 2.2 – Усереднений хімічний склад кавового лушпиння

Компонент	Вміст, мас.% (від сирієї маси)
Целюлоза	10–16
Геміцелюлоза	24–27
Лігнін	22–30
Зола	7–9
Ліпіди	2–4
Білки	14–19
Кофеїн	0,7–1,2
Поліфеноли	2–3

В залежності від способу приготування та сорту кавових зерен розмір частинок кавової гущі відрізняється в діапазоні від 60 до 1200 мкм, а середній розмір часток коливається від 100 до 1200 мкм (табл.2.3).

Таблиця 2.3 – Характеристика кавової гущі

Зразок	Спосіб приготування кавового напою	Розмір часток, мкм		Колір	Запах	Сорт кавових зерен
		діапазон	середній			
ВКГ1	еспресо-кавомашина	60–120	100	темно-коричневий	сильний кавовий	Арабіка Робуста
ВКГ2	джезва/мокка	100–200	200	коричневий	помірний кавовий	Арабіка
ВКГ3	ручні способи заварювання	400–600	400	світло-коричневий	слабкий кавовий	
ВКГ4	фільтр-кавомашина	800–900	800		легкий кавовий	
ВКГ5	суміш усіх типів кавової гущі	60–1200	1000	темно-коричневий		Арабіка Робуста

При створенні очищаючих засобів широкого спектра використання з наповнювачем кавова гуща використовували різні мильні основи, які відрізняються за типом основи та характеристиками, широко представлені на вітчизняному ринку та активно використовуються крафтовими миловарами (табл.2.4). В залежності від типу основи кожне мило має свою рекомендовані напрямки використання, які проте, не є вичерпними.

Дослідження використання відходів від споживання та виробництва кави, у якості добрива або модифікуючого агенту проводились на різних типах

ґрунтів (табл.2.5) [66].

Таблиця 2.4 – Характеристики мильних основ

Зразок	Тип мильної основи	ТМ, виробник	Характеристики	Використання <sup>1</sup>
МГ (МО-1)	гліцеринова	Stephenson (Велика Британія)	прозора, зволожує, підходить для чутливої шкіри; стійке піноутворення, дозволяє зробити прозорі естетично привабливі композиції	косметичне мило з добавками, прозоре мило
МК (МО-2)	кокосова	MiloCraft (Україна)	пишна піна, добра очищаюча здатність; містить лаурінову кислоту	мило для рук та тіла з ароматами
МО (МО-3)	оливкова	UAsoap (Україна)	пом'якшує шкіру; містить насичені жирні кислоти	дитяче косметичне мило

Примітка: 1 – згідно даних постачальників з відкритих джерел інформації

Таблиця 2.5 – Характеристика ґрунтів

Тип ґрунту	Механічний склад ґрунту	Вміст гумусу, %	pH	Особливості
чорнозем середньо гумусовий	легкогліністий	4,0 - 6,0	6,5-7,5	схильні до грудкування при перезволоженні або неправильній обробці
глинисто-піщаний		0,7 – 2,0	5,5 -6,5	погано утримує вологу та поживні речовини
сірий опідзолений		2,0 – 4,0	5,0 – 6,0	схильні до ущільнення у період посухи, має чітко виражені гумусовий, елювіальний та ілювіальний горизонти

Основною культурою, що була використана у польових дослідженнях, була суниця садова (*Fragaria × ananassa*) рання сорту Хоней (Honeye), як демонструє оптимальне поєднання укорінення, плодоношення, стійкості до захворювань та несприятливих погодних умов на території Харківської області, добре переносить екстремальне зниження температури взимку – до

мінус 30°C впродовж тижня, починає плодоносити у червні [67–69]. При висадці та польових дослідженнях дотримувались загально прийнятих рекомендацій щодо термінів висадки, відстані між кущами, експозиції відносно сонця та зволоження (табл.2.6).

Таблиця 2.6 – Характеристика суниці садової сорту Хоней.

Характеристика	Опис
Походження	США, створений у Нью-Йорку (Женева)
Тип	Садова суниця (полуниця), сорт ранньо-середнього дозрівання, <i>junebearing</i> (один врожай на рік)
Час дозрівання	Початок червня (в помірному кліматі), плодоносить протягом кількох тижнів
Урожайність	Висока, стабільна
Кущ	Висота 7–15 см, розкид розетки 30–45 см
Листя	Темно-зелене, щільне
Квітки	Білі, п'ятипелюсткові
Ягоди	Великі, конічні або подовжені, яскраво-червоні, блискучі; м'якоть щільна; смак кисло-солодкий, аромат виражений
Використання плодів	Свіжі, для заморожування, варення, джемів; добре зберігають колір при заморожуванні
Зимостійкість	Висока, витримує холодні зими
Стійкість	Помірна до корневих хвороб ( <i>red stele</i> ), уразливий до <i>Verticillium</i> -в'янення
Вимоги до ґрунту	Родючий, вологий, добре дренований; pH 5,5–6,5
Освітлення	Повне сонце
Схема посадки	30–45 см між кущами, широкі міжряддя

Під час дослідження використання відпрацьованої кавової гущі у якості антислизького агенту, експериментальні досліди проводились на чотирьох репрезентативних типах тканин: денім, тринитка, кашемір та поліестер, які суттєво відрізняються за своїм складом, структурою волокон та експлуатаційними характеристиками (рис. 2.2, табл. 2.7). Вибір саме цих матеріалів є логічно обґрунтованим, оскільки вони становлять основу текстильної бази для пошиття осінньо-зимового та верхнього одягу. Зважаючи на те, що кадова гуща як альтернативний протиожедний засіб застосовується переважно в холодну пору року (під час снігопадів та обмерзання тротуарів), саме ці типи тканин мають найвищу ймовірність безпосереднього контакту з обробленими поверхнями та відповідний ризик забруднення. Зокрема,

поліестер є базовим матеріалом для більшості сучасних утеплених курток, пуховиків та лижних костюмів; кашемір традиційно використовується для виготовлення класичних зимових пальт, які потребують делікатного догляду та є особливо вразливими до органічних плям. Своєю чергою, денім та цупка тринитка є найпопулярнішими тканинами для повсякденного утепленого одягу (зимові джинси, спортивні костюми, худі), штанини якого найчастіше зазнають інтенсивного тертя та забруднення у нижній частині під час пересування обробленими вулицями.



а – денім, б – тринитка, в – кашемір, г – поліестер

Рисунок 2.2 – Зразки тканини

Таблиця 2.7 – Характеристика тканин які використовувались у дослідженнях

Назва	Походження/Склад	Характеристика	Властивості
джинсова (денім)	щільна бавовняна тканина саржевого переплетення, іноді з додаванням еластану чи поліестеру.	міцна, зносостійка, добре тримає форму, але може бути жорсткою.	добре пропускає повітря, приємна до тіла, довговічна, стійка до розривів і потертостей.
тринитка (футер)	в'язана тканина (трикотаж), три шари нитки: лицьовий, утеплювальний та внутрішній. Бавовна з додаванням поліестеру/еластану.	м'яка, еластична, тепла, добре тримає тепло.	приємна до тіла, стійка до розтягування, добре зберігає форму, підходить для щоденного носіння.
кашемір	натуральна тканина з пуху кашмірських кіз (Гімалаї, Монголія, Китай).	дуже ніжна, м'яка, легка, але водночас тепла.	добре зберігає тепло, дихає, гіпоалергенна, потребує дбайливого догляду.
поліестер	тканини з хімічних волокон (поліестер, нейлон, акрил, еластан тощо).	різноманітна за фактурою й властивостями залежно від типу волокна. Легка, зносостійка.	добре тримає форму, стійка до зминання, швидко сохне, але може «не дихати».

В якості полімерних матриць для створення зданих до біорозкладання полімерних композиційних матеріалів використовували наступні матеріали:

- 1) полімер молочної кислоти полілактид екструзійної марки Terramac TP-4000 (Unitika, Японія);
- 2) термопластичний біополімер марки GEMABIO F (Gema Polimer Plastik Ürünleri San. ve Tic. A.S., Турція) на основі сополімеру бутилендипатату та бутилентерефталату (ПБАТ).

Обидва матеріали мають сертифікацію відповідно до EN13432 в якості здатних до біорозкладання (biodegradable), широко представлені на ринку України та є популярними замінниками традиційних полімерних матеріалів, які базуються на викопному паливі й мають термін розкладання у природних умовах понад 100 років. Властивості обраних полімерних матеріалів відрізняються за головними показниками – густина та індекс плинності розтопу, які є важливими при переробці у виробі (табл.2.8) [61, 70, 71].

Таблиця 2.8 – Основні характеристики полімерних матеріалів

Показник	Одиниця виміру	Terramac TP-4000	GEMABIO F
Густина	г/см <sup>3</sup>	1,25	1,23
Показник плинності розтопу	г/10 хв	10-15	2-4
Вміст вуглецю не викопного походження	%	≥90	30-90
Ударна міцність	кДж/м <sup>2</sup>	1,6	3,5 – 6
Міцність при розриві	МПа	66	25 – 35
Модуль пружності при згині	ГПа	4,6	0,2 – 0,45

## 2.2 Методики досліджень властивостей кавової гущі

Розмір часток визначали за допомогою ситів з діаметрами отворів від 60 до 1200 мкм для висушеної до постійної маси кавової гущі за методикою визначення гранулометричного складу для солі згідно ДСТУ 4886.20:2007 Сіль кухонна. Визначення крупності [72], оскільки для кавової гущі відповідний нормативний документ відсутній. Використовували комплект сит Kruve Sifter Plus BEAN Silver. В прибор поміщаються 3 сита з отворами, які

мають різний діаметр, після чого наважка масою 100 г просіюється через сита. Сита з отворам різного діаметру змінюються, поки не буде проведено повний аналіз. Залишок на кожному ситі зважується, після чого за формулою 2.1 проводять розрахунок вмісту фракції у мас.% з визначеним розміром.

$$W = \frac{m_{\text{фр}}}{m_{\text{заг}}} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де  $m_{\text{фр}}$  – маса фракції, яка залишилась на ситі з визначеним діаметром отвору, г;

$m_{\text{заг}}$  – маса проби, г.

Форму частинок зразків кавової гущі та кавового лушпиння, візуальне підтвердження розвитку плісневих грибів аналізували за методом мікроскопії та проводили за допомогою електронного мікроскопа Digital Microscope HD color CMOS Sensor (China). Розвиток плісневих грибів у кавовій гущі також визначали за допомогою мікологічного аналізу.

Мікологічний аналіз з метою визначення видового складу та рівня обсіменіння плісневими грибами проводили у лабораторіях Національного наукового центру «Інститут експериментальної і клінічної ветеринарної медицини» (м. Харків). Дослідження базувалося на використанні адаптованих методів, що включали етап селективної культивуції на середовищах Чапека та сусло-агарі з наступним виділенням чистих ізолятів. Для кількісної оцінки ступеня зараження зразків використовували метод підрахунку КУО в 1 г субстрату, дотримуючись методики, описаної у [73].

Для визначення вмісту вологи у зразках кавової гущі використовували термогравіметричний метод згідно методики, наведеної у [74, 75]. Наважку масою 5 г поміщають у сушильну шафу та витримують до постійної маси за температури 103 °С, для чого використовують ваги лабораторні аналітичні марки ТВЕ-0,3-0.01-а. Вміст вологи  $W$ , мас.% обчислюють за формулою 2.2

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де  $m_1$  – маса наважки кавової гущі до сушки, г

$m_2$  – маса наважки після сушки, г

$m_0$  – маса чистої пустої кювети, г.

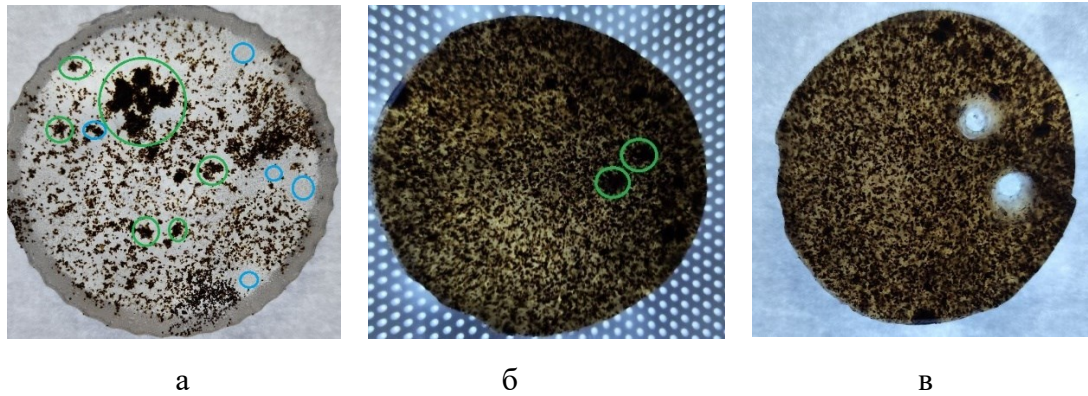
### 2.3 Методики дослідження властивостей мильних композицій

Для приготування мильних композицій з додаванням кавової гущі, були використанні 3 види мильних основ: гліцерінова, оливкова та кокосова. Мильну основу було підготовано шляхом нарізання на рівномірні шматки розміром  $5 \times 5 \times 5$  мм, поміщено в посудину та нагріто до  $65^\circ\text{C}$  у мікрохвильовому полі потужністю 700 Вт. Час нагрівання залежить від маси мильної основи, кожні 50 г наважки збільшують час знаходження у мікрохвильовому полі на 15 с. Після отримання однорідної, розтопленої, мильної основи поступово вводилась кавова гуща при постійному переміщуванні. Утворена композиція заливалась у силіконові форми. Подальші експериментальні дослідження проводились не раніше, ніж через 24 години після утворення мильних композицій.

Для оцінки рівномірності розподілу часток кавової гущі у мильній основі було розроблено власну шкалу оцінки (табл. 2.9). За допомогою візуального огляду з підсвіткою у зразках мила виділяли ділянки, які мають скупчення часток кавової гущі або у яких відсутня кавова гуща, такі ділянки вирізались зі зразків та зважувались (рис.2.3). Зразки мила також попередньо зважувались.

За формулою 2.3 визначали А (мас.%) частку від композиції, яка мають нерівномірний розподіл часток або містить пусті ділянки, отримані дані використовувались для формування шкали оцінювання нерівномірності розподілу (табл.2.9) та шкали для оцінки грудкування кавової гущі (табл.2.10).





а – приклад виявлення ділянок скупчень наповнювача (виділено зеленим кольором) та ділянок з відсутністю наповнювача (виділено блакитним кольором); б – суцільний зразок мила з ідентифікованими ділянками скупчень наповнювача; в – зразок мила після видалення ідентифікованих ділянок

Рисунок 2.3 – Приклад оцінки зразків мила для визначення ступеню нерівномірності розподілу наповнювача

$$A = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

де  $m_1$  – маса суцільного зразка мила, г

$m_2$  – маса вирізаних зразків мила, г

Таблиця 2.9 – Шкала оцінки рівномірності розподілу часток кавової гущі у мильній композиції

Характеристика	Бал
Частки розподілені однорідно, відсутні зони скупчення або пустоти ( $A \leq 5$ мас.%) <sup>*</sup>	5
Незначні зони з підвищеною концентрацією, загальна структура однорідна ( $A = 5-10$ мас.%)	4
Середня кількість зон скупчення або пустот ( $A = 10-20$ мас.%)	3
Висока кількість зон скупчення або пустот ( $A = 20-40$ мас.%)	2
Значна кількість зон скупчення чи пустот ( $A > 40$ мас.%)	1

Примітка: показник  $A$  розраховували як суму для зон зі скупченням та відсутністю наповнювача

Для оцінки очищаючої здатності композицій мила з додаванням кавової гущі було розроблено власну шкалу (табл.2.11) на основі візуального ефекту в залежності від зникання забруднення після інтенсивного намилювання та змивання водою різної температури. Гаряча вода мала температуру 35-40 °С,

Таблиця 2.10 – Шкала грудкування кавової гущі у мильній композиції

Критерій	Значення А, мас. %	Бал
Низьке	$\leq 5^*$	1
Нижче середнього	5-10	2
Середнє	10-25	3
Вище середнього	25-35	4
Високе	$> 35$	5

Примітка: показник А розраховували для зон зі значним грудкуванням та скупченням наповнювача

холодна – 15-20 °С. Для практичного дослідження зразки мильних композицій на основі різних мильних основ та з різним ступенем наповнення були передані представникам різних вікових категорій та гендерів, що надало можливість проаналізувати відмінності очищувальної здатності в залежності від віку, стану шкіри та типу забруднень. Учасникам досліджень рекомендували витримувати час намилювання не менше 30 сек не залежно від ступеню та типу забруднень.

Таблиця 2.10 – Шкала оцінки очищаючої здатності мильних композицій

Умова зникнення забруднення	Оцінка, бал
Забруднення повністю зникає через 1 хвилину в холодній воді	10
Забруднення повністю зникає через 1 хвилину в гарячій воді	9
Забруднення повністю зникає через 3 хвилини в холодній воді	8
Забруднення повністю зникає через 3 хвилини в гарячій воді	7
Забруднення повністю зникає через після багаторазового (2+) намилювання в холодній воді	6
Забруднення повністю зникає через після багаторазового (2+) намилювання в гарячій воді	5
Зникає 50% забруднення через 3 хвилини в холодній воді	4
Зникає 50% забруднення через 3 хвилини в гарячій воді	3
Зникає не більше 20% забруднення через 3 хвилини в холодній воді	2
Зникає не більше 20% забруднення через 3 хвилини в гарячій воді	1

Для оцінки вологості шкіри після застосування очищаючих засобів використовували портативний прилад корнеометр (рис. 2.4).

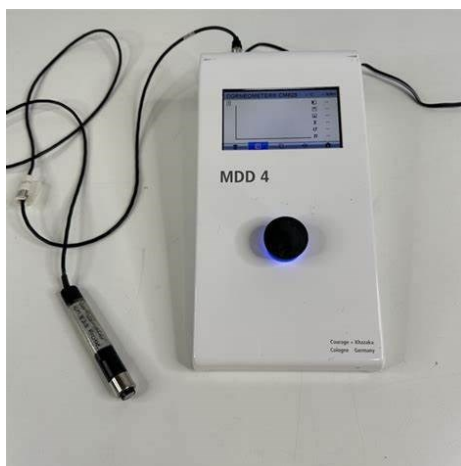


Рисунок 2.4 – Прилад для оцінки вологості шкіри

Принцип дії якого засновано на вимірюванні діелектричної проникності рогового шару шкіри, що прямо корелює з її вмістом води.

#### 2.4 Методи дослідження впливу кавової гущі на ґрунти

Відбір проб ґрунтів проводили за стандартною методикою ДСТУ ISO 10381–6:2015 [76], де чітко прописані вимоги до формування середньої проби. Відібрані зразки одразу пакували в поліетиленові контейнери, що дозволяло уникнути втрат води та вторинного забруднення.

Оцінку впливу внесення сторонніх елементів, в даному випадку кавової гущі та кавового лушпиння проводили у відповідності до ДСТУ ISO 11269–2:2002 з використанням тест-рослини крес-салат (в лабораторних умовах) та інших рослин (в польових умовах) [76]. Кількість паралельних дослідів – 5, кількість насіння, що висаджується, в кожній пробі ґрунту – 30 шт. За формулою 2.4 розраховували коефіцієнт фітотоксичності  $E, \%$ :

$$E = \frac{(L_k - L_d)}{L_k} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

де  $E$  – фітотоксичний ефект, %;

$L_k$  – середня довжина наземної частини рослин у контрольному ґрунті, мм;

$L_d$  – середня довжина наземної частини рослин у дослідному ґрунті, мм.

В залежності від значення  $E$  оцінюють ступінь пригнічення розвитку тестових рослин:

- слабкий – значення  $E$  менше 20%
- середній – значення  $E$  більше 20%, але менше 40%
- суттєвий – значення  $E$  більше 40, але менше 60%
- значний – значення  $E$  більше 60%, але менше 80%
- високий – значення  $E$  більше 80%

Кислотність ґрунтів та кавової гущі визначали за водною витяжкою потенціометричним методом за допомогою мультиметру AD8000 ADWA Micromed відповідно до ДСТУ ISO 10390:2023 [78]. Для цього готували водну суспензію ґрунт:вода або кавову суспензію гуща:вода у співвідношенні 1:5.

В якості контрольного ґрунту використовували субстрат універсальний TM Flora, якщо не вказано інше.

Коефіцієнт фільтрації визначали згідно з ДСТУ 9178:2022 «ґрунти. Методи лабораторного визначення коефіцієнта фільтрації» [79]. Зразки ґрунту ущільнювали в циліндричних формах і пропускали через них воду при сталому градієнті. Фіксували швидкість фільтрації, що дозволяло оцінити водопроникність ґрунту.

Тип ґрунту встановлювали за [80], де наведені карти та морфологічні характеристики. Картографічні дані співставляли з результатами лабораторного візуального аналізу, що дало можливість підтвердити класифікацію.

Приживаність суниці визначали як відсоток рослин, що зберегли життєздатність після висадки. Оцінку проводили візуально через 30 і 60 днів. Дослідження проводили на дослідній ділянці розміром 30х50 метрів, яка розташована у Харківській області, Харківський район та відведена під індивідуальне садівництво, що забезпечило репрезентативність вибірки та можливість виконання всіх експериментів у єдиних умовах.

## 2.5 Методика дослідження здатності до очищення текстильних матеріалів, забруднених кавовою гущею

З метою споживчих аспектів використання кавової гущі в якості антислизького агента проводилось моделювання забруднення кавовою гущею та очищення від неї різних типів тканини, які переважно використовуються як матеріал для верхнього одягу взимку. Для цього зразки тканин розміром 20×20 см з висоти 1 м скидалися на поверхню дорожнього покриття, попередньо вкритого шаром снігу та льоду (1 см) та кавовою гущею (хаотичне покриття, товщина шару не більше 0,5 см) за погодних умов 0°C та відносній вологості повітря 78%. Дослідження проводились у реальних умовах у м. Київ. Далі зразки висушувались та підвергались пранню за рекомендованими для кожного типу тканини циклами (табл.2.11) [81]. Відбувалось візуальне спостереження за зникненням забруднення після прання.

Сушку зразків проводили на відкритому повітрі, за потреби цикли прання повторювали та додавали плямовивідник.

Таблиця 2.11 – Характеристика циклів прання

Параметр	Тип тканини			
	денім	тринитка	поліестер	кашемір
Тип прання	машинне			ручне
Температура води, °C	60	40	40	30
Тип миючого засобу	порошок пральний універсальний "Persil" (5-15% аніонні ПАР, <5% фосфонати, неіоногенні ПАР, цеоліти, мило, ензими, ароматизатори, оптичні відбілювачі)			рідкий засіб для прання Perwoll (5-15% аніонні ПАР, <5% неіоногенні ПАР, ензими, ароматизатори)
Тип засобу для виведення плям	"Персоль O <sub>2</sub> " (відбілювач кисневий)			

Для оцінки стійкості забруднення тканини було розроблено власну п'ятибальну шкалу, яка базується на візуальній оцінці інтенсивності плям після циклів прання (табл.2.12).

Таблиця 2.12 – Шкала оцінки інтенсивності забруднення тканини після прання

Опис стану тканини	Оцінка, бал
Стан нової тканини, плями та залишкові сліди повністю відсутні	5
Ледве помітні залишкові сліди; контури плями відсутні, спостерігається дуже слабка зміна відтінку тканини, видима лише при ретельному огляді	4
Помітний світло-коричневий слід (ореол) від кави; контури плями розмиті, інтенсивність забарвлення візуально зменшилася приблизно наполовину	3
Пляма чітко виражена, контури переважно збереглися; інтенсивність забарвлення зменшилася незначно, кавовий пігмент глибоко закріплений у волокнах	2
Інтенсивність плям не зменшилась, зміна кольору на зворотному боці виробу	1

## 2.6 Методика дослідження основних властивостей полімерних композиційних матеріалів

Полімерні композиційні матеріали на основі GEMABIO F одержували експериментально методом екструдювання попередньо підготовлених гранул GEMABIO F 2910 та кавової гущі в одношнековому лабораторному екструдері за температури 160 – 170 °С і швидкості обертання валу 30 – 100 об/хв. Співвідношення L/D екструдера становить 25 для підвищення однорідності розподілу кавової гущі у готових композиційних матеріалах [82].

Полімерні композиційні матеріали на основі Terramac TP-4000 отримували екструдюванням попередньо підготовлених гранул полілактиду, кавової гущі одношнековому лабораторному екструдері за температури 170–200 °С; швидкість обертання валу 30–100 об/хв. Співвідношення L/D екструдера становить 25 [60].

Основні хімічні групи в розроблених полімерних композиційних матеріалах визначено за смугами поглинання ІЧ-спектрів, які знімали на ІЧ-спектрофотометрі «Nicolet 380» (США), оснащеного блоком ослабленого

повного відбиття (ATR). Кожен зразок сканували двадцять разів у діапазоні хвильових чисел  $600\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  з роздільною здатністю  $4\text{ см}^{-1}$ .

Для визначення основних технологічних характеристик полімерних композиційних матеріалах використано гідростатичний метод згідно ISO 1183-1 [83] для вимірювання густини зразка полімеру об'ємом не менше  $1\text{ см}^3$ , показник плинності розтопу (ППР) згідно ISO 1133 [84] за допомогою приладу ПРТ-М за температури  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  та навантаженні  $2,16\text{ кгс}$  та температурний інтервал топлення згідно ISO 3146 [85] на лабораторному латунному диску розміром діаметр  $50\text{ мм}$  товщина  $19\text{ мм}$  з боковим отвором під термометр діаметром  $9\text{ мм}$  (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Латунний диск для визначення температурних інтервалів топлення

Для визначення стійкості розроблених полімерних композиційних матеріалів до води використано метод дослідження водопоглинання зразків у холодній воді проводили за ISO 62:2008 [86]. Використовували прискорений метод визначення коефіцієнту дифузії  $D_m$  [87 – 89]. Зразки полімерних композиційних матеріалів (паралелепіпед зі сторонами  $10\times 15\times 5\text{ мм}$ ) використані для визначення коефіцієнту дифузії за формулою 2.5

$$D_m = \frac{tg^2\alpha \cdot \rho_T}{2 \cdot (C_s - C_1)}, \quad (2.5)$$

де  $\alpha$  – кут краплі робочої рідини на поверхні зразку;

$\rho_T$  – густина робочої рідини,  $\text{г/см}^3$ ;

$C_s$  – концентрація робочої рідини в момент насичення,  $\text{г/см}^3$ ;

$C_I$  – початкова концентрація робочої рідини, г/см<sup>3</sup>;

Дослідження ударної в'язкості та руйнівного напруження під час згинання композитів проводилося на маятниковому копрі відповідно до DIN 53435:2018-09 за температури 20°C та відносної вологості 25% [90–92].

Дослідження на ступінь біорозкладання (біодеградації) розроблених полімерних композиційних матеріалів проводили у модельній системі: використовували контейнери, що заповнювалися 150 грамами польової землі. Зразки екологічно розроблених полімерних композиційних матеріалів відомої маси розміром 15\*15 мм у марлевих конвертах поміщали у контейнери із землею на глибину 1 см. Контейнери промарковані із зазначенням складу дослідного зразка та його маси. Контейнери інкубували за температури 25 °C з підтримкою вологості на постійному рівні шляхом регулярного зрошення ґрунту з частотою 2-3 рази на тиждень. Експериментально встановлені 7 періодів експозиції зразків терміном 60 діб. Вилучені зразки промивали водопровідною водою, висушувалися при кімнатній температурі протягом доби і зважувалися для визначення залишкової маси. Втрату маси зразками визначали за формулою 2.6

$$\Delta m = \frac{m_B - m}{m_B} \cdot 100, \quad (2.6)$$

де  $m_B$  – маса вихідного зразка г;

$m$  – маса зразка після перебування у контейнері, г.

## 2.7 Методики визначення товщини та міцносних характеристик джутових матеріалів

У рамках комплексного дослідження фізико-механічних властивостей пакувальних матеріалів (джутових мішків та джутового волокна) було застосовано комплекс стандартизованих методів.

Товщину досліджуваних джутових матеріалів визначали відповідно до регламентних вимог ДСТУ ISO 5084:2004 «Матеріали текстильні. Визначання



товщини текстильних матеріалів та текстильних виробів» [93]. Згідно з даною методикою, товщину визначали як перпендикулярну відстань між опорною базовою пластиною товщиноміра та круглою паралельною притискною лапкою, яка створює заданий тиск на площу зразка.

Перед проведенням випробувань зразки джутового матеріалу кондиціонували у стандартних атмосферних умовах. Процес вимірювання полягав у розміщенні підготовленої проби матеріалу без натягу на плоскій базовій пластині приладу. Після цього на зразок плавно опускали притискну лапку фіксованого діаметра, яка створювала нормований тиск відповідно до вимог стандарту для даного типу текстилю. Значення товщини фіксували після стабілізації показань приладу протягом заданого часу експозиції, що дозволяло нівелювати похибки, викликані початковим пружним стисненням грубих волокон джуту. Для отримання статистично достовірних результатів вимірювання проводили на декількох різних репрезентативних ділянках джутового мішка з подальшим розрахунком середнього арифметичного значення.

Оцінку міцнісних характеристик, зокрема визначення абсолютного розривного навантаження (міцності на розрив) та видовження під час розриву, проводили з використанням електромеханічної розривної машини РТ-250 згідно з методологією, описаною в [94]. Машина РТ-250 спеціально призначена для статичних випробувань на розтяг текстильних матеріалів із натуральних і синтетичних волокон та має торсійний силовимірювальний механізм із максимальною межею вимірювання до 2,5 кН.

З джутових мішків вирізали елементарні проби у вигляді смужок стандартизованого розміру (окремо в напрямках основи та піткання). Підготовлені зразки надійно фіксували у верхньому і нижньому механічних затискачах розривної машини. Для забезпечення точності експерименту контролювали рівномірність початкового натягу та відсутність перекосів у затискачах, щоб напруження під час розтягування розподілялося рівномірно по всій ширині зразка і запобігало його проковзуванню.

Випробування здійснювали шляхом опускання нижнього рухомого затискача з постійною робочою швидкістю до моменту повного руйнування (розриву) джутової смужки. Значення абсолютного розривного навантаження фіксували за показаннями силової шкали приладу в момент розриву, а відповідне абсолютне видовження – за шкалою деформації. Кінцевий результат визначали як середнє арифметичне значення результатів випробувань серії зразків, що дозволило об’єктивно оцінити експлуатаційну надійність джутових матеріалів та їхню здатність витримувати механічні навантаження.

## 2.8 Методика обробки результатів досліджень

Після проведення вимірювань для кожного з досліджуваних варіантів обчислюють середнє значення  $\bar{x} \pm m$ , де  $m$  – помилка середнього арифметичного, яку визначають за формулою 2.7 [95]

$$m = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}} \quad (2.7)$$

де  $N$  – кількість результатів;

$\sigma^2$  – дисперсія, яку визначають за формулою 2.8

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}{N}, \quad (2.8)$$

Достовірність різниці середніх арифметичних  $t$  розраховується за критерієм Стюдента-Фішера за формулою 2.9:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (2.9)$$

де  $\bar{x}_1$  – середнє арифметичне значення показника в контрольному досліді

$\bar{x}_2$  – середнє арифметичне значення показника у досліджуваному варіанті

$m_1$  – помилка середнього арифметичного в контрольному досліді;

$m_2$  – те ж у досліджуваному варіанті.

Якщо фактично встановлена величина  $t$  більше або дорівнює

критичному (стандартному) значенню  $t_{st}$  роблять висновок про існування статистично достовірної різниці між середніми арифметичними у досліджуваному та контрольному варіанті. Якщо ж фактична величина  $t$  менша за  $t_{st}$ , різницю між середніми вважають статистично недостовірною.

Для обробки інших отриманих результатів використовували ліцензоване програмне забезпечення (табл.2.13).

Таблиця 2.13 – Використане програмне забезпечення

Функція програмного забезпечення	Назва програмного забезпечення
Математична обробка результатів, побудова тривимірних графіків	SoftStatistica v6.0
Побудова двовимірних графіків	Microsoft Office Excel 2016
Візуалізація розроблених схем	Microsoft Office Visio
Проведення опитувань	Google Forms

## 2.9 Висновки до розділу 2

1. Наведено перелік матеріалів, які використовувались у дисертаційному дослідженні та їх основні властивості.

2. Запропоновано методику оцінки технологічних властивостей мильних композицій з використанням кавової гущі, яка полягає у розробці показника  $A$ , що вказує на масу часток композиції, у якій спостерігається скупчення або пористості наповнювача

3. Розроблено шкалу оцінки очищаючих властивостей мильних композицій. Чим менше часу та зусиль треба докласти до змивання забруднення мильною композицією у холодній воді, тим вище бал присвоюється композиції.

4. Запропоновано методику оцінки здатності до біорозкладання полімерних композиційних матеріалів за втратою маси у модельному ґрунті при постійній температурі та вологості ґрунту.

Зміст розділу відображено у наступних наукових публікаціях [60], [70], [82].

## РОЗДІЛ 3

### ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ СПОЖИВАННЯ ТА ОБСМАЖЕННЯ КАВИ ЗА РІЗНИМИ НАПРЯМИ В УКРАЇНІ

#### 3.1 Дослідження процесів сушіння кавової гущі

Одним з головних факторів, який обмежує використання відходів споживання кави, зокрема кавової гущі, є її надмірна вологість та схильність до швидкого розвитку плісняви [96]. Без належного висушування вона не може бути використана ані в косметичних засобах, ані у побутовій хімії. Кавова гуща з моменту утворення має вологість близько 92 мас.%, а температура продукту після приготування сягає 85 °С.

На основі візуальних та мікробіологічних досліджень (рис.3.1) було встановлено, що на поверхні вологої гущі вже через кілька годин після приготування починається активний розвиток колоній *Aspergillus niger* (Додаток Д). Ці мікроорганізми спричиняють гниття гущі, появу різкого неприємного запаху та унеможливають її використання без попередньої сушки.

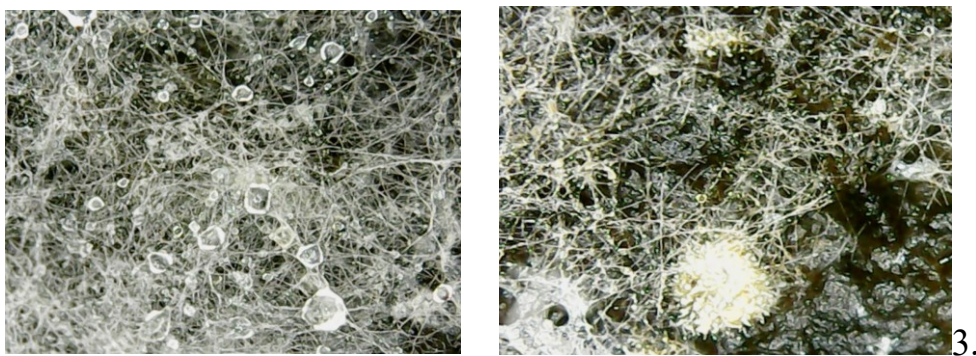


Рисунок 3.1 – Пліснява на поверхні кавової гущі

В залежності від вологості кавової гущі розвиток плісневих грибів протікає за 48–72 години (табл. 3.1) у шарі товщиною 30 мм за температури 24 °С. Для кожного типу ВКГ найшвидше пліснява з'являється при вологості

Таблиця 3.1 – Швидкість розвитку плісневих грибів на поверхні кавової гущі в залежності від її вологості

Тип відходу	Вологість, мас. %	Час до появи плісневих грибів, доба	
		на поверхні	по всій товщині
ВКГ1	90	2	4
	50	6	8
	30	16	24
	10	360	>365
ВКГ2	90	3	5
	50	7	10
	30	20	30
	10	260	310
ВКГ3	90	3	6
	50	8	11
	30	22	33
	10	298	331
ВКГ4	90	4	6
	50	8	12
	30	24	36
	10	316	352
ВКГ5	90	3	8
	50	6	15
	30	18	45
	10	349	>365

90 мас.%, а при зменшенні вологості до 10 мас.% розвиток грибів повністю зупиняється навіть за рік зберігання. Це підтверджує доцільність проведення сушки одразу після утворення гущі.

В залежності від розміру часток ВКГ час до появи плісняви на поверхні та по всій товщині буде відрізнятись. У п'яти зразках ВКГ при температурі навколишнього середовища 24°C та вологістю 90% час до появи колоній плісневих грибів складає від 2х до 4х діб. При 30% вологості спостерігається значне збільшення терміну появи плісняви на поверхні зразків, що складає від 16 до 22 діб, в той час як поява плісневих грибів по всій товщині відбувається у період від 24 до 45 діб. Найбільш значний зріст терміну появи плісняви спостерігається за вологості 10% і складає 260->365 діб

Одним з методів протидії розвитку плісневих грибів у кавовій гущі є її сушка. Для економічно доцільного використання кавової гущі після її утворення необхідно, щоб процес сушки не вимагав додаткових фінансових

вкладень. Так само, використання додаткових джерел енергії, окрім прямої сонячної енергії, для сушки кавової гущі не відповідає концепції циркулярної економіки [97]. Оптимальним підходом до процесу випаровування вологи з кавової гущі є здійснення цього процесу за температури навколишнього середовища безпосередньо у місцях утворення або накопичення та зберігання. В таких умовах швидкість процесу випаровування буде залежати від товщини шару кавової гущі та розміру часток.

У ході досліджень було виявлено, що для забезпечення тривалої стабільності відпрацьованої кавової гущі (ВКГ) та запобігання її мікробіологічному псуванню залишкову вологість необхідно довести до рівня 10–15 мас. % (табл.3.1). Для досягнення цього показника було проаналізовано еколого-технологічну ефективність кількох методів дегідратації: конвективного, інфрачервоного, мікрохвильового, вакуумного та атмосферного.

Конвективне сушіння ґрунтується на видаленні вологи з матеріалу шляхом пропускання гарячого повітря крізь його шар. Повітряний потік передає тепло до поверхні матеріалу, сприяючи десорбції вологи, яка згодом евакуюється з робочої камери. Ефективність конвективного методу під час сушіння ВКГ забезпечується високою швидкістю процесу за рахунок температур теплоносія на рівні 90–110 °С. За таких умов вихідна вологість знижується на 70–80 % протягом 3–6 годин. Головною перевагою цього методу є легкість його промислового масштабування завдяки доступності стандартного сушильного обладнання. Водночас метод характеризується високою енергоємністю (близько 5 – 7 МДж/кг видаленої вологи) [98, 99]. Серед технологічних недоліків варто виділити високий ризик агломерації (грудкування) часток, а також термічну деструкцію та пересушування поверхневих шарів зразка.

Сутність інфрачервоного (ІЧ) сушіння полягає у нагріванні матеріалу за допомогою електромагнітного випромінювання, що інтенсивно поглинається його поверхнею. Теплова енергія генерується безпосередньо у зовнішніх

шарах часток кавової гущі, викликаючи інтенсивне фазове перетворення вологи. У реальних умовах ефективна глибина проникнення ІЧ-променів у щільний шар кавової гущі рідко перевищує 3–5 мм [100, 101]. Саме тому цей метод є енергоощадним та найефективнішим виключно для рівномірно розподілених тонких шарів сировини, проте він може призводити до градієнта вологості у товстих шарах, наприклад якщо треба висушити так звану кавову таблетку.

Мікрохвильове сушіння забезпечує дегідратацію завдяки проникненню електромагнітних хвиль у структуру матеріалу, що викликає об'ємне генерування тепла внаслідок тертя дипольних молекул води [102]. Це сприяє стрімкому випаровуванню вологи одночасно по всьому об'єму часток ВКГ. Такий підхід значно інтенсифікує процес термічної стабілізації та знижує загальні енерговитрати. Проте, як зазначають автори [103], метод потребує прецизійного керування потужністю магнетрона, оскільки використання надмірної енергії неминуче призводить до локального перегріву органічної матриці (ефект «гарячих точок») та погіршення її фізико-хімічних властивостей.

Вакуумне сушіння здійснюється в умовах розрідженого атмосферного тиску. Зниження тиску пропорційно зменшує температуру кипіння води, що дозволяє проводити ефективну дегідратацію за низьких температур (40–60 °C) [104]. Цей метод повністю нівелює ризик термічної деструкції та дозволяє максимально зберегти вихідні фізико-хімічні властивості кавової сировини. Незважаючи на високу якість отриманого продукту, вакуумна технологія є тривалою в часі та вимагає значних капіталовкладень у спеціалізоване енергоємне обладнання.

Атмосферне (природне) сушіння – це процес видалення вологи під впливом сонячної інсоляції та природної конвекції повітряних мас. Матеріал розподіляють тонким шаром на відкритих поверхнях у добре вентильованих локаціях [105, 106]. Температура процесу зазвичай відповідає температурі довкілля, а тривалість дегідратації може сягати кількох діб. Хоча цей підхід не

потребує застосування складного обладнання, він є низькопродуктивним, критично залежить від кліматичних факторів і супроводжується високим екологічним ризиком вторинної контамінації сировини патогенною мікрофлорою та розвитку цвілевих грибів.

Узагальнюючі вищенаведене, кожен з відомих методів сушки кавової гущі має свої переваги та недоліки (табл.3.2), серед всіх методів тільки атмосферне сушіння не потребує додаткових енерговитрат, відповідаючи умові сталості.

Таблиця 3.2 – Порівняння методів сушіння кавової гущі

Метод	Температура	Час сушіння	Зменшення вологості	Якість ВКГ
Конвективний	90–110 °C	3–6 год	~70–80 %	Середня
Мікрохвильовий	~100 °C	10–15 хв	~80–90 %	Висока
Вакуумний	40–60 °C	4–6 год	~90–95 %	Висока
Інфрачервоний	~150 °C	30–60 хв	~70–80 %	Середня
Атмосферний	~30–40 °C	2–3 доби	~60–80 %	Низька

Враховуючи необхідність дотримання принципів енерго- та ресурсозбереження під час утилізації відходів, першочерговим об'єктом експериментальних досліджень стало конвективне сушіння ВКГ за температури 100 °C. Вибір конвективного методу як основного базується на його надійності, простоті апаратурного оформлення та стабільності результатів. Робочу температуру 100 °C було визначено як критичну межу раціонального енергоспоживання. Оскільки енерговитрати на нагрівання агента сушіння експоненційно зростають з підвищенням температури, застосування високотемпературних режимів (130–150 °C) суттєво збільшує вуглецевий слід технології та погіршує її еколого-економічні показники. Отже, незважаючи на дещо більшу тривалість процесу порівняно з мікрохвильовим методом, конвективне сушіння за температури 100 °C виступає найдоцільнішим еколого-технологічним компромісом.

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про наявність чіткої залежності між товщиною шару ВКГ та загальною тривалістю її сушіння



до цільової вологості 10 мас. %. (табл.3.3.). Наприклад, встановлено, що при формуванні максимального шару завтовшки 30 мм процес дегідратації є найменш інтенсивним (стабілізація триває від 41 до 88 годин). Зменшення товщини завантаження вдвічі (до 15 мм) дозволяє інтенсифікувати процеси тепло- та масообміну, скорочуючи тривалість термічної обробки в середньому у 2,2–2,3 рази. Найвищі показники швидкості випаровування води спостерігаються при використанні тонких шарів (2–3 мм), де нормативна вологість досягається всього за 6–15 годин, що мінімізує питомі енерговитрати.

Таблиця 3.3 – Залежність тривалості конвективного сушіння кавової гущі від розміру часток та товщини шару за температури 100 °С.

Зразок	Час сушки до вологості 10 мас.%, год, в залежності від товщини шару, мм									
	30	20	15	12	10	7	5	4	3	2
ВКГ1	41	28	18	16	15	13	11	9	7	6
ВКГ2	76	52	33	30	28	24	20	17	13	11
ВКГ3	88	60	39	34	32	28	24	19	15	13
ВКГ4	80	55	35	31	29	25	21	18	14	12
ВКГ5	71	48	31	28	26	23	19	16	12	10

Поряд із товщиною шару, визначальним фактором впливу на кінетику сушіння є гранулометричний склад (дисперсність) кавових відходів, який безпосередньо залежить від первинного способу екстракції напою.

Експериментально встановлено, що найвища швидкість вологовіддачі характерна для дрібнодисперсного зразка ВКГ1 (відходи еспресо-машин із середнім розміром часток 100 мкм), що зумовлено його максимальною питомою площею поверхні випаровування. Зі збільшенням розміру фракцій до 400 мкм (ВКГ3, ручні способи заварювання) тривалість дегідратації зростає більш ніж удвічі, що пояснюється ущільненням матеріалу та підвищеним опором внутрішній дифузії води. Водночас для крупнодисперсних фракцій (ВКГ4, 800 мкм) та полідисперсних сумішей (ВКГ5, діапазон 60–1200 мкм)

спостерігається інтенсифікація процесу порівняно з ВКГЗ, оскільки наявність великих часток формує більш пористу макроструктуру шару, яка полегшує конвективний масообмін та аерацію в товщі матеріалу.

Для конвективного методу сушіння за температури 100 °С було отримано математичне рівняння 3.1, яке дозволяє визначити час, необхідний для сушіння кавової гущі до вмісту води 10 мас.% в залежності від середнього розміру часток кавової гущі та товщини шару

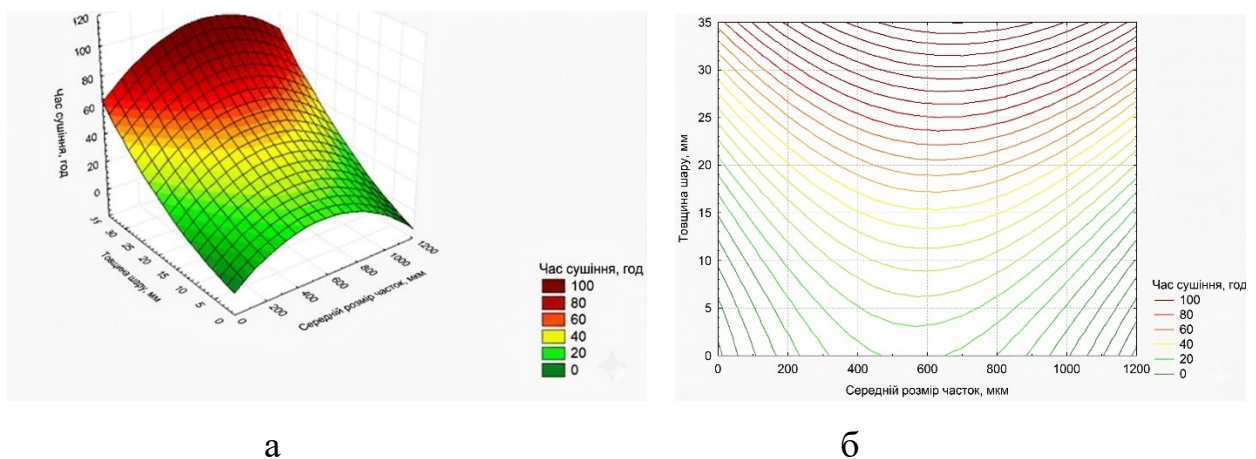
$$\tau = -4,9944 + 0,0922 \cdot d + 0,6091 \cdot h - 8,2576 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 + 0,0006 \cdot d \cdot h + 0,0373 \cdot h^2 \quad (3.1)$$

де  $\tau$  – час сушіння до вмісту води 10 мас.%, хв;

$d$  – середній розмір часток відпрацьованої кавової гущі, мкм;

$h$  – товщина шару матеріалу, мм.

На рис. 3.2 наведена графічна візуалізація рівняння 3.1.



а – 3D зображення; б – 2D зображення

Рисунок 3.2 – Залежність часу сушіння за температури 100 °С до вмісту води 10 мас.% від товщини шару та середнього розміру часток

Аналіз коефіцієнтів отриманої математичної моделі (рівняння 3.1) та візуальної форми поверхні відгуку (рис.3.2) свідчить, що домінуючим фактором, який визначає інтенсивність процесу дегідратації, є товщина шару

кавової гущі. Залежність часу сушіння від цього параметра має стрімко зростаючий характер, що підтверджується найвищими значеннями лінійного та квадратичного коефіцієнтів при змінній  $h$ . Водночас вплив гранулометричного складу (розміру часток  $d$ ) є нелінійним і формує на поверхні відгуку локальний екстремум (максимум): як дрібнодисперсні, так і великодисперсні фракції характеризуються меншим часом стабілізації, тоді як частки середнього розміру чинять найбільший аеродинамічний опір конвективному тепломасообміну.

Альтернативним, енергозберігаючим, способом зменшення вмісту вологи у кавовій гущі є здійснення процесу сушки на відкритому повітрі у приміщеннях, де безпосередньо відбувається утворення кавової гущі. Відповідно до чинних нормативних вимог [107, 108], для забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов у закладах ресторанного господарства оптимальна відносна вологість має підтримуватися на рівні 40–60 %, а температурний режим диференціюється залежно від функціонального призначення зони (20–25 °C для обідніх залів та 17–22 °C для виробничих цехів). За наявності вільних місць процес сушки кавової гущі можна організувати у виробничих приміщеннях, де середня температура становить 20 °C. Проведені дослідження показали, що за вказаних параметрів мікроклімату процес сушки зразків товщиною 30 та 20 мм не залежно від розміру часток кавової гущі відбувається настільки повільно, що пліснява розвивається швидше, ніж значення вологості становить 10 мас.% (табл.3.4).

Таблиця 3.4 – Залежність тривалості сушіння кавової гущі від розміру часток та товщини шару за температури 20 °C.

Зразок	Час сушіння до вологості 10 мас.%, год, в залежності від товщини шару, мм									
	30	20	15	12	10	7	5	4	3	2
ВКГ1	пліснява розвивається швидше відбувається зменшення вологості	ніж	91	82	74	66	57	46	36	30
ВКГ2			166	150	141	122	102	86	66	56
ВКГ3			196	170	161	142	122	96	76	66
ВКГ4			176	155	146	127	107	91	71	61
ВКГ5			156	140	131	117	97	81	61	51

При товщині шару 15 мм, що відповідає стандартній кавовій таблетці, яка утворюється у професійних каво машинах (рис.3.3) за 91 годину (3,8 діб) вологість зменшується до оптимальних 10 мас.% без візуального прояву розвитку плісняви. В місцях утворення відходів кавової гущі у вигляді кавової таблетки можливо здійснювати процес її сушіння без зменшення товщини шару, що зменшує витрати часу та трудових ресурсів й спрощує сам процес сушки. Зменшення товщини шару кавової гущі до значень менше 10 мм (від 7 до 2 мм) призводить до різкої інтенсифікації тепломасообміну та суттєвого скорочення тривалості дегідратації. Таке значне прискорення пояснюється тим, що у тонкому шарі критично знижується внутрішній дифузійний опір матеріалу, і волога безперешкодно та рівномірно випаровується з вільної поверхні. Найменший час до досягнення вмісту вологи 10 мас.% становить 30 год для зразків кавової гущі з середнім розміром часток 100 мкм товщиною 2 мм (ВКГ1, табл.3.4).

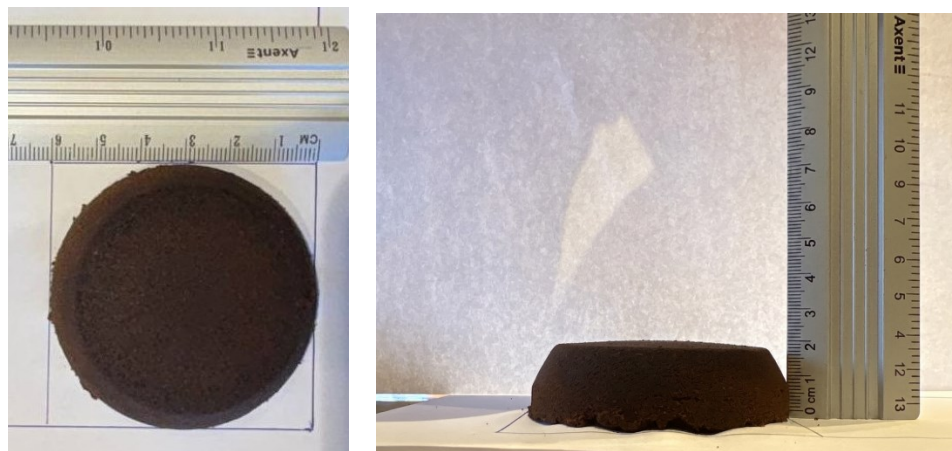


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд та розміри кавової таблетки

У закладах HoReCa, де окрім подачі кавового напою також є цех власної випічки або приготування їжі існує можливість використовувати залишкову теплову енергію у конвекційних пічках для швидкого зниження вмісту вологи у кавовій гущі. Залишкова теплова енергія у конвекційних пічках – це теплова енергія, яка зберігається в камері після завершення термічної обробки, наприклад випічки. Технологічний процес термічної обробки у закладах

харчування відбувається періодично та залежить від попиту в конкретний момент часу, що призводить до багатократного вмикання та вимикання пічей впродовж робочої зміни, й відповідно наявності проміжку часу, коли процес термічної обробки закінчено, але температура в пічці ще достатньо висока. В середньому впродовж 60 хв температура в промислових та напівпромислових конвекційних пічах падає з 200 °С до 30 °С, тобто зі швидкістю 2,83 °С/хв за рахунок теплообмінних процесів через тонкі стінки пічей (наприклад, торгових марок Unox, Rational, Arach тощо). В електричних духових шафах марки ДЕШ-0.5, які є розповсюдженими у невеликих закладах харчування, падіння температури з 200 °С до 30 °С відбувається зі швидкістю 1,4 °С/хв й може бути охарактеризовано як пасивне охолодження.

Експериментально встановлено, що збільшення середнього розміру часток на порядок (від 100 до 1000 мкм, зразки ВКГ1 та ВКГ5 відповідно) практично не впливає на інтенсивність дегідратації в умовах пасивного охолодження (табл.3.5). Наприклад, для товщини шару 30 мм різниця у вмісті води через 1 годину при швидкості охолодження 2,83 °С/хв становить 3 мас.% для зразків ВКГ1 та ВКГ5 відповідно; при товщині шару 7 мм – 1 мас.%. (табл.3.5).

Таблиця 3.5 – Зменшення вологості кавової гущі з використанням залишкової теплової енергії впродовж 1 години.

Зразок <sup>1</sup>	Вміст води, мас.%, в залежності від товщини шару, мм									
	30	20	15	12	10	7	5	4	3	2
ВКГ1	<u>80</u> <sup>2</sup>	<u>76</u>	<u>68</u>	<u>65</u>	<u>63</u>	<u>60</u>	<u>57</u>	<u>52</u>	<u>44</u>	<u>40</u>
	76	70	62	58	56	54	49	45	39	35
ВКГ5	<u>83</u> <sup>2</sup>	<u>79</u>	<u>75</u>	<u>70</u>	<u>66</u>	<u>61</u>	<u>58</u>	<u>53</u>	<u>46</u>	<u>41</u>
	78	76	68	66	59	56	50	47	38	36

Примітки: 1 – початкова вологість зразків 90 мас.%; 2 – чисельник для швидкості падіння температури 2,83 °С/хв; знаменник – для швидкості паління температури 1,4 °С/хв

Це пояснюється дією двох протилежних масообмінних факторів: дрібнодисперсна фракція (ВКГ1) має значно більшу питому поверхню

випаровування, проте у ній утворюється щільніший шар, який має меншу кількість та менший обсяг прошарків повітря (більш щільно упакована структура), що створює високий аеродинамічний опір для виходу водяної пари. Натомість більші частки (ВКГ5), маючи меншу поверхню, утворюють шар із кращою паропроникністю. Внаслідок цього вплив морфології матеріалу на кінетику сушіння можна вважати не значним.

Зниження швидкості охолодження робочої камери з 2,83 до 1,4 °C/хв гарантує глибше зневоднення матеріалу в середньому на 4–8 % абсолютно для всіх досліджених товщин. Процес дегідратації протікає більш ефективно за стабільного градієнту температури, тобто при швидкості падіння температури 1,4 °C/хв. Наприклад, для зразку товщиною 15 мм (кавова таблетка, зразок ВКГ1) різниця вмісту води становить 4 мас.%, для зразку товщиною 2 мм – 5 мас.%. Через 1 годину температура всередині електричної духової шафи становить 116 °C, тобто процес сушіння може тривати й далі, тоді як у конвекційних печах температура знижується до 100 °C вже через 35–37 хвилин від початку процесу, й далі процес сушіння протікає повільно. Це підтверджує, що тривалість підтримання температурного градієнта є критично важливим параметром для ефективного сушіння кавової гуцці та утилізації вторинних енергоресурсів.

Аналіз даних табл.3.5 також дозволив виявити нелінійний характер впливу режимів охолодження залежно від товщини завантаження. Максимальна різниця у вологості між дослідженими режимами (до 8 %) фіксується в діапазоні товщин 5–7 мм. У шарах товщиною 20–30 мм енергетичний потенціал залишкового тепла не може бути реалізований повною мірою через високий внутрішній дифузійний опір матеріалу, тоді як у тонкому шарі залишкова теплова енергія витрачається максимально ефективно.

Використання залишкового тепла для зменшення вологості ВКГ може поєднуватися з наступним сушінням на повітрі, внаслідок чого час зменшення вмісту води до 10 мас.% значно скоротиться, оскільки сушіння на повітрі буде починатися з вмісту води ~40 мас.%. Також в залежності від часу не

використання електричної духової шафи можливо продовження процесу сушіння понад 1 годину. Для зразку товщиною 2 мм (ВКГ1) час досягнення вмісту вологи 10 мас.% на повітрі після попереднього сушіння в електричній духовій шафі становить 12 год, для зразку ВКГ5 – 14 годин, що вдвічі менше для процесу сушіння у приміщенні (табл.3.4).

### 3.2 Дослідження можливості використання кавової гущі у складі очищаючих засобів

Очищення шкіри від забруднювачів при повсякденній активності носить системний характер впродовж всього життя людини. Найчастіше людина очищує шкіру рук – до 10 актів миття на добу та шкіру обличчя – до 3х актів миття на добу. Рекомендована ВОЗ [109] тривалість миття рук з метою їх знезараження становить 40 – 60 секунд при використанні мила, проте у побуті споживачі відмічають суттєво зниження тривалості миття рук в разі їх візуального незначного забруднення (табл.3.6).

Таблиця 3.6 – Середня тривалість миття рук

Категорія опитаних	Характеристика	Тривалість миття з використанням мила, с
Дорослі жінки	не значні забруднення	25 – 30
	забруднення після приготування їжі	30 – 45
	значні забруднення різного походження	45 – 90
Дорослі чоловіки	не значні забруднення	15 – 25
	забруднення після виконання ремонтних робіт різного типу	25 – 45
	значні забруднення різного походження	30 – 80
Діти	без контролю з боку дорослих	10 – 15
	під контролем з боку дорослих	30 – 60

Споживач приймає рішення про придбання та використання миючого засобу для рук відповідно до (у порядку спадання):

- а) співвідношення ціни та якості очищення;

б) наявності або відсутності відчуття сухості шкіри після багаторазового використання впродовж доби;

в) аромату засобу;

г) індивідуальних уподобань щодо конкретного бренду

Якість очищення залежить як від основи мила, так й від наявності доданок, серед яких абразивні доданки відіграють важливу роль для механічного очищення. Висушені відходи кавової гущі, за рахунок пористості, аромату та абразивних властивостей, може бути використана як добавка до очищувальних засобів.

На ринку України вже представлені скраби та мила з додаванням ВКГ, переважно ручного (т.з крафтового) виробництва (табл. 3.7). Промислові виробники використовують лише мікроподрібнену каву як ароматизатор, не акцентуючи увагу на її походженні.

Таблиця 3.7 – Асортимент крафтового мила на ринку України з додаванням кави та відходів споживання кави

Виробник	Назва продукту (ТМ)	Вага, г	Ціна за одиницю, грн	Маркетплейс пропозиції
ЯКА	"Кавовий" (натуральне мило-сраб)	300	132	уака.ua
Black Factory	"Кавове" (ручної роботи)	120	199	ROZETKA
Pinka	натуральне мило – кавове	100	70	prom.ua
Cocos	"Кавовий ексfolіант"	130	95	Cocos.ua

В залежності від вікової категорії та гендеру, споживачі по різному оцінюють найпоширеніші типи забруднення рук, які можна віднести до таких, що складно усуваються (рис.3.4). Всього було опитано 350 респондентів, дані щодо забруднень рук дітей записані зі слів батьків або опікунів дітей.

Так, для дітей віком до 10 років найбільш характерним забрудненням є залишки фломастерів та кулькових ручок, фарб для малювання різного походження та соку трави, що пов'язано з характером активностей та способом життя дітей (рис.3.4а).

Для жінок найбільш поширеним та таким, що складно усувати, є



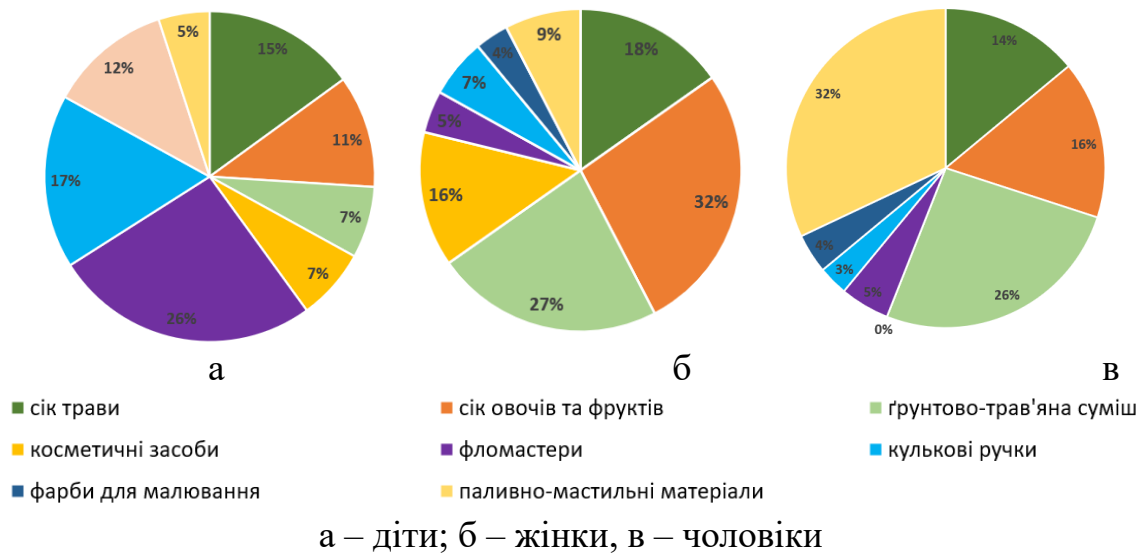


Рисунок 3.4 – Результати опитування щодо переважаючих типів забруднень рук

забруднення соком овочів та фруктів, які виникають під час приготування їжі, та ґрунтово-трав'яною сумішшю від сільськогосподарських робіт, а також залишки косметичних засобів, переважно декоративних типу помада для губ, тональний крем, туш для вій (рис.3.4б).

Для чоловіків найбільш поширеним та таким, що складно усувати, є забруднення залишками паливно-мастильних матеріалів та ґрунтово-трав'яною сумішшю від сільськогосподарських робіт, а також сік овочів та фруктів (рис.3.4в).

Крафтове мило виготовляється у невеличких майстернях без використання промислового обладнання, переважно ручним способом. В залежності від вмісту кавової гущі у мильній основі, а також розміру часток кавової гущі, суттєво відрізняється не тільки очищаюча здатність виготовленого мила, а й технологічні властивості продукту.

Рівномірність розподілу ВКГ у мильній основі, оцінка ступеню грудкування та очищаючу здатності по відношенню до різних типів забруднювачів здійснювалось у балах згідно власних розроблених шкал, які наведені у табл. 2.9, 2.10.

При додаванні 10% ВКГ1, ВКГ2, ВКГ3 до гліцеринової основи

спостерігається значне зменшення рівномірності розподілу гущі по всій товщині мила, що призводить до невисоких показників очищення по відношенню до хімічних забруднень типу фломастер та паливно-мастильних матеріалів (табл. 3.8). Всі композиції, які містять 10 мас.% ВКГ, не залежно від розміру часток ВКГ, демонструють очищаючу здатність на рівні 3 – 4 бали, рівномірність розподілу – 2 бали. При збільшенні вмісту ВКГ до 15% спостерігається незначне покращення очищувальних властивостей мильної композиції, особливо для ВКГ1 по відношенню до фломастеру (композиція №5) – 6 балів, але рівномірність розподілу так само становить 2-3 бали; грудкування залишається вище середнього (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Дослідження впливу вмісту кавової гущі на технологічні властивості мила на гліцериновій основі

Зразок	Вміст ВКГ, мас.%			Технологічні властивості мила		Очищаюча здатність по відношенню до	
	ВКГ1	ВКГ3	ВКГ4	Грудкування ВКГ	Рівномірність розподілу	Ф <sup>1</sup>	ПММ <sup>2</sup>
1	10	-	-	2	2	4	3
2	-	10	-	4	2	4	3
3	-	-	10	2	2	4	3
4	15	-	-	3	3	6	4
5	-	15	-	4	2	5	4
6	-	-	15	3	3	5	5
7	25	-	-	3	4	10	6
8	-	25	-	5	3	9	10
9	-	-	25	3	4	10	9
10	30	-	-	4	2	6	5
11	-	30	-	5	2	4	4
12	-	-	30	5	2	3	4
13	50	-	-	5	1	2	3
14	-	50	-	5	1	2	1
15	-	-	50	5	1	1	2

Примітки: 1 – фломастер; 2 – паливно-мастильні матеріали

Збільшення вмісту ВКГ до 25 мас.% у мильній гліцериновій основі призводить до збільшення очищаючої здатності композицій до 9 – 10 балів (табл. 3.8), що може бути пов'язано з більш рівномірним розподілом какових часток по всій площі готового продукту – на рівні 3 – 4 балів та незначному

грудкуванню. Вміст ВКГ1 на рівні 25 мас.% не підвищує очищаючу здатність мила по відношенню до паливно-мастильних матеріалів (6 балів), що пов'язано з розміром часток, який у ВКГ1 є найменшим. Збільшення вмісту ВКГ до 30 – 50 мас.% очищаюча здатність мила знов знижується, що пов'язано з падінням рівномірності розподілу ВКГ, значному грудкуванню, яке проявляється у наявності агломератів ВКГ, не просочених мильною основою.

Для композицій на кокосовій мильній основі введення ВКГ у кількості менше 25 мас.% не призводить до формування мила з високими очищаючими властивостями, не залежно від розмір часток ВКГ (табл.3.9).

Таблиця 3.9 – Дослідження впливу вмісту кавової гущі на технологічні властивості мила на кокосовій основі

Зразок	Вміст ВКГ, мас.%			Технологічні властивості мила		Очищаюча здатність по відношенню до	
	ВКГ1	ВКГ3	ВКГ4	Грудкування ВКГ	Рівномірність розподілу	Ф <sup>1</sup>	ПММ <sup>2</sup>
1	10	-	-	2	3	4	3
2	-	10	-	2	3	4	3
3	-	-	10	2	3	4	3
4	15	-	-	3	2	4	4
5	-	15	-	4	1	4	3
6	-	-	15	3	4	4	5
7	25	-	-	3	3	9	8
8	-	25	-	4	3	9	8
9	-	-	25	3	3	10	10
10	30	-	-	4	2	6	5
11	-	30	-	5	1	3	3
12	-	-	30	5	1	4	3
13	50	-	-	5	1	1	2
14	-	50	-	5	1	2	1
15	-	-	50	5	1	1	2

Примітки: 1 – фломастер; 2 – паливно-мастильні матеріали

Очищаюча здатність по відношенню до фломастеру та паливно-мастильним матеріалам при вмісті ВКГ 10 та 15 мас.% становить 3 – 4 бали, тільки для композиції №6 з вмістом ВКГ4 15 мас.% очищаюча здатність по відношенню до ПММ становить 5 балів (табл.3.9). Це так само, як й у випадку з гліцериновою основою, пов'язано з нерівномірністю розподілу наповнювача

ВКГ (1-3 бали) та його грудкуванням. Введення ВКГ у кількості 30 та 50 мас.% у композицій з кокосовою мильною основою призводять до утворення мила з не високою очищаючою здатністю (1 – 6 балів) внаслідок високого ступеню грудкування та утворенню агломератів ВКГ, не просочених милом. Оптимальним вмістом ВКГ у композиціях на кокосовій мильній основі є 25 мас.%, про що свідчать значення очищаючої здатності по відношенню до фломастеру та ПММ на рівні 8 – 10 балів для композицій № 7,8,9 (табл.3.9). ВКГ з меншим розміром часток гірше очищають забруднення паливно-мастильними матеріалами при вмісті ВКГ1 10, 15 та 25 мас.% відповідно (композиції 1, 4, 7) (табл.3.9).

Аналіз впливу вмісту кавової гуці для композицій з оливковою мильною основою на очищаючу здатність мила показав збереження закономірностей рівномірності розподілу та грудкуванню, описаних для гліцеринової та кокосової основи (табл.3.10).

Таблиця 3.10 – Дослідження впливу вмісту кавової гуці на технологічні властивості мила на оливковій основі

Зразок	Вміст ВКГ, мас.%			Технологічні властивості мила		Очищаюча здатність по відношенню до	
	ВКГ1	ВКГ3	ВКГ4	Грудкування ВКГ	Рівномірність розподілу	Ф <sup>1</sup>	ПММ <sup>2</sup>
1	10	-	-	2	2	4	3
2	-	10	-	2	2	4	3
3	-	-	10	2	2	4	3
4	15	-	-	3	3	6	4
5	-	15	-	4	2	5	3
6	-	-	15	3	3	5	5
7	25	-	-	3	4	9	7
8	-	25	-	4	4	10	8
9	-	-	25	3	3	9	10
10	30	-	-	4	2	6	5
11	-	30	-	5	1	4	3
12	-	-	30	5	1	3	3
13	50	-	-	5	1	2	2
14	-	50	-	5	1	2	1
15	-	-	50	5	1	1	2

Примітки: 1 – фломастер; 2 – паливно-мастильні матеріали

Відповідно, найвищу очищаючу здатність демонструють композиції №7,8,9 (табл. 3.10) з вмістом ВКГ на рівні 25 мас%., яка становить 9-10 балів по відношенню до фломастера та 7–10 балів по відношенню до ПММ.

Результати проведених досліджень (табл.3.8 – 3.10) дозволили зробити наступні висновки:

а) не залежно від типу мильної основи при ручному способі виготовлення мильних композицій введення ВКГ у кількості понад 25 мас% складно здійснити, адже використовується ручне перемішування або побутові кулінарні міксери;

б) не залежно від типу мильної основи введення ВКГ у кількості 10 -15 мас.% призводить до нерівномірного розподілу часток гущі у зразках мила, що пов'язаних процесом вільного, неускладненого сусідніми частинками, осідання часток під час охолодження зразків;

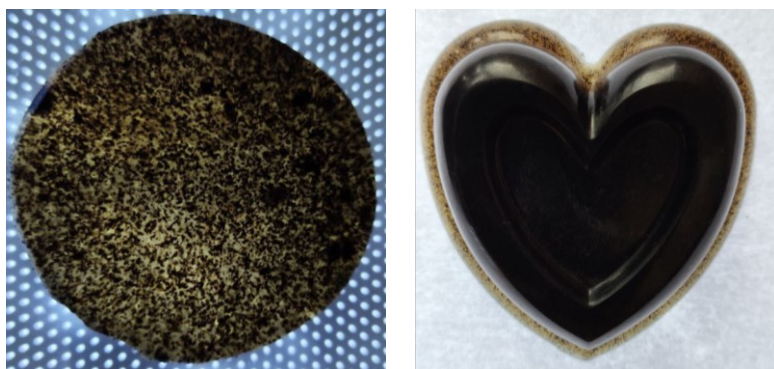
в) не залежно від типу мильної основи введення ВКГ у кількості 25 мас.% дозволяє досягти оптимальних значень системи показників «очищаюча здатність – рівномірність розподілу – утворення грудочок»

г) зі збільшенням розміру часток ВКГ очищаюча здатність по відношенню до паливно-мастильних матеріалів зростає, що свідчить про абразивно-механічний механізм видалення таких забруднень;

д) зі зменшенням розміру часток ВКГ очищаюча здатність по відношенню до фломастеру зростає.

Для подальших досліджень очищаючої здатності мила з відходами кавової гущі по відношенню до різноманітних забруднень (рис.3.5) було обрано вміст ВКГ на рівні 25 мас.% та три контрольних очищаючих засобів – дитяче мило ТМ Honey Bunny, рідке мило ТМ Origami Ногеса, автомобільну пасту для очищення стійких забруднень виробництва НВФ «Сімокс».

Середня оцінка очищаючої здатності композицій мила з кавовою гущею знаходиться в діапазоні від 8,67 до 9,50 на противагу звичайному дитячому та рідкому мила, середня оцінка очищаючою здатності яких не перевищує 4,50 балів (табл.3.11). Композиції, які мають в своїй основі кавову гущу показують



а

б

а – зріз тонкий шар; б – готовий виріб

Рисунок 3.5 – Зразок мила з вмістом ВКГ5 25 мас.%

кращу очищаючу здатність без суттєвого зменшення вологості шкіри рук після використання в стандартних умовах (табл.3.11). Рекомендована вологість шкіри рук становить 45 – 60 %, надмірне систематичне падіння вологості шкіри призводить до втрати нею бар'єрних функцій та передчасного старіння [110].

Таблиця 3.11 – Оцінка очищаючої здатності мила в залежності від співвідношення кавової гущі з різним розміром часток

Композиція	Очищаюча здатність по відношенню до забруднення, бал						Середня оцінка, бал	Вологість шкіри після використання %
	Сік		Ф <sup>1</sup>	КР <sup>2</sup>	КЗ <sup>3</sup>	ПММ <sup>4</sup>		
	трави	овочів						
МГ+ВКГ1	9	9	10	9	8	6	8,5	55 <sup>5</sup>
МГ+ВКГ3	7	7	9	9	8	10	8,33	
МГ+ВКГ5	10	9	10	10	9	9	9,50	
МО+ВКГ1	8	9	9	8	8	7	8,16	61
МО+ВКГ3	7	8	7	7	8	9	7,66	
МО+ВКГ5	9	8	9	8	8	8	8,33	
МК+ВКГ1	8	8	8	9	7	6	7,66	59
МК+ВКГ3	7	7	6	7	8	9	7,33	
МК+ВКГ5	8	8	8	8	8	9	8,16	
Дитяче мило	5	6	4	6	5	3	4,83	51
Рідке мило	4	5	4	4	6	1	4,00	40
Автомобільна паста	7	8	8	7	10	10	8,33	28

Примітки: 1 – фломастер; 2 – кулькова ручка; 3 – косметичні засоби; 4 – паливно-мастильні матеріали; 5 – початкова вологість шкіри долонь (верхній епідерміс) становила 60%.

Композиції, що містять ВКГ1 – кавову гущу з розміром часток 60-120 мкм – демонструють найнижчу очищаючу здатність по відношенню до паливно мастильних матеріалів (6 – 7 балів) не залежно від типу мильної основи й високу очищаючу здатність по відношенню до забруднень природного характеру – сік трави, сік овочів. Так, композиція МГ+ВКГ1 по відношенню до соків трави та овочів демонструють очищаючу здатність на рівні 9 балів; композиція МО+ВКГ1 – 8 по відношенню до соку трави та 9 по відношенню до соку овочів; МК+ВКГ1 – 8 балів. Так само чим менший розмір часток абразивного наповнювача ВКГ, тим вища очищаюча здатність мильних композицій по відношенню до фломастерів та кулькової ручки (табл.3.11), яка становить 9–10 балів.

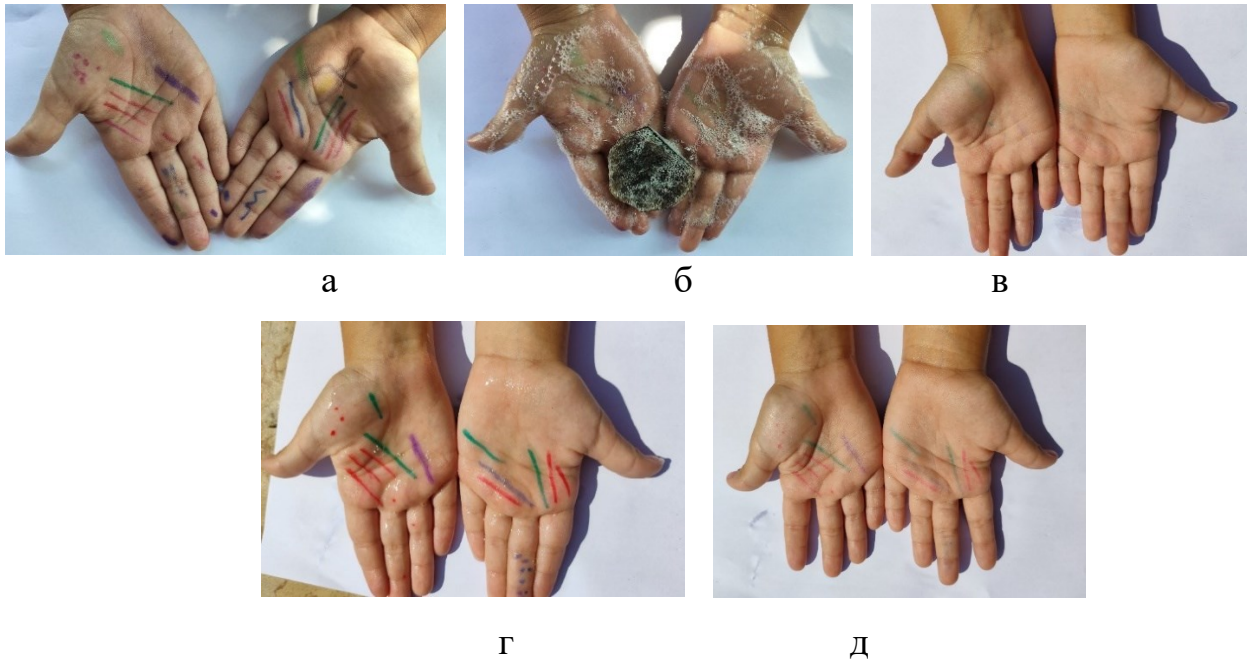
Композиції, які містять ВКГ5, яка є сумішшю кавової гущі з різним розміром часток, демонструють найвищу середню оцінку по відношенню до всіх типів забруднювачів: 9,50, 8,33 та 8,16 для гліцеринової, оливкової та кокосової мильної основи відповідно (табл.3.11).

Перевага використання запропонованих композицій мила з ВКГ5 особливо помітна для складних забруднень дитячих долонь типу фломастер – очищаюча здатність перевищує дитяче мило на 6–7 балів, в залежності від типу мильної основи (рис.3.6). Перевага мила з кавовою гущею для очистки соків овочів та трави становить 4–5 балів у порівнянні з рідким та дитячим милом.

У кав'ярнях різного типу при запровадженні роздільного, від інших типів відходів, збору кавової гущі, найчастіше вона збирається в одну ємність, внаслідок чого утворюється відходи типу ВКГ5.

Загальна очищувальна здатність кокосової мильної основи по відношенню до всіх досліджених типів забруднень нижча у порівнянні з гліцериновою основою; оливкова мильна основа в композиції з ВКГ показала найнижчі результати з трьох обраних для досліджень мильних основ, проте саме оливкова основа найбільш зберігає вологість шкіри рук (табл.3.11).

Автомобільна паста, яка демонструє високу очищаючу здатність по



а – забруднені фломастером долоні дитячих рук; б – використання мильної композиції МГ+ВКГ5 для очищення; в – результат очистки композицією МГ+ВКГ5 , оцінка 10 балів; г – використання дитячого мила; д – результат очистки дитячим милом, оцінка 4 бали.

Рисунок 3.6 – Очищаюча здатність мила з кавовою гущею

відношенню до паливно-мастильних матеріалів, а також соку трави та овочів (табл.3.11), дуже сильно знижує вологість шкіри верхнього шару шкіри – майже вдвічі після її використання. Використання рідкого мила також призводить до зниження вологості шкіри на 22% від початкової, що є суттєвим зниженням; дитяче мило знижує вологість шкіри на 13%. Особливо небезпечним зниження вологості шкіри може бути для дітей, оскільки вони частіше забруднюють та миють руки та їх шкіра більш чутлива, ніж у дорослих [110].

### 3.3 Дослідження використання кавової гущі та кавової луски у сільському господарстві

Ґрунтові ресурси України є найціннішим національним надбанням, управління якими повинно базуватися на концепції сталого розвитку. Проте,



як зазначають автори у [111], ефективне управління ґрунтовими ресурсами можливе тільки на основі міждисциплінарного підходу, що включає зважене законодавче та нормативне забезпечення у поєднанні з прогнозуванням небезпек деградації та пошуком шляхів її подолання. Про необхідність розробки та удосконалення окремих розділів комплексу еколого-правових засад землекористування, зокрема охорони родючості ґрунтів, наголошується у роботі [112].

Низка авторів досліджують стан ґрунтів, проводять їхню еколого-токсикологічну або агроекологічну оцінку в окремих регіонах. Наприклад, у [113] встановлено, що лише 14,7 % від усіх осушуваних земель Львівської області мають задовільний або сприятливий меліоративний стан. Автори [114] наводять результати XI туру оцінки якості ґрунтів цієї ж області, зазначаючи, що майже половина сільськогосподарських угідь (52,2 %) мають лише середню якість.

Водночас повномасштабне вторгнення 24.02.2022 року призвело до катастрофічного погіршення стану земельних ресурсів у регіонах, де відбуваються активні бойові дії або зафіксовані руйнування промислової інфраструктури, зокрема нафтових терміналів та хімічних підприємств [115]. У зв'язку з цим, значна кількість сучасних вітчизняних досліджень фокусується на експрес-оцінці якості ґрунтів на деокупованих територіях. Зокрема, у роботі [116] за допомогою тест-рослини (овес) проведено оцінку фітотоксичності ґрунтів Харківської області та доведено, що моніторингові спостереження безпосередньо після бойових дій дозволяють не лише визначити рівень забрудненості, але й розрахувати розмір заподіяної шкоди. Здатність ґрунтів до самовідновлення після інтенсивного техногенного та військового впливу є вкрай низькою, що вимагає впровадження активних методів фіторе mediaції та внесення органічних меліорантів [117, 118].

З огляду на потребу у масштабному відновленні едафотопів, перспективним напрямком є залучення вторинних матеріальних ресурсів, зокрема органічних відходів, відповідно до принципів циркулярної економіки.

Теоретично існує багато шляхів використання відходів виробництва та споживання кави у сільському господарстві [119–121], проте вітчизняна наука потребує більшої кількості економічно та екологічно обґрунтованих рішень. Пряме внесення відпрацьованої кавової гущі може викликати фітотоксичний ефект, що вимагає обов'язкової попередньої біологічної або термічної стабілізації [120]. Водночас експериментально доведено [121], що використання підготовленої кавової гущі як органічної добавки суттєво підвищує вміст вуглецю та азоту в ґрунті, покращуючи його структуру та загальну родючість, що відкриває нові перспективи для рекультивації пошкоджених земель.

Для дослідження впливу внесення кавової гущі та кавової луски у ґрунти було обрано дослідну ділянку, яка розташована у Харківському районі Харківської області у трикутнику між населеними пунктами Високий – Ржавець – Бабаї. Тип ґрунту – глинистий (важкий) з вмістом глини до 25%, для якого характерним є висока щільність, він погано пропускає воду, схильний до утворення великих ґрунтових агломератів, які важко розбити. Вміст гумусу не перевищує 2% (табл.2.5), а рН становить 5,987. Перед початком досліджень ділянка землі не оброблялась 1 рік, також з неї були вилучені крупні кореневі системи бур'яну [32].

Глинисті ґрунти, притаманні частині східної частини України, в тому числі частині Харківської області, мають ряд властивостей, які суттєво обмежують їх використання в сільському господарстві. Головною серед цих властивостей є нерівномірний розподіл вологи в орному шарі. Глинисті частинки мають вологотривкі властивості, внаслідок чого вода погано просочується у ґрунті, капілярна система води майже не утворюється. Це в свою чергу призводить до відсутності достатньої кількості вологи, яка досяжна для коренів рослин. При інтенсивному зволоженні, наприклад, в наслідок сильних атмосферних опадів або не правильної системи поливу, частина води навколо кореневої системи рослин на глибині до 10–15 см накопичується, оскільки вона немає можливості просочуватися у нижні шари.

В наслідок цього поширеним є явище загнивання коренів рослин. За відсутності правильної механічної обробки таких ґрунтів також виникає явище утворення міцних корок з глибокими тріщинами на поверхні таких ґрунтів при надмірному зволоженні та за температури більше за  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Все вище перелічене ускладнює ведення сільського господарства на таких ґрунтах, особливо в умовах індивідуальних або невеликих фермерських господарств. Витрати на обробку таких ґрунтів не співрозмірні з отриманих врожаєм. Відзначимо, що водотривкі та водофільтруючі властивості ґрунтів також залежать від механічного складу, способу обробки ґрунту, ступеню агрегації та можуть сильно відрізнятися навіть в межах однієї великої ділянки, що обробляється [32, 122, 123].

Для механічної модифікації глинистих ґрунтів можна використовувати різноманітні дренажні матеріали мінерального або рослинного походження. Останні при правильному внесенні додатково підвищують родючість ґрунтів за рахунок утворення шару гумусу. Цим зумовлено вибір необхідності проведення дослідження, а саме впливу внесення у глинисті ґрунти кавової гущі (типу ВКГ5) та кавової луски (КЛ) в якості модифікуючих агентів на властивості ґрунтів. Дослідження проводились у період з 2019 по 2024 рік. ВКГ5 та КЛ вносились один раз щороку на початку квітня (кількість у перерахунку становила 0,1 т на 1 га) шляхом змішування верхнього шару ґрунту з ВКГ5 (вологість 70 мас.%) або сухою КЛ. Контрольним параметром було обрано коефіцієнт фільтрації ґрунтів, який визначали згідно методики, описаній у п.2.4, дослідження проводились щорічно через 2 місяці після внесення ВКГ5 та КЛ.

За 6 років спостережень при внесенні ВКГ5 коефіцієнт фільтрації ґрунту постійно зростав та на кінець спостережень збільшився майже у 10 разів порівняно з ґрунтом, у який не вносились ВКГ5 (табл.3.12).

Незначні зміни у значенні коефіцієнту фільтрації у контрольному зразку ґрунту на контрольній ділянці скоріш за все пов'язано, з поступовим розвиненням кореневої системи суниці садової та розкладанням їх рештків, що

Таблиця 3.12 – Зміна коефіцієнту фільтрації ґрунтів при внесенні кавової гущі та кавової луски

Зразок ґрунту	Значення коефіцієнту фільтрації, м/сек, по роках					
	2019	2020	2021	2022*	2023	2024
Контрольний	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
З внесеною ВКГ5	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
З внесеним КЛ	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$

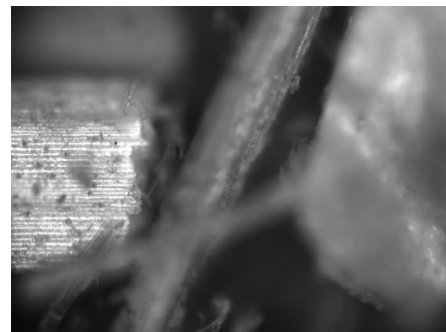
Примітка: у 2022 році внесення КГ та КЛ відбулося на початку червня, а відбір проб для визначення коефіцієнту фільтрації – на початку серпня, що було зумовлено безпековою ситуацією у Харківській області.

призводить до змін у механічному складі ґрунту.

Менш виражений вплив кавової луски на коефіцієнт фільтрації глинистих ґрунтів, порівняно з відпрацьованою кавовою гущею, пояснюється відмінностями у їхніх фізико-механічних та морфологічних властивостях. На відміну від гранулярної структури кавової гущі, яка виконує роль жорсткого каркасу та сприяє утворенню стабільних макропор, кавова луска характеризується пластинчастою формою та високою схильністю до злипання (рис.3.7).



а



б

а – загальний вигляд кавового лушпиння безпосередньо у місці утворення при обсмаженні; б – вигляд кавового лушпиння під мікроскопом, 100 кратне збільшення

Рисунок 3.7 – Кавове лушпиння. Загальний вигляд

Під тиском ґрунтового масиву частинки луски орієнтуються переважно

горизонтально, ущільнюються та не здатні ефективно розпушувати важкі глинисті ґрунти. Крім того, висока гідрофільність луски призводить до її набрякання у вологому середовищі, що спричиняє часткове перекриття наявних ґрунтових капілярів. Додатковим фактором, що ускладнює рівномірне просторове розподілення КЛ у ґрунтовому профілі, є її висока леткість та схильність до електростатичного злипання під час внесення.

Як було зазначено вище, коефіцієнт фільтрації ґрунту є важливим показником для родючості ґрунтів, яку, в тому числі, можна оцінити за розвитком контрольної рослини. Суниця садова була обрана в якості об'єкту дослідження з наступних міркувань [32]:

- 1) це розповсюджена культура в індивідуальних та малих фермерських господарствах Лісостепу України, зокрема Харківської області [69], яка здатна приносити значну економічну вигоду;
- 2) культура добре розвивається у слабокислих ґрунтах;
- 3) вкорінення та розвиток культури добре відбувається на піщаних та піщаноподібних ґрунтах з високим коефіцієнтом фільтрації води, отже можна дослідити залежність вкорінення від коефіцієнту фільтрації ґрунтів;
- 4) культура є вкрай чутливою до нестачі вологи в кореневмісному шарі, але водночас схильна до ураження грибковими хворобами (наприклад, сірою гниллю) при застоюванні води. Тому вона є репрезентативним індикатором для перевірки здатності органічних меліорантів (кавової гущі та луски) оптимізувати водно-фізичні властивості ґрунту, зокрема покращувати коефіцієнт фільтрації у важких ґрунтах без створення перезволожених зон.

Аналіз отриманих даних показав, що у перші три роки внесення ВКГ5 (табл.3.13, рис.3.8) спостерігається в цілому позитивний вплив на розвиток суниці садової – краще укорінення, збільшення площі листової пластинки та плодів, в тому числі, пов'язано з кращим насиченням коренів рослин водою за рівноцінних умов зволоження та експозиції відносно сонця у порівнянні з ділянкою ґрунту без внесення ВКГ5.



а



б

а – на ділянці без внесення ВКГ5 та КЛ; б – на ділянці з внесеною ВКГ5  
Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд контрольної рослини, 2019 рік

Таблиця 3.13 – Вплив внесення кавової гущі на розвиток контрольних рослин та рН ґрунтів.

Зразок ґрунту	рН	% добре укорінених рослин від загальної кількості розсади	Приріст висоти саджанця, %	Середня маса плоду, г
2019 рік				
Контрольний	5,987	65	28	27,1
З внесеною ВКГ5	5,901	78	46	34,9
З внесеною КЛ	5,980	72	32	30,3
2020 рік				
Контрольний	5,967	66	28	28,4
З внесеною ВКГ5	5,765	79	51	37,8
З внесеною КЛ	5,975	72	35	30,6
2021 рік				
Контрольний	6,023	66	27	28,4
З внесеною ВКГ5	5,211	78	45	34,5
З внесеною КЛ	5,975	72	35	30,2
2022 рік				
Контрольний	6,076	65	28	29,1
З внесеною ВКГ5	5,116	68	42	30,2
З внесеною КЛ	5,989	72	34	30,1
2023 рік				
Контрольний	6,095	66	28	28,7
З внесеною ВКГ5	5,019	62	40	29,5
З внесеною КЛ	5,987	72	35	30,1
2024 рік*				
Контрольний	6,103	66	28	-
З внесеною ВКГ5	5,001	60	35	-
З внесеною КЛ	5,985	72	35	-

Примітка: на початку травня 2024 р. у Харківській області раптове зниження температури призвело до загибелі квітів суниці й відсутності врожаю на дослідній ділянці.

На другий рік після систематичного внесення ВКГ5 спостерігається значна різниця у масі та розмірі ягід суниці садової (табл. 3.13, рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд ягід суниці з дослідних ділянок, 2020 рік

Кавова гуща має кислотні властивості, рН її водної витяжки становить 4,876 [124]. Внесення КГ у ґрунти міських територій у значній кількості призводить до закиснення ґрунтів [124], також КГ у кількості більше 10% негативно впливає на властивості органічних компостів [31]. рН водної витяжки КЛ майже нейтральний та становить 6,784. Аналіз даних табл.3.13 дозволяє зробити висновок про критичне значення рН ґрунту для суниці садової на рівні 5,2 – 5,0, яке спостерігається на третій та четвертий рік внесення ВКГ як механічного модифікатора.

На четвертий рік досліджень було відзначено появу польового хвощу (*Equisetum arvense* L.) – бур'яну, який є природнім рослинним індикатором кислих ґрунтів (рис.3.10). На шостий рік досліджень, у 2024 році на ділянці з постійним внесенням КГ кількість одиниць польового хвощу на площі 10 см<sup>2</sup> становив 15 одиниць з середньою висотою наземної частини 28 см та середньою довжиною підземної частини 5 см; на ділянці з постійним внесенням КЛ та на контрольній ділянці на всій площі – поодинокі рослини польового хвощу з висотою наземної частини 10 см. Для підтвердження негативного впливу внесення сумарно 0,6 т КГ на 1 га за 6 років було також





а – ділянка без внесення ВКГ5 та КЛ; б – ділянка з внесенням ВКГ5 впродовж шести років; в – польовий хвощ, зібраний з ділянки площею 10см<sup>2</sup>

Рисунок 3.10 – Розвиток бур'яну – індикатора кислих ґрунтів на дослідних ділянках, 2024 рік.

проведено дослідження фітотоксичності даних ґрунтів (табл.3.14) тест рослиною крес-салат, який свідчить про значне пригнічення розвитку рослин.

Оцінка ділянки після шестирічного систематичного внесення ВКГ5 показала суттєвий рівень коефіцієнта пригнічення, який досяг значення 40,97, тоді як для ділянки з внесенням кавової луски коефіцієнт пригнічення характеризується як слабкий (табл.3.14).

Таблиця 3.14 – Результати оцінки якості ґрунтів за тест-рослиною крес-салат

Зразок ґрунту	рН	Схожість насіння, %	Середня довжина наземної частини, мм	Коефіцієнт пригнічення наземної частини, %
Без ВКГ5 чи КЛ	6,103	58	73,4	25,55
З внесеною ВКГ5	5,001	40	58,2	40,97
З внесеною КЛ	5,985	60	82,3	16,53
Контрольний зразок субстрату	6,476	92	98,6	—

Проведені дослідження дозволили вперше обґрунтувати оптимальні норми внесення відпрацьованої кавової гуцці у важкі глинисті ґрунти для



покращення їхнього водообміну без критичного закислення. Доведено, що для підвищення коефіцієнта фільтрації доцільно вносити до 0,2 т/га сировини. Перевищення цієї норми (понад 0,3 т/га) спричиняє падіння рівня рН до 5,0–5,1, що негативно впливає на вкорінення, розвиток та загальну врожайність агрокультур. Суворе дотримання цих рекомендацій є особливо актуальним під час екологічного відновлення ґрунтів деокупованих територій, де населення часто застосовує побутові відходи як добрива [31]. Нераціональне та надмірне використання кавової гущі в якості модифікуючого агенту для ґрунтів становить серйозну загрозу для довгострокової родючості угідь.

Використання ж кавової луски як меліоранта визнано еколого-економічно недоцільним. Вона не справляє позитивного впливу на гідродинамічні властивості глинистих ґрунтів та розвиток рослин через специфічні морфологічні властивості самого матеріалу. Крім того, на відміну від гущі, луска не утворюється в малих кав'ярнях чи приватних домогосподарствах, тому її залучення вимагатиме додаткових логістичних витрат на транспортування навіть за умови безкоштовної передачі від підприємств з обсмаження кавових зерен.

#### 3.4 Дослідження перспектив використання кавової гущі в якості антислизького агенту

Висушена відпрацьована кавова гуща теоретично є перспективним екологічно безпечним фрикційним матеріалом для обробки пішохідних зон у зимовий період. Актуальність пошуку таких альтернатив зумовлена необхідністю зниження екологічного навантаження на урбосистеми від застосування традиційних хімічних протиожеледних реагентів (наприклад, технічної солі) та мінімізації використання вичерпних природних ресурсів (кварцового піску). Завдяки розвиненій шорсткій структурі поверхні часток, ВКГ при нанесенні тонким шаром на сніговий або льодовий покрив забезпечує коефіцієнт зчеплення, зіставний із традиційними абразивами.

Економічна та екологічна привабливість використання ВКГ полягає у потенційній відсутності хімічної агресивності до ґрунтів та дорожнього покриття, зменшенні соляного нальоту в період відлиги, а також у можливості раціональної утилізації вторинної сировини закладів громадського харчування. Проте, суттєвим експлуатаційним недоліком матеріалу є його специфічний хімічний склад. Наявність у ВКГ залишкових кавових олій (ліпідів) та танінів призводить до утворення стійких, важкорозчинних забруднень на текстильних матеріалах повсякденного вжитку. Це створює проблему експлуатаційної непридатності агента в зонах високої інтенсивності руху пішоходів [125].

Для оцінки впливу ВКГ на текстильні вироби було проведено експериментальне моделювання експлуатаційного забруднення. Об'єктами дослідження слугували зразки матеріалів, що суттєво відрізняються за походженням волокон та фізико-механічними властивостями: бавовняна тканина саржевого переплетення (денім), бавовняне трикотажне полотно (футер), вовняна тканина (кашемір) та 100 % синтетичний поліефірний матеріал. Розмір кожного тестового зразка становив 150×100 мм.

Кількісний аналіз стану тканин здійснювався за 5-бальною шкалою, де 5 балів відповідає ідеальному стану нового виробу, а 1 бал – повній втраті споживчих властивостей (незворотне забруднення або деструкція) (табл. 2.12)

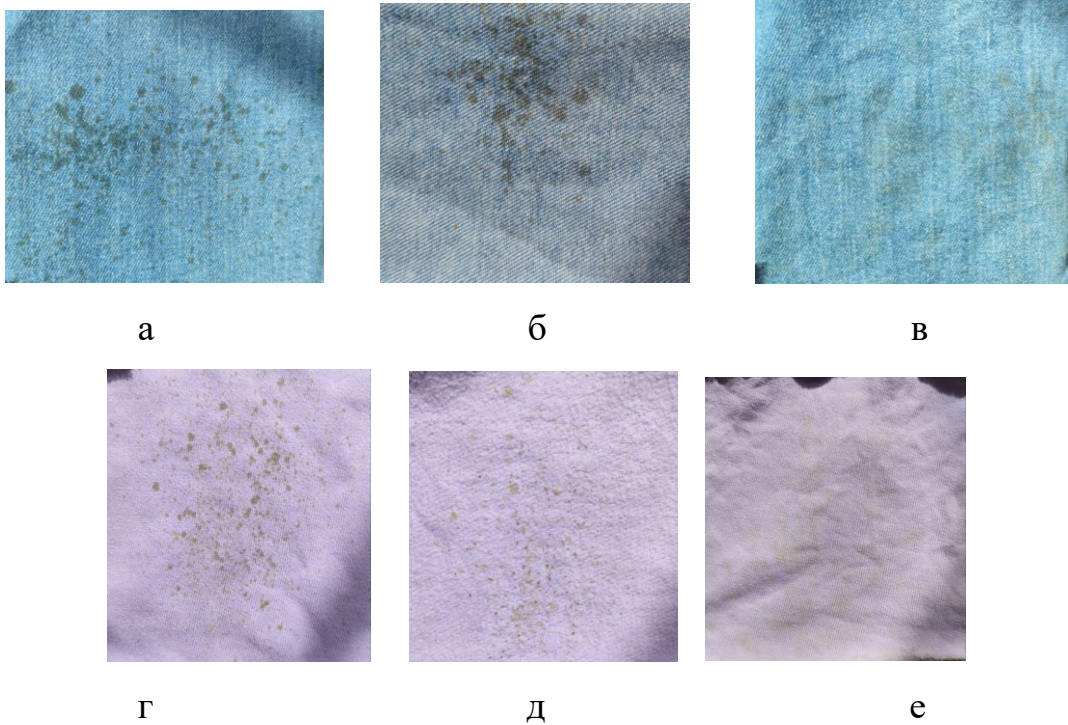
Зразки піддавалися імітаційному забрудненню вологою ВКГ з подальшим висушуванням. Очищення проводилося шляхом прання у воді (температурний режим 45–65 °С, табл. 2.11) з використанням стандартизованої мийної основи. Кожен зразок пройшов до 9 повних циклів випробувань (забруднення – висушування – прання – висушування – оцінка результату).

Аналіз отриманих даних (табл.3.15) дозволяє виокремити три ключові закономірності:

1) матеріали рослинного походження (денім, футер) демонструють «регенеративний пік» на 5-му циклі прання, після чого покращення стану зупиняється (на рівні 3,0–3,5 балів) (рис. 3.11, 3.12). Це свідчить про те, що

Таблиця 3.15 – Результати оцінки стану тканин забрудненої ВКГ після циклів прання

Стан / цикл прання	Бальна оцінка стану тканини			
	денім (бавовна)	футер (бавовна)	синтетика	кашемір (вовна)
Вихідний стан (нова)	5,0	5,0	5,0	5,0
Забруднення ВКГ	1,5	1,0	3,0	1,0
Цикл №1	2,0	1,5	4,0	1,0
Цикл №2	2,5	2,0	4,5	1,5
Цикл №3	3,0	2,5	5,0	1,5
Цикл №4	3,2	2,8	5,0	1,8
Цикл №5 (межа відновлення)	3,5	3,0	5,0	2,0
Цикл №6	3,5	3,0	5,0	1,8
Цикл №7	3,4	2,9	5,0	1,5
Цикл №8	3,2	2,7	4,8	1,2
Цикл №9 (знос)	3,0	2,5	4,5	1,0



а – денім, плями відразу після отримання, лицьовий бік; 1,5 балів; б – денім, плями на виворітному боці відразу після нанесення; 1,5 балів; в – денім, стан після 3х циклів прання; 3 бали; г – футер, плями відразу після отримання, лицьовий бік; 1,5 балів; д – футер, плями на виворітному боці відразу після нанесення; 1,5 балів; е – футер, стан після 5х циклів прання; 3 бали

Рисунок 3.11 – Забруднення кавою натуральних тканин

кавові ліпіди та пігменти утворюють стійкі хімічні зв'язки з целюлозними волокнами, які неможливо повністю зруйнувати за допомогою стандартного прання. Подальші цикли призводять лише до поступового механічного зносу тканини;

2) матеріали тваринного походження (кашемір) виявилися найбільш вразливими до дії ВКГ. Висока пористість та сорбційна здатність вовняних волокон сприяє глибокому проникненню пігменту. Багаторазове прання не здатне вивести забруднення (показник не підіймається вище 2,0 балів), а інтенсивна обробка призводить до швидкої деструкції виробу;

3) синтетичні матеріали проявляють найвищу стійкість до дії барвників ВКГ завдяки гідрофобності та низькій пористості волокон. Це дозволяє повністю відновити початковий стан тканини (5,0 балів) вже на 3-му циклі прання.

Попри високу фрикційну ефективність ВКГ як антислизького агенту, її широке впровадження має суттєві еколого-експлуатаційні обмеження. Економічна вигода від використання безкоштовної сировини фактично перекреслюється високим ризиком незворотного псування особистих речей пішоходів. З екологічної точки зору, необхідність інтенсивного відпирання стійких кавових забруднень генерує вторинний негативний вплив на довкілля: нераціонально збільшується споживання прісної води, зростають обсяги скидання поверхнево-активних речовин (ПАР) у каналізаційні мережі, а також прискорюється утворення текстильних відходів через передчасне зношування одягу. Слід також відзначити, що навіть за відсутності падіння, при ходьбі кавова гуща з поверхні землі потрапляє на нижню частину одягу у вигляді дрібних плям, що також призводить до необхідності прання речей.

### 3.5 Висновки до розділу 3

1. Експериментально доведено, що глибока дегідратація матеріалу до вмісту вологи 10 мас.% ефективно пригнічує патогенну мікрофлору, подовжуючи термін екологічно безпечного зберігання кавової гущі без ознак

пліснявіння від кількох діб до майже одного року. Досягнення зазначеного вмісту вологи є обов'язковою технологічною умовою для запобігання неконтрольованій мікробіологічній деструкції ВКГ перед її подальшим використанням в якості вторинної сировини.

2. Обґрунтовано еколого-економічну доцільність використання залишкового тепла обладнання, яке присутнє у закладах харчування, для зменшення вмісту вологи у відходах кавової гущі. Встановлено визначальну роль градієнту температури під час охолодження: швидкість зниження температури  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$  забезпечує глибше зневоднення матеріалу порівняно швидкістю зниження температури  $2,83\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ . Запропонований підхід дозволяє суттєво знизити вологість кавової гущі при нульових додаткових витратах електроенергії.

3. Встановлено, що оптимальним вмістом відпрацьованої кавової гущі у складі мильних композицій ручного виготовлення є  $25\text{ мас.}\%$ , оскільки саме ця концентрація забезпечує рівномірний розподіл добавки без утворення грудочок та технологічних ускладнень при гомогенізації. Експериментально доведено залежність механізму очищувальної дії від дисперсності наповнювача: великі фракції ефективніше видаляють паливно-мастильні матеріали за рахунок сильної абразивної дії, тоді як дрібні частки краще справляються з пігментними забрудненнями.

4. Доведено, що оптимальна норма внесення відпрацьованої кавової гущі для покращення гідродинамічних властивостей важких глинистих ґрунтів становить до  $0,2\text{ т/га}$ . Перевищення цієї дози спричиняє критичне закислення середовища, що незворотно пригнічує вкорінення та розвиток рослин у довгостроковій перспективі.

5. Оцінка використання кавової гущі як антислизького реагенту показала, що її застосування є доцільним виключно в зонах із низькою інтенсивністю пішохідного руху.

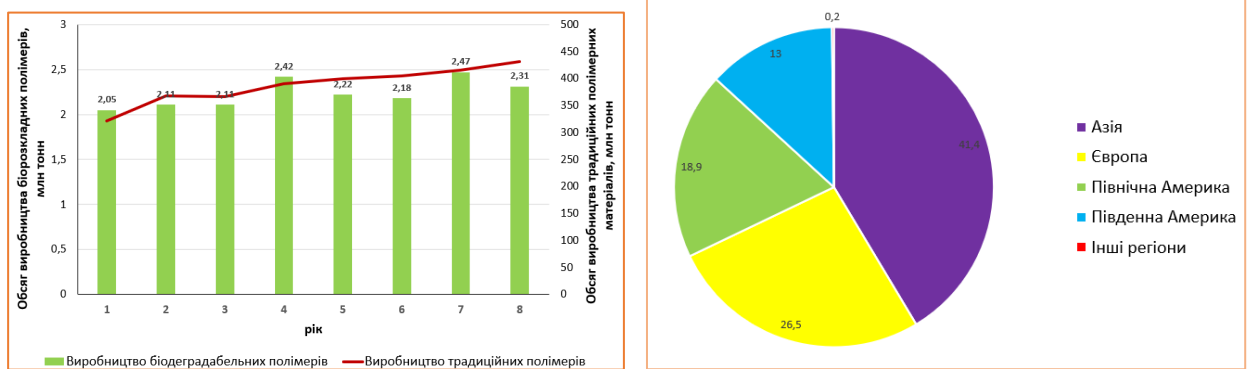
Зміст розділу відображено у наступних наукових публікаціях [31], [32], [52], [96], [125].

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КАВОВОЇ ГУЩІ ЯК ЕКОЛОГІЧНОГО НАПОВНЮВАЧА ДЛЯ БІОРОЗКЛАДНИХ КОМПОЗИТИВ

### 4.1 Технологічні основи використання кавової гущі у складі полімерних матеріалів

Полімерні матеріали набули широкого розповсюдження в сучасному світі завдяки своїм високим фізико-механічним, теплофізичним та хімічним характеристикам у поєднанні з низькою собівартістю та технологічністю виробництва [58]. Протягом останніх десятиліть обсяги споживання полімерів стрімко зростають, що зумовлено високим попитом у різноманітних галузях промисловості, зокрема в пакувальній індустрії, автомобілебудуванні, будівництві та сфері охорони здоров'я. Водночас така інтенсифікація виробництва призвела до загострення глобальних екологічних проблем, серед яких: критична залежність від викопних ресурсів, посилення парникового ефекту внаслідок емісії газів, а також масштабне забруднення довкілля стійкими до біодеградації полімерними відходами [126].

Зазначені виклики стимулювали розроблення альтернативних рішень, зокрема створення біобазованих та біодеградабельних полімерів, таких як полімолочна кислота (ПЛА), полібутиленсукцинат (ПБС), полібутиленадипаттерефталат (ПБАТ) та полігідроксиалканоати (ПГА), покликаних замінити традиційні полімерні матеріали нафтохімічного походження [127]. Попри ці досягнення, частка біополімерів на світовому ринку залишається незначною порівняно із синтетичними полімерами (рис.4.1) та не перевищує 0,5 % від всіх вироблених полімерних матеріалів. Головним бар'єром є те, що біополімери часто поступаються за своїми фізико-механічними характеристиками традиційним аналогам, що суттєво обмежує їхню конкурентоспроможність у сферах із високими експлуатаційними вимогами. Крім того, висока собівартість виробництва стримує їхнє масове



а – обсяги виробництва біорозкладних та традиційних полімерних матеріалів за останні 10 років; б – частка у світовому виробництві біорозкладних полімерних матеріалів

Рисунок 4.1 – Аналіз ринку біорозкладних полімерних матеріалів

впровадження, особливо в сегментах великотоннажного виробництва виробів короткострокового використання, таких як харчове пакування. Подолання цих обмежень є критично важливим для масштабування застосування екологічно безпечних біополімерів.

Що стосується України, то вітчизняне великотоннажне виробництво базових біополімерів наразі відсутнє. Вітчизняна індустрія екологічного пакування та біорозкладних виробів повністю залежить від імпорту дороговартісної європейської та азійської сировини. В умовах складної економічної ситуації та порушення логістичних ланцюгів така імпортозалежність робить кінцеву продукцію з біопластиків економічно недоступною для масового українського споживача. Саме тому пошук доступних місцевих вторинних ресурсів (зокрема, відпрацьованої кавової гущі) як дешевих органічних наповнювачів для імпортних біополімерних матриць є стратегічно важливим завданням [128, 129]

В умовах сучасної глобальної екологічної кризи використання біорозкладних полімерних матеріалів для виготовлення товарів масового вжитку стає стратегічним напрямом скорочення обсягів накопичення твердих побутових відходів, оскільки забезпечує їхнє швидке розкладання під впливом

абіотичних факторів та мікроорганізмів [130, 131]. Відповідно, одним із найперспективніших шляхів одержання екологічно безпечних біорозкладних матеріалів зі зниженою собівартістю є модифікація традиційних полімерних матриць шляхом введення органічних наповнювачів.

Поєднання синтетичного полімеру з природними органічними наповнювачами (наприклад, крохмалем, рисовою лузгою, деревним борошном) або відходами споживання може надавати матеріалу новий набір властивостей, зокрема підвищену здатність до швидкої біодеградації [132]. Водночас харчова промисловість генерує величезну кількість сільськогосподарських та промислових побічних відходів, таких як пшеничні висівки, дробина, корінці ячменю, ріпакова макуха, сироватка, виноградні вичавки, жом цукрового буряка, фінікові вичавки, кавова луска, кавова гуща та лушпиння какао-бобів. Серед них кавова гуща, побічний продукт процесу варіння кави, привернула значну увагу як універсальний та екологічний матеріал. Кавову гущу досліджували для різноманітних застосувань, включаючи будівельні матеріали, біопестициди та фототермічні системи для очищення води за допомогою сонячної енергії. У контексті полімерної науки, лігноцелюлозний склад кавової гущі, багатий на целюлозу, геміцелюлозу, лігнін, білки та ліпіди, робить його перспективним кандидатом для підвищення продуктивності та стійкості біополімерних композитів.

Целюлоза та геміцелюлоза можуть підвищити жорсткість та механічну міцність завдяки армуванню волокнами, тоді як лігнін може покращити термічну стабільність завдяки своїй ароматичній структурі. Білки можуть сприяти кращій міжфазній адгезії з полімерною матрицею, тим самим покращуючи механічну цілісність. Ліпіди та цукри можуть впливати на гнучкість та ударостійкість, а також на гідрофобність матеріалу.

В силу природного походження кави та відповідно відходів її споживання, фактичної безкоштовності кавових відходів, а також складу (табл.2.2), що містить активні нутрієнти для мікроорганізмів та грибів, а також мікроелементи, що сприяють відновлення ґрунту, доцільно його використання



як один з органічних наповнювачів біорозкладних полімерів. Відомо кілька публікацій, в яких описано застосування ВКГ як наповнювача в біорозкладних екологічно безпечних композиційних матеріалах [131–136].

Запатентовані склади та метод виготовлення виробів з використанням кавових відходів [137], що включає порошок ВКГ, термореактивну смолу (меламін, фенол, сечовина або поліуретан), змішану з крохмалем, карбонатом кальцію, тальком та волокнистим наповнювачем. Усі інгредієнти застосовуються у порошкоподібній формі з розмірами порошків, близькими до розмірів частинок кавової гущі, а остання висушується до вологості від 5 до 15%. Вироби виготовляються методом термоформування за нормальної температури 110–150 °С. Для остаточного доведення потрібно грубе і тонке шліфування заготовок. Недоліком є неможливість вторинної переробки виробів після використання, оскільки основою композиту є термореактивна смола. Відомостей про терміни біодеградації не наводиться, проте відомо, що термореактивні пластики погано піддаються гідро- та біорозкладу. Запатентований екологічно безпечний біопластик [138], що включає 10–20 мас. % ВКГ, 47–65 мас. % суміші поліпропілену та поліетилену, від 5 до 20 % неорганічного наповнювача, в якості якого може бути використаний карбонат кальцію, тальк, слюда, а також технологічні добавки. Недоліками є погана біодеградація композиції за рахунок великого вмісту синтетичних полімерів – суміші поліолефінів (до 65 мас. %) і можливість утворення екологічно шкідливого мікропластику внаслідок неповного розкладання основи композиційного матеріалу [139]. Вивчено біодеградабельний екологічно безпечний композиційний матеріал, що містить порошок ВКГ [140], що включає ПЛА, ПБАТ, вініл-біс стеарамід, еруциламід, поліетиленовий віск та солі стеаринової кислоти. Як неорганічні наповнювачі використовуються тальк, карбонат кальцію або волластоніт. Композит характеризується складним складом, що включає п'ять полімерних компонентів, що подорожчає кінцевий продукт та ускладнює процес виробництва. Відомостей про біодеградацію композиційного екологічно безпечного матеріалу не наводиться. Розроблено

також склад екологічно безпечного композиту, що включає 20–50 мас. % висушеного порошку ВКГ, 40–70 мас. % пластику, вибраного із групи: полістирол, поліпропілен, поліетилен, 5–25 мас. % карбонату кальцію, 3–10 мас. % модифікатора суміші, що складається з сумісного агенту та полімерного зв'язуючого [141]. Недоліками є погана біодеградація композиту за рахунок великого вмісту гідрофобного полімеру – до 70 мас. % та можливість утворення екологічно шкідливого мікропластику внаслідок неповного розкладання основи композиційного матеріалу.

Попередні дослідження продемонстрували інтеграцію ВКГ у різні біополімери, такі як ПЛА [142], суміші ПЛА/полігидроксибутирату (ПГБ) [143], полібутиленсукцинат (ПБС), та ПБАТ, з різним впливом на фізичні, механічні та теплові властивості отриманих композитів.

Наприклад, de Vromfим та ін. виявили, що включення 10–30 мас.% ВКГ до ПЛА змінює кристалічність, знижує температуру склування та підвищує в'язкість при помірних рівнях наповнювача, хоча вищий вміст призводить до збільшення пористості та зниження густини [144]. Gaidukova та ін. повідомили, що додавання 20–60 мас.% КГ до ПБС збільшує жорсткість та мікротвердість, але знижує міцність на розрив та видовження при розриві зі збільшенням вмісту наповнювача [145].

Термічна стабільність знижується зі збільшенням завантаження ВКГ, тоді як кристалічність залишається стабільно високою ( $\geq 60\%$ ). Аналогічно, Moustafa та ін. спостерігали, що включення ВКГ до ПБАТ знижує міцність на розтяг та пластичність, але покращує жорсткість, при цьому біокомпозити демонструють добру дисперсію та підвищену гідрофільність поверхні завдяки наявності гідрофільного лігноцелюлозного наповнювача [146].

Ці дослідження підкреслюють, що ВКГ може служити функціональним наповнювачем у біопластиках, але також показують, що властивості композитів значною мірою залежать від типу матриці, завантаження наповнювача та міжфазної сумісності. Незважаючи на наявність досліджень щодо застосування ВКГ у складі біополімерів, вплив фізико-хімічних

параметрів гущі на формування структури та кінцеві властивості таких біокомпозитів вивчений недостатньо. Це, у свою чергу, ускладнює подальшу оптимізацію їхніх фізико-механічних характеристик [82].

#### 4.2 Дослідження фізико-хімічних характеристик кавової гущі

На відміну від низькотехнологічних сфер застосування кавової гущі (наприклад, у косметичній промисловості при виготовленні мила, де вологість і ступінь термічної деградації наповнювача не є критичними з точки зору впливу на кінцеві властивості отриманого продукту), створення полімерних біорозкладних композиційних матеріалів висуває жорсткі вимоги до режимів підготовки сировини [86]. Процес сушіння кавової гущі має бути максимально рівномірним та виключати локальні перегріву або осмолення матеріалу. По-перше, наявність залишкової вологи за високих температур переробки полімерних розплавів (160–200 °C) ініціює не лише інтенсивне пороутворення, але й реакції гідролітичної деструкції поліефірних матриць, що призводить до падіння їхніх фізико-механічних показників. По-друге, локальне осмолення та термічна деструкція лігноцелюлозної основи кавової гущі під час агресивного сушіння призводять до деактивації поверхневих гідроксильних груп. Це блокує можливість утворення міцних міжфазних зв'язків між наповнювачем та полімерною матрицею, створюючи слабкі граничні шари, які діють як концентратори напружень у готовому композиті.

Підготовка відпрацьованої кавової гущі як наповнювача здійснювалася за тристадійною схемою (рис. 4.2а), що дозволяє уникнути осмолення та агломерації. Під час нагрівання кавової гущі виділяються маслянисті речовини, які внаслідок високої адгезії та взаємодії між собою призводять до злипання частинок і утворення різних за розміром агломератів. При виготовленні мильних композицій такі агломерати руйнуються механічно під час переміщування. Для полімерних композиційних матеріалів після етапу просушування кавову гущу піддавали дезагломерації та гомогенізації шляхом

розтирання у керамічній ступі до отримання однорідної дисперсної маси, придатної для введення в полімерну матрицю (рис.4.2б). Таким чином, при використанні кавової гущі у складі біорозкладних полімерних композиційних матеріалів можливо два підходи до процесу сушіння: тристадійний під дією високих температур (рис.4.2а), або у тонкому шарі на повітрі, як описано у п.3.1.



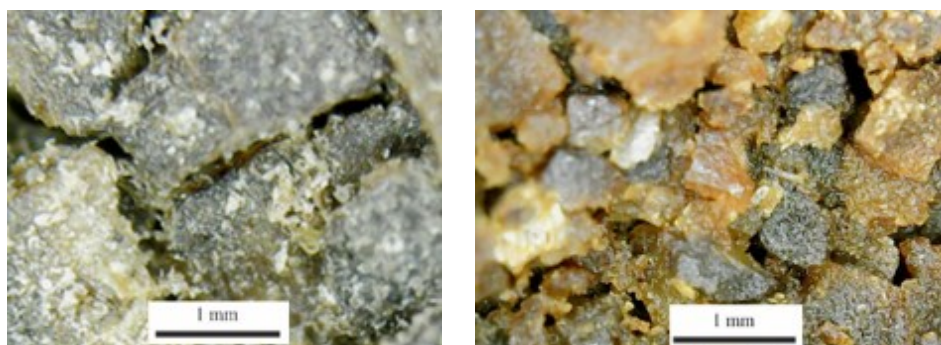
а – тристадійний процес сушки; б – зовнішній вигляд після гомогенізації  
Рисунок 4.2 – Сушка кавової гущі для використання у складі полімерних композиційних матеріалів

З метою оцінки дисперсності наповнювача було досліджено гранулометричний (фракційний) склад суміші відпрацьованої кавової гущі типу ВКГ1 та ВКГ2. Розподіл частинок за розмірами визначали методом механічного ситового аналізу з використанням набору каліброваних сит із розміром комірок 400, 200 та 100 мкм за методикою, описаною у п.2.2.

Масова частка крупної фракції КГ, затриманої на ситі 400 мкм, становить 9,8 % мас. Основний об'єм матеріалу (81,0 % мас.) концентрується на ситі 200 мкм, тоді як частка дрібної фракції, затриманої на ситі 100 мкм, дорівнює 9,2 % мас. Фактично, результати аналізу підтверджують яскраво виражений унімодальний характер гранулометричного розподілу дослідженої суміші

ВКГ1 та ВКГ2 із чітким максимумом, що відповідає фракції 200 мкм.

Висока однорідність розмірного складу наповнювача є сприятливим фактором, що дозволяє мінімізувати кількість концентраторів напружень у полімерній матриці. Візуалізацію морфологічних особливостей частинок різних фракцій ВКГ наведено на відповідних мікрофотографіях (рис. 4.3).



а

б

а – розмір часток > 400 мкм; б – розмір часток < 200 мкм

Рисунок 4.3 – Мікрофотографії частинок ВКГ

З результатів морфологічних досліджень, представлених на рис. 4.3, видно, що ВКГ характеризуються пластинчастою структурою частинок. Частинки усіх фракцій ВКГ, вкриті смоляними або маслянистими речовинами, про що свідчить помітний блиск на мікрофотографіях.

Для дослідження сумісності ВКГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F проведено потенціометричний аналіз їх поверхні [82]. Обрано рН-метричний метод визначення рівня рН водних суспензій  $pH_0$  (табл. 4.1). У водних суспензіях потенціометричним методом досліджувалась зміна рН з часом  $pH_{шт}$  та розраховувались рН у рівноважному стані  $pH_{сусн}^p$  (рис. 4.4, табл. 4.1). В ході дослідження експериментально визначено, що поверхня термопластичного біопластику марки GEMABIO F має характер близький до нейтрального з слабо-основною силою активних центрів  $pKa \approx 7,08 - 7,35$ , поверхня ВКГ має характер також близький до нейтрального з слабо-кислотою силою активних центрів  $pKa \approx 6,30 - 6,47$ .

Таблиця 4.1 – Результати визначення інтегральної кислотності

Матеріал	$pH_0$	$pH_{\text{суп}}^p$	$pH_{\text{ПТ}}$	Час встановлення рівноважного стану, с
Термопластичний біопластик марки GEMABIO F	7,43	7,08	7,35	245
Кавова гуща	7,59	6,30	6,47	58

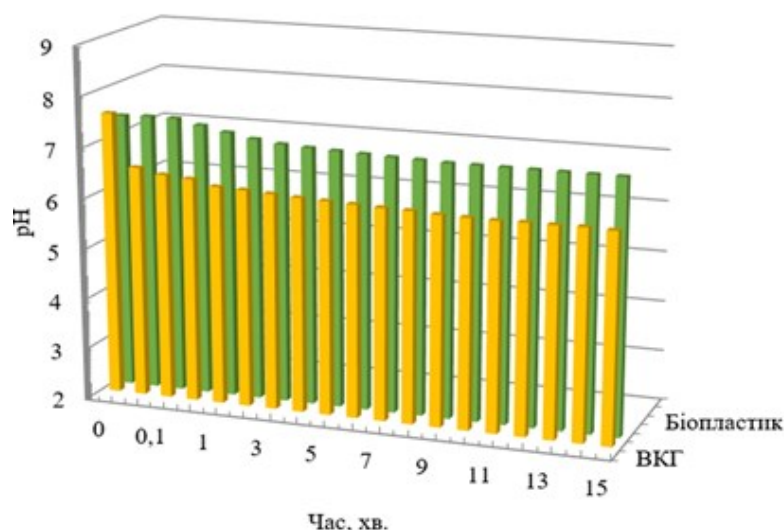
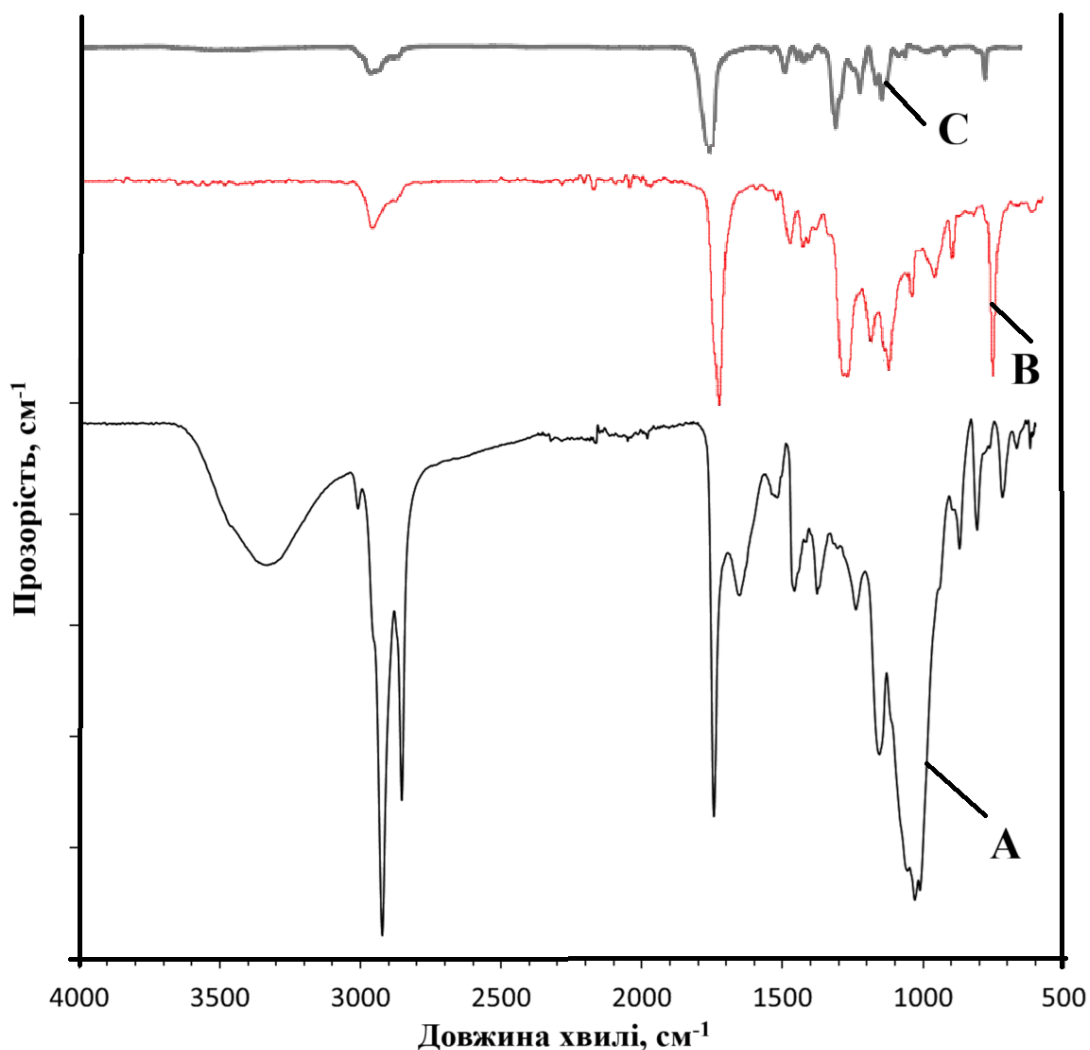


Рисунок 4.4 – Результати дослідження кислотно-основних поверхневих властивостей ВКГ та термопластичного біополімеру марки GEMABIO F

Оскільки сумісність полімерної матриці та органічного наповнювача безпосередньо залежить від наявності активних функціональних груп на його поверхні, наступним етапом роботи стало дослідження хімічної будови КГ. Для ідентифікації цих поверхневих груп та підтвердження збереження лігноцелюлозної структури після етапів термічного сушіння було застосовано метод інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR).

Отриманий спектр FTIR КГ, показаний на рис. 4.5а, демонструє широкий та складний діапазон смуг поглинання, що відповідають гетерогенному біохімічному складу матеріалу. Широка смуга з центром при  $3336 \text{ см}^{-1}$  пояснюється валентними коливаннями О–Н від між- та внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, головним чином пов'язаних з

полісахаридами, такими як целюлоза та геміцелюлоза, а також фенольними гідроксильними групами в лігніні. Слабка смуга при  $3010\text{ см}^{-1}$  пов'язана з розтягом C–H у цис-конфігурованих подвійних зв'язках (C=C), що зустрічаються в ненасичених жирних кислотах, таких як лінолева та олеїнова кислоти, присутніх в КГ. Поглинання при  $2923\text{ см}^{-1}$  та  $2854\text{ см}^{-1}$  відповідає валентним



А – висушена кавова гуща, В – GEMABIO F, С – розроблена композиція  
вмістом 40% мас. ВКГ

Рисунок 4.5 – Спектри ATR-FTIR

коливанням зв'язків C–H в аліфатичних групах  $\text{CH}_2$ , які характерні для структур жирних кислот [82].

Чітко виражений пік поглинання при  $1744\text{ см}^{-1}$  характерний для валентних коливань карбонільного С–О від етерних груп, зазвичай пов'язаних з ліпідними компонентами та іншими структурами на основі вуглеводнів. Поглинання при  $1649\text{ см}^{-1}$  пояснюється валентними коливаннями С–С цис-олефінів (цис- $\text{RHC CHR}$ ) і також може відповідати валентним коливанням С–Н амідів I, характерним для білкових структур. Поглинання при  $1456\text{ см}^{-1}$  пов'язане з деформаційними коливаннями С–Н в аліфатичних групах  $\text{CH}_2$  та  $\text{CH}_3$ , тоді як смуга при  $1377\text{ см}^{-1}$  відповідає симетричному деформаційному коливанню С–Н в групах  $\text{CH}_2$ , яке зазвичай приписується компонентам кавової олії.

Смуга поглинання при  $1240\text{ см}^{-1}$  пов'язана зі зв'язками С–О–С у целюлозі та може також включати валентні коливання С–О з функціональної групи О–С–О у геміцелюлозах. Смуга при  $1029\text{ см}^{-1}$  виникає внаслідок валентних коливань С–О та С–С, а також коливань  $\text{C}_6\text{H}_2\text{O}_6$ , характерних для целюлозних структур. Поглинання при  $808\text{ см}^{-1}$  свідчить про наявність ізомерів хлорогенової кислоти, а також деформаційного коливання  $\text{C1-H}$  в арабінах та арабіногалактанах у матриці геміцелюлози. Сигнал при  $718\text{ см}^{-1}$  є результатом перекриття аліфатичних коливань  $\text{CH}_2$  та позаплощинних деформацій цис-дизаміщених олефінів, які зазвичай зустрічаються в компонентах кавової олії.

Загалом, дані ІЧ-спектроскопії з Фур'є підтверджують наявність кількох функціональних груп, включаючи гідроксильні, карбонільні та ефірні зв'язки, які відображають вміст целюлози, геміцелюлози, лігніну, жиру та білка у відпрацьованій кавовій гущі. Важливо зазначити, що склад сушеної КГ піддається природній варіативності через відмінності в походженні кави, типі зерен, рівні обсмажування та умовах заварювання. Така варіативність може впливати на відносну кількість лігноцелюлозних та ліпідних компонентів, потенційно впливаючи на взаємодію наповнювач-матриця, термічну стабільність та поглинання води.

Варто зауважити, що для досягнення максимальної чистоти



експерименту та забезпечення стабільності показників дослідних зразків, у рамках цієї роботи застосовувалася виключно одна уніфікована партія відпрацьованої кавової гущі. Проте, враховуючи потенціал комерціалізації та масштабування розроблених екоматеріалів, предметом майбутніх досліджень має стати комплексна оцінка впливу сировинних факторів. Зокрема, потребує глибокого аналізу те, яким чином сортова приналежність кави, рівень її обсмажування та параметри екстракції відобразатимуться на стабільності структури та відтворюваності властивостей композиту в умовах реального промислового виробництва.

ІЧ спектри КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F показують функціональні групи, пов'язані з обома матеріалами. КГ вносить піки від гідроксильних О-Н та С-Н зв'язків в області  $2800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ , а етерні групи (від залишкових олій) близько  $1740\text{ см}^{-1}$ . Для термопластичного біопластику марки GEMABIO F характерні піки, такі як етерні зв'язки С-О та ароматичні С-Н валентні зв'язки. У екологічно безпечних біорозкладних композитах з вмістом 40%мас. КГ ці піки видимі, причому інтенсивність піків, пов'язаних з КГ, зростає з кількістю використаної КГ. Фактично ІЧ-спектр екологічно безпечних біорозкладних композитів показують комбінацію піків обох компонентів [82].

#### 4.3 Дослідження технологічних та експлуатаційних властивостей екологічно безпечних біорозкладних композитів з використанням кавової гущі

Створення новітніх екологічно безпечних матеріалів вимагає не лише досягнення їхньої здатності до біодеградації, але й забезпечення стабільного комплексу фізико-механічних показників. Для успішного переходу від лабораторних зразків до реального промислового впровадження необхідно детально вивчити поведінку біокомпозитів на основі ВКГ як під час переробки у в'язкотекучому стані, так і в процесі їхньої подальшої експлуатації. З цією метою було проведено серію комплексних досліджень технологічних та

експлуатаційних властивостей отриманих матеріалів за різного ступеня наповнення матриці. Отримані результати дозволяють оптимізувати базову рецептуру композиту та науково обґрунтувати сфери його потенційного використання.

Головним бар'єром для широкого комерційного впровадження біорозкладних полімерів є їхня висока вартість порівняно з великотоннажними синтетичними поліолефінами. З економічної точки зору, введення невеликих кількостей органічного наповнювача (10–20 мас. %) не забезпечує суттєвого здешевлення кінцевого матеріалу, оскільки економія на вартості матриці фактично перекреслюється додатковими енерговитратами на стадії змішування.

Натомість стратегія висококомпонентного наповнення (введення понад 40 мас. % дисперсних відходів) дозволяє кардинально змінити економіку виробництва. Оскільки відпрацьована кавова гуща є вторинною сировиною з нульовою або від'ємною вартістю (через необхідність витрат на її утилізацію), заміщення нею значної частки об'єму дороговартісної полімерної матриці призводить до прямого пропорційного зниження собівартості сировини [59,147,148].

Як відзначають дослідники [146], за високого ступеня наповнення (>40 мас.%) система переходить у клас матеріалів, подібних до деревинно-полімерних композитів. Хоча за таких концентрацій ВКГ спостерігається прогнозоване зниження показників відносного видовження та еластичності, композит набуває суттєво вищої жорсткості (зростає модуль пружності). Таких фізико-механічних характеристик цілком достатньо для виготовлення жорсткої екологічної тари, агроконтейнерів або побутових виробів. Таким чином, вміст ВКГ на рівні 40 мас. % є економічним оптимумом, за якого суттєве здешевлення матеріалу повністю виправдовує та компенсує зміну його деформаційних характеристик. Виходячи з вищепереліченого, для досліджень були відібрані композиції, які містять 40 – 80 мас.% ВКГ (табл.4.2)

Таблиця 4.2 – Склад розроблених біорозкладних полімерних композиційних матеріалів

Шифр композиції	Вміст компонентів, мас.%	
	GEMABIO F	ВКГ
БПК1	60	40
БПК2	40	60
БПК3	20	80

При поєднанні компоненти ретельно перемішувалися та перед загрузкою до бункера лабораторного екструдера мали неоднорідний вигляд, який зумовлений різницею розмірів часток полімерного матеріалу та ВКГ (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Суміш термопластичний біодеградабельний полімер/ВКГ

Технологічно екологічно безпечні біорозкладні композити перероблялися без особливостей за винятком фази завантаження, яка відбувалася порційне, аби не було зсипання дрібної фракції КГ в зону загрузки екструдера та розділення суміші – термопластичний біопластик марки GEMABIO F та КГ під впливом вібрацій, які утворюються під час роботи екструдера та діють на його бункер [70].

Візуальна фіксація дозволяє визначити вплив ступінь наповнення полімерного композиційного матеріалу кавовою гущею (рис.4.7).

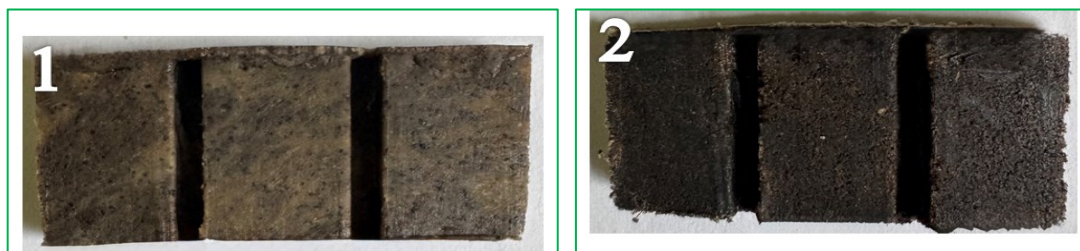


Рисунок 4.7 – Зразки екологічно безпечних біорозкладних композитів BPK1 та BPK2

Зі знімків (рис.4.7) можна визначити здатність наповнювача розподілятися в полімерній матриці по зовнішньому вигляду поверхні зразків [82]. У складі екологічно безпечних біорозкладних композитів BPK1 привалює полімерна матриця. На поверхні зразка BPK1 візуально виділяється невелика кількість чорних краплень ВКГ, це вказує на те, що наповнювач добре диспергувався в полімерній матриці та його кількість можна збільшити. Зі збільшенням кількості ВКГ до 60 % мас. спостерігається зміння зовнішнього вигляду композитів зі зміною кольору з сірого на темно коричневий та збільшення дисперсної фази ВКГ на поверхні зразка. За візуальними спостереженнями можна визначити перехід від середньонаповненого біодеградабельного композиту BPK1 до високонаповненого біорозкладного композиту BPK2 [70].

Успішне масштабування та впровадження розроблених біокомпозитів у промислове виробництво вимагає чіткого розуміння їхньої поведінки під час формування. Визначення температури топлення є критично важливим, оскільки введення дисперсної фази у вигляді відпрацьованої кавової гущі (ВКГ) здатне впливати на термодинаміку системи та вимагати коригування температурних режимів екструзії чи лиття. Показник плинності розплаву (ППР) є головним індикатором реологічних властивостей матеріалу. Відомо

[138, 141, 142], що наявність твердих органічних частинок закономірно обмежує рухливість полімерних макромолекул, тому контроль ППР необхідний для запобігання надмірному в'язкому опору та гарантування повного заповнення формувального оснащення. Крім того, оцінка густини композицій є обов'язковою для прогнозування масо-габаритних характеристик майбутніх виробів та точного розрахунку об'ємної собівартості. З огляду на це, було проведено комплексний аналіз зазначених технологічних параметрів для композицій із різним вмістом ВКГ (табл.4.3) [70].

Таблиця 4.3 – Впливу вмісту ВКГ на комплекс технологічних характеристик біорозкладних композитів

Показник	Одиниці виміру	Значення для композицій		
		БПК1	БПК2	БПК3
ППР	г/10 хв	3,5±0,1	2,5±0,1	2,1±0,1
Густина	г/см <sup>3</sup>	1,254±0,1	1,044±0,1	0,994±0,1
Температура топлення	°C	150±0,1	160±0,1	165±0,1

Аналіз отриманих експериментальних даних (табл. 4.3) дозволяє виявити чіткі закономірності впливу концентрації дисперсного наповнювача ВКГ на технологічні параметри розроблених композитів. Підвищення вмісту відпрацьованої кавової гущі від 40 до 80 мас. % супроводжується закономірним зниженням показника плинності розплаву (ППР) з 3,5 до 2,1 г/10 хв. Такий реологічний відгук системи пояснюється тим, що тверді органічні частинки створюють суттєвий гідродинамічний опір у розплаві, обмежуючи макромолекулярну рухливість полімерної матриці. Це свідчить про зростання в'язкості високонаповнених систем (БПК3), що потребуватиме коригування тиску інжекції під час їхньої переробки.

Паралельно зафіксовано підвищення температури топлення композицій зі 150 °C до 165 °C. Наявність жорсткого просторового лігноцелюлозного каркаса з ВКГ чинить стеричні перешкоди для фазового переходу полімеру, вимагаючи більшої кількості теплової енергії для переведення матеріалу у в'язкотекучий стан [70].

Особливий практичний інтерес становить зниження густини композицій з 1,254 г/см<sup>3</sup> (для БПК1) до 0,994 г/см<sup>3</sup> (для БПК3). Цей ефект зумовлений як меншою питомою вагою самої лігноцелюлозної основи порівняно з базовим полімером, так і ймовірним формуванням мікропористої структури на межі розділу фаз за екстремально високих ступенів наповнення. З екологічної точки зору, густина матеріалу менша за густину води (< 1 г/см<sup>3</sup>) є суттєвою перевагою у контексті управління відходами. У разі несанкціонованого потрапляння виробів із БПК3 у відкриті водойми, вони залишатимуться на поверхні (у пелагічній зоні). Це не лише робить їх доступними для механічного збору поверхневими системами очищення, але й забезпечує постійний вплив сонячного випромінювання (УФ-спектра) та кисню повітря, що критично необхідно для інтенсифікації процесів фотоокиснювальної деструкції перед початком біологічного розкладання.

На наступному етапі було досліджено міцнісні властивості розроблених біорозкладних композитів на основі рецептур БПК1, БПК2 та БПК3. Біорозкладні композити розроблені на основі рецептури БПК1 мають вищі механічні показники, ніж композити розроблені за рецептурою БПК2 та БПК3 (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Міцнісні показники біорозкладних композитів на основі термопластичного біопластику марки GEMABIO F та ВКГ

Показник	Одиниці виміру	Значення для композицій		
		БПК1	БПК2	БПК3
Ударна в'язкість, $\alpha_y$	кДж/м <sup>2</sup>	5,99±0,1	4,76±0,1	3,56±0,1
Міцність при статичному вигині, $\sigma_v$	МПа	10,5±0,1	7,43±0,1	5,53±0,1
Міцність на розрив		7,5±0,1	5,3±0,1	4,6±0,1
Подовження при розриві	%	43,3±0,1	13,4±0,1	10,4±0,1

Із підвищенням вмісту ВКГ з 40 до 80 % мас. спостерігається погіршення деформаційно-міцнісних характеристик композитів через перенаповнення матриці. Ударна в'язкість знизилася на 40,5 % (на 2,43 кДж/м<sup>2</sup>), міцність при

вигині впала майже вдвічі (на 4,97 МПа), а міцність на розрив скоротилася на 2,9 МПа. Водночас еластичність матеріалу, яка характеризується подовженням при розриві, зменшилася більш ніж у 4 рази (на 32,9 %), що підтверджує суттєве зростання жорсткості системи

Початкове подовження при розриві термопластичного біопластику марки GEMABIO F було значно вищим ( $446,0 \pm 53,4\%$ ), ніж у розроблених біорозкладних композитів, що відображає їх більш пластичну природу, але знизилося до  $10,4 \pm 1,9\%$  при 80 % мас. ВКГ через подібну крихкість, викликану наповнювачем.

В той же час, можна припустити, що підвищенні міцносні показники екологічно безпечних біорозкладних композитів БПК1 пов'язані з більшою кількістю полімерної фази в композиті, яка забезпечує гомогенність дослідних зразків. Після міцностних випробувань було досліджено зруйновані зразки біорозкладних композитів БПК1 та БПК2. На рис. 4.8 представлені фотографії, на яких видно місце надлому зразків, де чітко спостерігається внутрішня структура розроблених біорозкладних композитів.

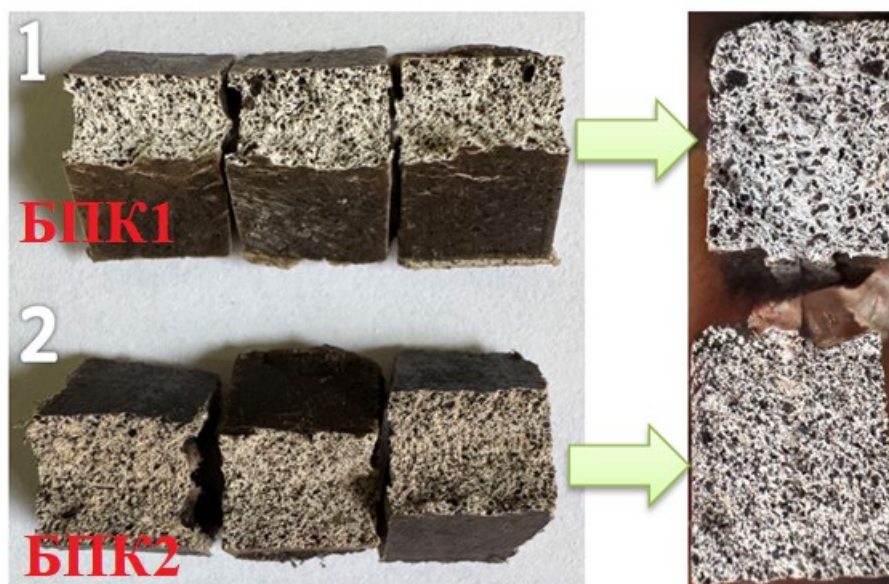


Рисунок 4.8 – Візуальне порівняння внутрішньої структури розроблених біорозкладних композитів

Зразки екологічно безпечних біорозкладних композитів БПК1 мають більш гомогенну структуру полімерної матриці (білого кольору) в порівнянні зі зразками екологічно безпечних біорозкладних композитів БПК2, в яких полімерна фаза рівномірно заповнена дисперсним наповнювачем. Таким чином, припущення щодо підвищених міцносних характеристик екологічно безпечних біорозкладних композитів БПК1, яке пов'язане з більшою кількістю полімерної фази, підтвердилося.

В цілому, результати дослідження механічних властивостей демонструють, що хоча ВКГ успішно підвищує жорсткість екологічно безпечних біорозкладних композитів, проте він знижує їхню міцність на розтяг та гнучкість через зниження міжфазної адгезії та підвищену крихкість.

Для комплексної оцінки розроблених біорозкладних композицій необхідно також дослідити їхню взаємодію з водним середовищем. Дослідження кінетики водопоглинання та розрахунок коефіцієнта дифузії мають значення з огляду на два ключові етапи життєвого циклу матеріалу. З експлуатаційної точки зору, проникнення вологи всередину полімерної матриці здатне викликати ефекти пластифікації та набухання, що безпосередньо впливає на розмірну стабільність і збереження фізико-механічних властивостей готових виробів під час використання. З іншого боку, з позиції екологічної безпеки, здатність композиту поглинати воду є головним тригером процесу його подальшого розкладання. Оскільки молекули води ініціюють гідролітичну деструкцію поліефірних зв'язків та створюють сприятливе середовище для активної життєдіяльності мікроорганізмів, висока швидкість дифузії вологи виступає необхідним каталізатором біодеградації. Відповідно, аналіз сорбційних характеристик дозволяє знайти оптимальний баланс між експлуатаційною довговічністю виробу та його здатністю до швидкої мікробіологічної утилізації після закінчення терміну служби.

Проведені дослідження збільшення маси зразків свідчить про стабільне збільшення водопоглинання екологічно безпечних біорозкладних композитів зі збільшенням вмісту ВКГ (табл.4.5). Це можна пояснити як гідрофільною



природою компонентів ВКГ (наприклад, целюлози, геміцелюлози, білків), так і розвитком мікропорожнин або мікроканалів на межі наповнювач-матриця екологічно безпечних біорозкладних композитів.

Таблиця 4.5 – Вплив вмісту ВКГ на водопоглинання та коефіцієнт дифузії розроблених біорозкладних композитів

Тип циклу	Збільшення маси зразків, мас. %			
	GEMABIO F	БПК1	БПК2	БПК3
Вода за температури 20 °С, через годин				
-10	0,01	1,15	3,74	4,77
- 20	0,53	1,30	3,75	4,85
- 40	0,54	1,35	3,77	4,95
-60	0,55	1,40	3,78	5,10
-80	0,56	1,42	3,85	5,66
Коефіцієнт дифузії	$0,95 \cdot 10^{-10}$	$1,14 \cdot 10^{-10}$	$2,77 \cdot 10^{-10}$	$3,14 \cdot 10^{-10}$

Ці мікроструктурні дефекти збільшують пористість композиту та створюють шляхи для проникнення води. Для розроблених біорозкладних композитів зі вмістом 40 мас. % ВКГ характерний невеликий приріст ваги, який через 80 годин не перевищує 1,5 %. Зі збільшенням вмісту ВКГ збільшення маси екологічно безпечних біорозкладних композитів, їх водопоглинання досягає 5,66 %. Але навіть такі показники не є критичними для виготовлення посуду. На основі експериментальних даних розраховано коефіцієнт дифузії для зразків розроблених біорозкладних композитів при різному вмісті КГ. Дані табл. 4.5 по визначенню коефіцієнту дифузії свідчать про гідрофобний характер поверхні усіх розроблених біорозкладних композитів [146]. Для всіх екологічно безпечних біорозкладних композитів зі збільшенням вмісту наповнювача КГ коефіцієнт дифузії також збільшувався. Найменший коефіцієнт дифузії за період дослідження сорбційних характеристик був характерний для термопластичного біопластику марки GEMABIO F та розробленої біодеградабельної композиції зі вмістом ВКГ на рівні 40 % мас.

При виготовленні посуду з біорозкладних композиційних полімерних

матеріалів для кав'ярень важливо також врахувати особливості протікання сорбційних процесів за підвищених температур, адже кавовий напій має температуру 90–100 °С, а також стійкість форм та розмірів за умови багаторазового миття посуду, тобто комплексної дії поверхнево-активних речовин та підвищеної температури. З метою прогнозування поведінки композитів під час санітарної обробки було досліджено кінетику сорбції робочих розчинів на основі неіоногенних ПАР, які є типовими для професійних посудомийних машин (табл.4.6).

Таблиця 4.6 – Вплив вмісту ВКГ на водопоглинання розроблених біорозкладних композитів в умовах дії неіоногенних ПАР та підвищеної температури

Кількість циклів <sup>1</sup>	Збільшення маси зразків, мас.%			
	GEMABIO F	БПК1	БПК2	БПК3
1	–	0,011	0,026	0,035
5	0,010	0,125	0,682	2,372
10	0,245	2,242	3,567	4,54
15	0,76	3,459	5,789	6,45

Примітка: 1 – тривалість циклу 3 хв, температура рідкого середовища з ПАР – 89°C.

Аналіз кінетики поглинання робочих розчинів ПАР за температури санітарної обробки показав закономірне зростання маси зразків зі збільшенням частки гідрофільного наповнювача ВКГ. Для всіх наповнених композицій (БПК1–БПК3) зафіксовано стрибкоподібне зростання маси в інтервалі між 5-м та 10-м циклами санітарної обробки, що свідчить про нелінійний характер сорбції ПАР. Так, для зразка БПК1 приріст маси збільшується майже у 18 разів (з 0,125 % до 2,242 %), а для БПК2 – у понад 5 разів.

З позиції фізико-хімії полімерів, такий різкий перехід пояснюється вичерпанням ресурсу індукційного періоду. Протягом перших п'яти циклів полімерна матриця ефективно капсулює частинки наповнювача, а сорбція

відбувається переважно у поверхневих шарах. Проте багаторазовий вплив гідротермальних ударів (нагрівання та охолодження в машині) у комбінації з дією неіоногенних ПАР призводить до диференційного набухання компонентів: гідрофільна лігноцелюлозна гуща збільшується в об'ємі швидше, ніж полімерна матриця. Це провокує виникнення значних внутрішніх напружень і, як наслідок, утворення мікротрищин на межі розділу фаз "полімер – наповнювач". Поява розвиненої сітки мікрodefektів після 5-го циклу запускає механізм інтенсивного капілярного транспорту: розчин ПАР, маючи низький поверхневий натяг, безперешкодно проникає вглиб композиту, що й фіксується як різке збільшення його маси. Цей етап фактично є тим моментом, коли починається втрата матеріалом своєї структурної цілісності та відбувається ініціація процесів його прискореної гідролітичної деструкції. Таким чином, 5 циклів миття посуду, який виготовлено з розробленого композиту БПК1 можна вважати оптимальним.

Традиційний кавовий напій має рівень рН у межах 4,8–5,0. Контакт біодеградабельного матеріалу з таким середовищем, особливо за підвищених температур експлуатації, теоретично ініціюватиме механізм кислотно-каталізованого гідролізу поліефірної матриці. Дані теоретичні припущення було підтверджено експериментально (табл.4.7).

Таблиця 4.7 – Вплив вмісту ВКГ на водопоглинання розроблених біорозкладних композитів в умовах дії кавового напою

Кількість циклів <sup>1</sup>	Збільшення маси зразків, мас.%			
	GEMABIO F	БПК1	БПК2	БПК3
1	–	0,25	0,46	0,56
5	0,12	0,23	1,23	2,96
10	0,34	2,89	4,12	5,13
15	0,95	4,05	6,17	6,98

Примітка: зразки не підвергались санітарній обробці за високих температур та дії ПАР

Протони ( $H^+$ ) кислого середовища виступають каталізаторами розщеплення макромолекулярних ланцюгів біополімеру, що супроводжується накопиченням кінцевих карбоксильних та гідроксильних груп. Оскільки ці функціональні угруповання є високогідрофільними, їхня поява локально підвищує спорідненість полімерної матриці до води. Це, своєю чергою, призводитиме до інтенсифікації дифузійних процесів і зростання загального показника сорбції. Крім того, поверхнева деструкція сполучної матриці неминуче призведе до оголення частинок відпрацьованої кавової гушці, активуючи капілярний транспорт рідини вглиб композиту. Таким чином, слабкокисле середовище виступає додатковим фактором прискорення сорбційних процесів та скорочення ефективного терміну експлуатації таких виробів в умовах прямого контакту з гарячими напоями

Отримані експериментальні дані (табл. 4.7) повністю підтверджують висунуті теоретичні припущення щодо деструктивного впливу слабкокислого середовища кавового напою на структуру біокомпозитів.

Як видно з результатів, навіть за відсутності високотемпературної санітарної обробки та впливу синтетичних ПАР, композиції демонструють інтенсивну кінетику водопоглинання. Збільшення масової частки ВКГ закономірно підвищує сорбційну ємність матеріалу: після 15 циклів контакту з напоєм зразок БПКЗ поглинає 6,98 мас. % рідини, що суттєво перевищує показник чистої матриці GEMABIO F (0,95 мас. %).

Особливо показовим є збереження нелінійного характеру сорбції з різким зростанням після проходження індукційного періоду. Для зразка БПК1 критичною точкою є рубіж між 5-м та 10-м циклами, де приріст маси збільшується більш ніж у 12 разів (з 0,23 до 2,89 мас. %). Водночас для високопоповненої системи БПКЗ (80 мас. % ВКГ) інтенсивна сорбція ініціюється значно раніше – вже на 5-му циклі спостерігається різке зростання маси до 2,96 мас. %.

БПК1 зберігає достатню структурну цілісність протягом перших 1–5 циклів використання, після чого запускається незворотний механізм

прискореної втрати бар'єрних властивостей. Враховуючі отримані дані щодо сорбційних характеристик під дією ПАР при санітарній обробці виробів з БПК1 та отримані дані щодо впливу кавового напою, 5 циклів використання є оптимальним, в тому числі з позиції концепції багаторазового використання виробів з екополімерів – концепція "short-life".

Здатність до біодеградації є головною властивістю для розроблених композицій. На представленому графіку (рис.4.9) відображено кінетику біодеградації досліджуваних композитних матеріалів протягом шести місяців, виражену через динаміку втрати їхньої маси.

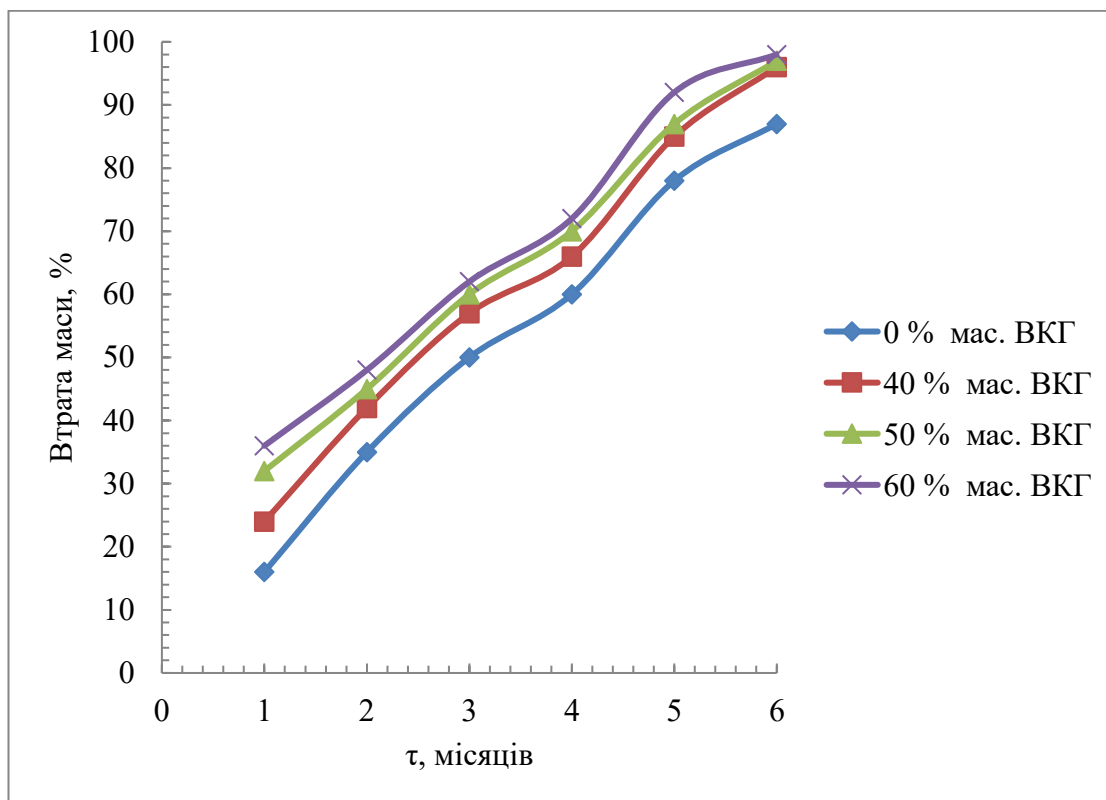


Рисунок 4. 9 – Дослідження процесів біодеградації розроблених біорозкладних композитів при різному вмісті ВКГ

Аналіз отриманих кривих однозначно свідчить, що підвищення вмісту відпрацьованої ВКГ у складі полімерної матриці суттєво інтенсифікує процес розкладання. Зокрема, базовий ненаповнений полімер (0 % мас. ВКГ) демонструє найнижчу швидкість деградації, досягаючи рівня втрати маси

близько 87 % наприкінці періоду спостереження. Натомість високонаповнені композиції характеризуються значно вищою схильністю до біорозпаду: так, зразок із максимальним вмістом наповнювача (60 % мас. ВКГ) деградує майже повністю, втрачаючи понад 97 % своєї початкової маси за пів року. Зафіксоване прискорення процесу безпосередньо пов'язане з високою гідрофільністю лігноцелюлозних частинок ВКГ, які сприяють інтенсивному капілярному водопоглинанню та слугують легкодоступним живильним субстратом для мікроорганізмів. Збільшення площі контакту на межі розділу фаз за високих ступенів наповнення призводить до швидкої фрагментації матриці. Таким чином, результати підтверджують, що введення ВКГ цілеспрямовано програмує матеріал на прискорену та повну екологічну утилізацію.

Отримані композиції на основі біопластику GEMABIO F з додаванням кавової гущі мають комплекс фізико-механічних та експлантаційних, а головне біорозкладних властивостей, які визначають їх пріоритетне використання у порівнянні з раніше дослідженими композиціям на основі полілактиду [60].

#### 4.4 Висновки до розділу 4

1. Обґрунтовано доцільність використання відпрацьованої кавової гущі (ВКГ) як екологічного наповнювача для біополімерів. Визначено, що для збереження активних центрів сировини необхідна тристадійна сушка. За допомогою ситового аналізу встановлено унімодальний характер гранулометричного складу ВКГ із концентрацією 81,0 % мас. матеріалу на ситі 200 мкм, що забезпечує мінімізацію концентраторів напружень у матриці.

2. Підтверджено сумісність наповнювача та термопластичного біополімеру GEMABIO F. Потенціометричний аналіз виявив відмінності в силі активних центрів (слабко-основна матриця та слабко-кислотна ВКГ), а спектроскопія ATR-FTIR довела збереження функціональних гідроксильних, етерних і карбонільних груп лігноцелюлозної структури кавової гущі, здатних до міжфазної взаємодії.

3. Досліджено вплив високого ступеня наповнення (40–80 мас. %) на

технологічні та механічні показники. Встановлено, що збільшення вмісту ВКГ призводить до закономірного зниження показника плинності розплаву, міцності на розрив, міцності при вигині та еластичності. Водночас густина матеріалу знижується до значень  $< 1 \text{ г/см}^3$ , що робить його перспективним для легких виробів. Оптимальним балансом економічної доцільності та властивостей визначено наповнення 40 мас. % (композиція БПК1).

4. Вивчено сорбційну поведінку композитів в умовах дії розчинів неіоногенних ПАР та гарячого кавового напою. Виявлено стрибкоподібне зростання водопоглинання між 5-м та 10-м циклами санітарної обробки, зумовлене диференційним набуханням компонентів, капілярним транспортом та кислотно-каталізованим гідролізом. Це обґрунтовує 5 робочих циклів як оптимальний термін експлуатації такого екопосуду в рамках концепції "short-life".

5. Експериментально доведено, що лігноцелюлозні частинки ВКГ діють як ефективний каталізатор біологічного розкладання. Збільшення ступеня наповнення суттєво інтенсифікує цей процес: високопоповнені зразки (60 мас. % ВКГ) втрачають понад 97 % початкової маси за 6 місяців, що підтверджує здатність матеріалу до швидкої та повної екологічної утилізації.

Зміст розділу відображено у наступних наукових публікаціях [60], [70], [82].

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ КАВОВОЇ ІНДУСТРІЇ НА ПРИНЦИПАХ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

#### 5.1 Обґрунтування засад циркулярної економіки як чинника сталого розвитку сфери виробництва та споживання кави

Парадигма глобального економічного розвитку на сучасному етапі зазнає фундаментальної трансформації, переходячи від традиційної лінійної моделі до концепції циркулярної економіки (Circular Economy). Згідно з європейськими директивами, циркулярна економіка являє собою регенеративну систему, метою якої є підтримання найвищої цінності та корисності матеріалів протягом усього часу їхнього використання [149]. В умовах загострення глобальної екологічної кризи імплементація цих принципів стає безальтернативним вектором сталого розвитку.

Сучасний етап розвитку кавової індустрії в Україні характеризується вираженим протиріччям між стрімким зростанням культури споживання кави та збереженням лінійних підходів до управління відходами. У межах традиційної моделі органічна речовина вилучається з господарського обігу та акумулюється на муніципальних полігонах. Наслідком цього є комплексний деструктивний вплив на атмосферу, літосферу та гідросферу, механізми якого (емісія метану, утворення фатбергів, пригнічення ґрунтового мікробіому тощо) були детально проаналізовані у першому розділі роботи (рис. 1.4). Замість повернення у природні цикли органіка формує незворотний екологічний борг.

Впровадження принципів циркулярної економіки безпосередньо у продовольчій сфері та індустрії гостинності (HoReCa) є необхідним елементом сталого розвитку країни. Сектор громадського харчування та продовольства в Україні є одним із найпотужніших продуцентів органічних відходів, загальні обсяги яких у 1,5 раза перевищують середньоєвропейські показники [150]. Значна частка цих відходів наразі лише утилізується (зокрема шляхом



захоронення) і не піддається глибокій вторинній переробці, що призводить до системної втрати колосального ресурсного потенціалу. Перехід до замкнутого циклу та цілеспрямоване скорочення харчових відходів на рівні закладів є не лише екологічним імперативом, але й стратегічним кроком для підвищення рентабельності [151]. Відповідно до сучасних наукових підходів, циркулярна модель у сфері HoReCa передбачає комплексну трансформацію, за якої залишки органіки (зокрема відпрацьована кавова гуща) розглядаються не як баласт, а як цінна вторинна сировина для подальшої валоризації.

У сучасній нормативно-правовій площині така практика прямо суперечить державній політиці. Прийнятий рамковий Закон України «Про управління відходами» впроваджує ієрархію, згідно з якою захоронення є найменш прийнятним варіантом [152]. Отже, сфера HoReCa вимагає переходу до нової ресурсоефективної моделі (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Порівняльна характеристика лінійної та циркулярної моделей управління кавовими відходами у сфері HoReCa

Етап	Лінійна модель	Циркулярна модель	Практичний результат
Утворення відходів	Відходи сприймаються як залишок	Відходи розглядаються як вторинна сировина	Зміна підходу до ресурсної цінності
Збір	Потрапляння у змішаний потік відходів	Роздільне збирання безпосередньо у закладі	Підвищення придатності до перероблення
Первинна підготовка	Здебільшого відсутня	Сушіння, зневоднення, короткочасне накопичення	Зменшення ризику псування
Подальше поводження	Видалення або захоронення	Біологічне, матеріальне або технологічне відновлення	Повернення ресурсу в обіг
Екологічний ефект	Викиди, фільтрат, втрата органіки	Зменшення навантаження на полігони	Поліпшення екологічних показників
Економічний ефект	Витрати на вивезення	Формування доданої вартості	Підвищення ресурсоефективності

Аналіз фактичного стану справ свідчить, що ВКГ у більшості кав'ярень України залишається на найнижчому рівні ієрархії. Зміст циркулярної економіки у цьому контексті полягає у збереженні матеріальної цінності лігноцелюлозної основи кави. Заклад HoReCa має розглядатися не як пасивне джерело сміття, а як первинний вузол формування стандартизованої вторинної сировини.

Критично важливою умовою циркулярного використання кавових відходів є обов'язкова стадія їхньої стабілізації. Як було експериментально доведено у розділі 3.1, застосування багатостадійної термічної підготовки (сушіння) дозволяє уповільнити мікробіологічні процеси та забезпечити придатність сировини до введення у полімерні матриці.

Логіка впровадження циркулярної економіки у сфері кав'ярень спирається на базові напрямки валоризації відходів споживання та обсмаження кави, що були систематизовані раніше (рис. 1.5, рис. 1.6). Враховуючи децентралізований характер утворення відходів у сфері HoReCa, пріоритетними для локального малого бізнесу є ті вектори, які базуються на механічних та біологічних методах обробки з низькими капітальними витратами (табл. 1.3). До таких, зокрема, належать біологічне відновлення (компостування), матеріальний апсайклінг (створення косметичних абразивів) та технологічний рециклінг у складі біополімерних композитів.

Водночас для умов України найбільш реалістичним є не ізольований підхід окремої кав'ярні, а формування кластерної (мережевої) моделі. Кав'ярні мають виконувати функцію первинного сортування та збору, тоді як глибока валоризація здійснюватиметься у співпраці з локальними переробними підприємствами.

Отже, впровадження принципів циркулярної економіки дозволяє перемістити відходи кавової індустрії з нижчого щабля ієрархії до вищих рівнів, перетворюючи сферу HoReCa на практичний майданчик для реалізації державної екологічної політики.

## 5.2 Соціально-комунікативна роль кав'ярень у системі екологічного просвітництва та поширення циркулярних товарів

Сучасна кав'ярня в урбаністичному просторі України давно трансформувалася з простої точки продажу напоїв у складну соціальну екосистему, що виконує роль важливого комунікаційного вузла. У контексті переходу до моделі сталого розвитку, заклади кавової індустрії мають значний потенціал для становлення як суб'єктів соціально-відповідального бізнесу. Така роль передбачає не лише внутрішню оптимізацію ресурсних потоків, а й активну зовнішню діяльність, спрямовану на формування екологічної свідомості споживачів та розвиток локальних циркулярних мереж.

Одним із ключових аспектів соціальної місії кав'ярень є їхнє перетворення на локальні пункти збору відпрацьованої кавової гущі (ВКГ). Враховуючи децентралізований характер утворення цих відходів, про який йшлося у попередніх розділах, саме кав'ярні можуть виступати первинними ланками логістичного ланцюга. Заклад стає платформою для взаємодії між споживачем, який готує каву вдома, та професійними переробниками. Створення зручних умов для повернення використаної сировини безпосередньо в заклади стимулює культуру роздільного збору відходів серед населення та дозволяє акумулювати якісну, мікробіологічно стабільну сировину (за умови впровадження рекомендованих термічних протоколів підготовки) для подальшої валоризації.

Окрім функції збору, кав'ярні постають ефективними каналами дистрибуції товарів на основі переробленої кави [153]. Це створює унікальний замкнений цикл «виробництво → споживання → рециклінг → реалізація», який відбувається в межах однієї локації або мережі. Продаж екологічного мила, до складу якого входить кавова гуща та його безпосереднє використання, використання біополімерного багаторазового посуду в кав'ярнях дозволяє споживачу наочно побачити результат циркулярної трансформації. Завдяки такому підходу абстрактні екологічні проблеми набувають практичного виміру

– споживач бачить цінність відходів, а для утворювачів відходів з’являється економічний стимул. Соціальний ефект у цьому випадку полягає у зміні споживчої поведінки: клієнт купує не просто товар, а стає частиною екологічного рішення.

Важливим напрямком діяльності сучасного кавового бізнесу є виконання ролі хабів екологічного просвітництва. Завдяки високій частоті відвідувань та тривалому контакту з аудиторією, кав’ярні є ідеальними майданчиками для неформальної екологічної освіти. Це може реалізовуватися через візуальну комунікацію (інфографіки на пакуванні, QR-коди з інформацією про життєвий цикл зерна), проведення тематичних воркшопів та лекцій, або навіть через щоденне спілкування бариста з клієнтами. Інформування про негативний вплив *Aspergillus niger* на вологу гущу або про переваги використання кавонаповнених миючих засобів сприяють розумінню біогенних процесів пересічними громадянами.

Водночас екологічна відповідальність є лише однією зі складових сталого розвитку. Соціальна місія сучасних кав’ярень в Україні все частіше охоплює підтримку інклюзії, допомогу Збройним Силам України та створення ветеранських бізнес-проектів. В умовах постійних ризиків воєнного стану соціальне підприємництво виступає не лише формою ведення бізнесу, але й дієвим інструментом психологічної підтримки, соціальної інтеграції вразливих груп населення та каталізатором післявоєнної відбудови економіки [154]. У різних містах кав’ярні перестають бути просто комерційними об’єктами, перетворюючись на повноцінні просвітницькі та соціальні центри. Найбільш розвиненими в цьому напрямку залишаються великі міста (Київ, Львів, Харків), проте тенденція до впровадження ініціатив сталого розвитку активно поширюється всією країною (табл. 5.2).

Таким чином, інтеграція соціальної та екологічної відповідальності у бізнес-модель кав’ярень дозволяє вирішити відразу кілька фундаментальних завдань: знизити логістичне навантаження на муніципальні системи управління відходами, підвищити лояльність клієнтів через заохочення

Таблиця 5.2 – Перелік кав'ярень, які мають екологічну та соціальну складову у своїй діяльності

Заклад	Місто	Напрямок соціальної відповідальності	Суть реалізованого проєкту
Екостартап «Rekava» (співпраця з кав'ярнями)	Суми / Львів	Циркулярна економіка; інноваційний рециклінг	Стартап збирає відпрацьовану кавову гущу з локальних кав'ярень і переробляє її на 100% біорозкладні стаканчики для кави, ємності для свічок та горщики для рослин.
Ініціатива «Zero Cup» (Zero Waste Lviv)	Львів	Екологічна відповідальність; мінімізація пластику	Кав'ярні надають знижки клієнтам, які приходять із власним багаторазовим посудом.
Кав'ярня на станції «Україна без сміття»	Київ	Екологічне просвітництво; Zero Waste	Кав'ярня працює на території станції глибокого сортування відходів. Прибуток від продажу кави допомагає покривати поточні операційні витрати на утримання громадського еко-простору.
Мережа АЗК «WOG» (проєкт «Дорога добра»)	Вся Україна	Благодійність; соціальна згуртованість	Клієнти купують каву у спеціальному горнятку (з додатковою націнкою), а всі зібрані кошти спрямовуються на закупівлю медичного обладнання для лікарень та підтримку постраждалих.
«Як сніг на голову»	Харків	Інклюзія; соціальне підприємництво	Інклюзивне кафе, яке фокусується на працевлаштуванні та соціальній адаптації людей з інвалідністю, зокрема молоді із синдромом Дауна.
«Тихе місце» та «TYTANOVI»	Київ	Ветеранське підприємництво; психологічна реабілітація	Кав'ярні, створені ветеранами війни. Заклади забезпечують робочі місця для ветеранів з важкими травмами, сприяючи їхній реінтеграції у цивільне життя.
Соціальна кав'ярня в «UNBROKEN»	Львів	Професійна адаптація; реабілітація	Проєкт створений на базі реабілітаційного центру, щоб пацієнти, які проходять тривале лікування та протезування, могли опанувати нову професію (бариста/пекар) і реінтегруватися в соціум.
«Кава Медіа»	Харків	Екологія ; благодійність (збір вторсировини)	Кав'ярня організувала пункт збору макулатури (російськомовних книжок). Клієнти отримували знижку на каву за принесену сировину, а кошти від її переробки спрямовувалися на потреби ЗСУ.
«Паломник»	Харків	Місце пам'яті; збір вторсировини; збір коштів	Кав'ярня заснована на честь загиблого воїна з позивним «Паломник» та є фактично сучасним місцем пам'яті полеглих. Регулярно проводять збори для потреб ЗСУ та реабілітацію. Встановлено контейнер для збору кришечок від пляшок.

етичного споживання та підготувати ринок до впровадження новітніх циркулярних товарів. Кав'ярня перестає бути кінцевою точкою споживання ресурсів і стає активним драйвером регенерації міського середовища, де комерційні цілі невіддільні від екологічної місії. Це створює міцне інституційне підґрунтя для довгострокової трансформації культури поводження з відходами в Україні

### 5.3 Комплексна характеристика супутніх відходів виробництва та споживання кави та перспективи їх рециклінгу

Реалізація сталих практик для кавової індустрії неможливе без вирішення проблеми супутніх пакувальних матеріалів, які генеруються паралельно з органічними залишками на всіх етапах життєвого циклу продукту – від транспортування зеленого зерна до кінцевого споживання напою. Враховуючі основні елементи сталих практик в сфері HoReCa, відходи пакування кави доцільно розглядати як невід'ємний елемент розробленої циркулярної моделі управління.

За функціональними ознаками супутню тару та упаковку можна розподілити на три основні категорії:

- 1) мішки для транспортування кави,
- 2) капсули для кавоварок
- 3) дріп-пакети.

Кожна з цих категорій володіє певним потенціалом для вторинного використання. Проте виражена матеріальна неоднорідність цих потоків зумовлює неможливість застосування до них єдиної універсальної схеми утилізації. Саме тому виникла об'єктивна необхідність у розробці комплексної класифікації, яка базується не лише на номенклатурі виробів, але й враховує місце їх утворення, компонентний склад та технологічну придатність до рециклінгу (табл. 5.3).

Ключовим критерієм наведеної класифікації є локалізація джерел

Таблиця 5.3 – Класифікація супутніх пакувальних відходів кавової  
індустрії

Тип відходу	Основне місце утворення	Матеріальний склад	Реальний потенціал повторного використання	Пріоритетний напрям поводження
Мішки для транспортування та зберігання зеленої кави	Обсмажувальні виробництва, склади зеленої кави	Джутова мішкочина; інколи полімерні або комбіновані внутрішні вставки	Високий	Очищення, парова обробка, повторне використання, апсайклінг, технічне застосування
Дріп-пакети	Заклади HoReCa, офіси, готелі, домашні умови, подорожі	Кавова гуща, целюлозний або нетканий фільтр, металізована зовнішня упаковка	Обмежений і лише після розділення компонентів	ВКГ – на сушіння; фільтр – до компосту у контрольованій кількості; металізована упаковка – захоронення
Капсули для капсульних кавоварок	Домашні умови, офіси, малі точки самообслуговування, непрофесійні кавові зони	Алюміній, полімери, багатошарові бар'єрні матеріали, картонне пакування	Середній для алюмінієвих капсул; низький для багатокомпонентних	Вилучення ВКГ, рециклінг алюмінію та картону за наявності сортування; захоронення багатокомпонентних залишків

утворення відходів, оскільки саме цей фактор визначає логістичну доцільність збору (табл.5.3).

Матеріали, що формуються на виробничому або логістичному етапі, характеризуються високим ступенем централізації, завдяки чому їх значно легше контролювати, накопичувати та передавати на переробку. До цієї групи належать джутові мішки для зберігання зеленої кави, які масово акумулюються на підприємствах з обсмаження кави [155].

Натомість дріп-пакети та кавові капсули відзначаються вираженим децентралізованим характером утворення: вони генеруються дрібними порціями у закладах HoReCa, офісних центрах, готелях та домогосподарствах

(табл.5.3). Така розосередженість джерел утворення критично ускладнює процеси селективного збору. На практиці, за відсутності розгалуженої інфраструктури роздільного сортування, ці складні багатокомпонентні відходи швидко потрапляють до загального потоку змішаних побутових відходів, втрачаючи свій ресурсний потенціал.

Проблема повторного використання т.з. «кавової мішковини», яка масово імпортується разом із зеленими зернами, фактично не відображена у чинному законодавстві й зрідка стає предметом громадських чи бізнес-ініціатив. Джутова мішківина має виражений екологічний потенціал, оскільки джут є природним рослинним волокном, а сам матеріал характеризується достатньою міцністю, повітропроникністю, зносостійкістю і здатністю зберігати функціональні властивості після первинного використання [156]. В залежності від країни – постачальника кави відрізняються властивості мішків (табл.5.4, рис. 5.1). Отримані експериментальні дані відображають варіативність якісних характеристик кавової мішковини залежно від країни походження та технології виготовлення.

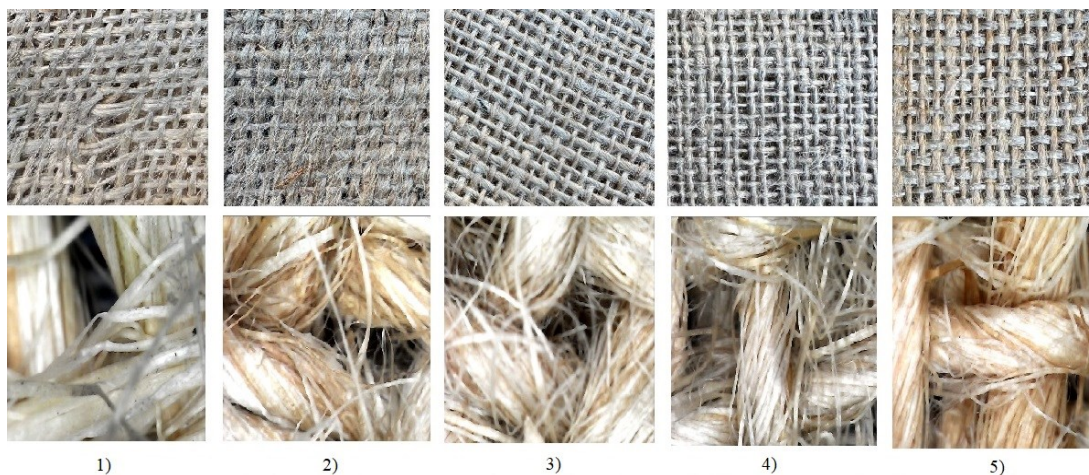
Таблиця 5.4 – Характеристика мішків для транспортування кави

Характеристика	Країна походження кави та мішка для транспортування				
	Бразилія	В'єтнам	Колумбія	Ефіопія	Індія
Тип переплетення	полотняне				
Сировинний склад	100 % джут				
Поверхнева щільність, г/м <sup>2</sup>	250	400	360	290	390
Число ниток на 10 см (основа/уток)	10/8	20/18	15/12	12/10	18/16
Ширина, см	63				
Товщина, мм <sup>1</sup>	2	4	3	2	3
Розривне навантаження, кгс (основа/уток) <sup>2</sup>	160/130	220/180	200/160	170/140	210/170

Примітки: 1, 2 – визначали згідно методик, описаних у п.2.7

Мікроскопія волокон дослідних зразків мішковини (рис.5.1) при збільшенні  $\times 200$  та  $\times 600$ , дозволила візуалізувати структуру переплетення, цілісність волокон та поверхневі дефекти. Усі зразки характеризуються чітким полотняним переплетенням





1) Бразилія; 2) В'єтнам; 3) Колумбія; 4) Ефіопія; 5) Індія

Рисунок 5.1 – Мікроскопічна структура переплетення та поверхні джутових волокон дослідних зразків кавової мішковини з різних країн імпортерів

і щільною структурою волокон, що свідчить про високий технологічний рівень виготовлення матеріалу. Ознак заплістості, ураження пліснявими грибами чи структурних руйнувань не виявлено. Таким чином, встановлено, що джутові волокна зберігають стабільність морфологічної структури та гігієнічні властивості навіть після тривалого транспортування кавових зерен, що створює передумови для їх вторинного використання.

Одним з чинників, що обмежує використання мішків для транспортування кави за прямим призначенням, тобто для зберігання та транспортування іншої харчової та не харчової продукції, є залишковий стійкий запах кави та мікрозабруднення джуту кавовим пилом та кавовою олією. Для оцінки функціональної придатності мішковини до повторного використання було проведено експериментальні дослідження стійкості джутових волокон до механічної деформації та впливу різних методів попередньої обробки, спрямованих на усунення залишкових запахів кави.

Для встановлення якісного видалення залишкових запахів кави, очистки волокон від забруднень та встановлення механічної міцності, зразки було поділено на дві групи:

- 1) обробка паром – вплив насиченої пари за температури  $+95^{\circ}\text{C}$

протягом 30 хвилин після попереднього зволоження (контакт із водою протягом 48 годин).

2) прання з побутовими миючими засобами – занурення у водний розчин прального порошку з подальшим промиванням і сушінням за температури атмосферного повітря +25 °С у природних умовах.

Порівняльний аналіз показав, що обробка паром забезпечує найкраще співвідношення між ефективністю очищення, збереженням механічних характеристик волокон і екологічною безпечністю (рис.5.2). Цей метод дозволяє усунути залишкові запахи кави та поверхневі забруднення без використання хімічних реагентів. Додатковою перевагою є дезінфікуючий ефект насиченої пари, що підвищує гігієнічну якість матеріалу.

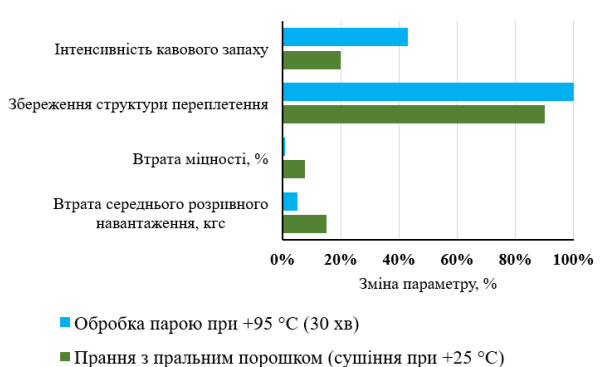


Рисунок 5.2 – Порівняльний аналіз впливу методів попередньої обробки на властивості джутових волокон

Натомість прання з миючими засобами, хоча й демонструє задовільну ефективність у видаленні запаху, характеризується низкою недоліків:

1) метод має низьку екологічну ефективність, оскільки супроводжується значним споживанням водних ресурсів і потраплянням поверхнево-активних речовин у суміші з забрудненнями органічного походження у стічні води, що ускладнює їх очищення;

2) повторне висушування у природних умовах потребує тривалого часу, а надмірне зволоження викликає часткове розпушення структури волокон, що знижує міцність тканини на 10–15 %.

Статистичні дані свідчать про суттєві відмінності між рівнем повторного використання мішків в Україні та країнах ЄС. Якщо у європейських державах повторно залучається від 15 до 20 % відходів, то в Україні цей показник не перевищує 3–5 % (рис. 5.3.) [156].

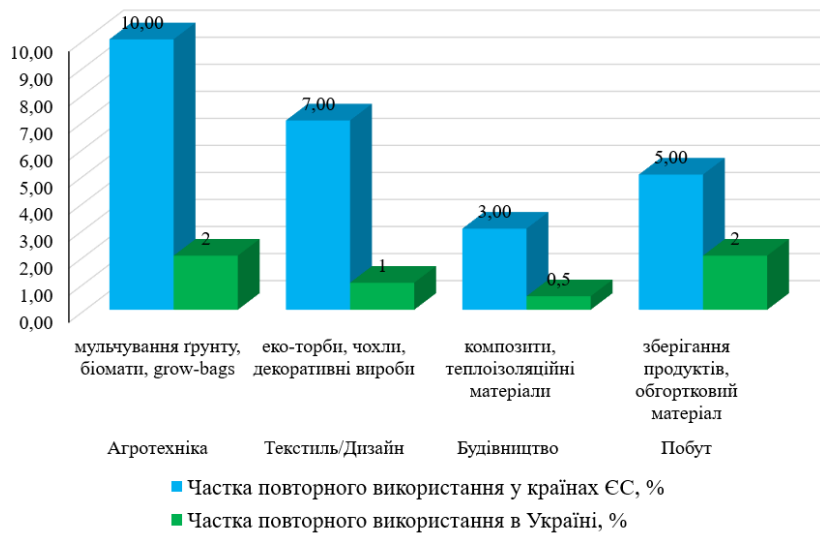


Рисунок 5.3 – Сфери та масштаби вторинного використання кавової мішківини у міжнародній та локальній практиці

За даними сучасних наукових досліджень, у країнах ЄС та світі одним із найбільш розповсюджених напрямів вторинного використання джутової мішківини є її застосування в агротехнічному секторі як екологічно безпечних біоматів (природного геотекстилю) для мульчування, збереження ґрунтової вологи та створення протиерозійних покриттів [157]. Водночас у текстильному та меблевому секторах цей натуральний матеріал (а також регенероване з нього волокно) активно застосовується для виготовлення зносостійких еко-сумок, декоративних елементів та меблевих оббивних матеріалів, що повною мірою відповідає принципам циркулярної економіки та безвідходного виробництва [158].

Єдиним напрямком використання мішків для транспортування кави, який на сьогодні в Україні демонструє найбільше зростання та поширення, є виготовлення маскувального одягу для військових потреб (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Переваги та недоліки різних типів вторинного використання мішків для транспортування кави

Напрямок використання	Переваги	Недоліки	Ступінь поширеності
Агробізнес-мульчування, утеплення	1) відсутність необхідності утилізації після вторинного використання; 2) відсутність необхідності попереднього очищення від залишків кави та запаху	1) необхідність транспортування від місця утворення до місця використання; 2) малі геометричні розміри мішків, що ускладнює використання на значних площах	низький
Будівельний - утеплювачі	безкоштовна сировина ecofriendly	1) необхідність виконання додаткових, складних технологічних операцій для отримання матеріалу; 2) необхідність транспортування сировини у місце переробки та готових виробів у місце використання	дуже низький
Зберігання товарів	1) міцна тара; 2) можливість відмовитись від споживання нових виробів; 3) при пошкодженні тари не утворюється мікропластик	1) необхідність попереднього очищення від залишків кави та запаху кави; 2) відсутність асортименту розмірів	низький
Декорування та пошив нових виробів	1) можливість відмовитись від споживання нових виробів; 2) унікальність об'єктів 3) може бути соціальним бізнесом та бізнесом для ветеранів	1) необхідність попереднього очищення від залишків кави та запаху кави в разі пошиття нових виробів; 2) відсутність стабільного попиту на вироби чи декор;	середній
Маскувальний	1) безкоштовна сировина; 2) відсутність необхідності попереднього очищення від залишків кави та запаху; 3) ідеальні природні кольори, що збільшують рівень маскуванню; 4) готові вироби мають низьку вагу та високі міцностні характеристики	1) необхідність операції розділення на нитки, що збільшує витрати часу та людських ресурсів; 2) неможливість масштабувати у ті регіони, де відсутні великі мережеві кав'ярні або підприємства з обсмаження кави	високий, але не у всіх регіонах

Це зумовлено, перш за все повномасштабним вторгненням, адже саме після 24.02.2022 потреба в т.з. «кікіморах», нашоломниках та інших елементах

маскувального одягу зростає, що спонукало волонтерські спільноти шукати стабільні за обсягами та властивостями джерела сировини. Поширення використання мішків для транспортування кави для виготовлення маскувального одягу почалось з західних регіонів, зокрема м. Львів, де культура споживання кави одна з найдавніших на території сучасної України та де не було активних військових дій (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Динаміка використання джутових мішків з-під кави для виготовлення маскувальних засобів

Регіон	Кількість волонтерських центрів, шт, які використовують джутові мішки з-під кави для виготовлення маскувальних засобів по роках			
	2022	2023	2024	2025
м. Львів <sup>1</sup>	4	8	10	10
м. Київ	1	3	7	7
Київська область <sup>2</sup>	0	2	3	2
м. Харків	0	1	4	5
Харківська область	0	0	1	1
м. Дніпро	1	1	3	5
Дніпропетровська область	0	1	0	2

Примітка: 1 – дані отримані шляхом опитування та аналізу відкритих джерел інформації; 2 – тут й далі для областей кількість вказана без урахування даних для адміністративних центрів

Наведена динаміка (табл.5.6) свідчить про стійке та системне розширення масштабів вторинного використання відпрацьованої джутової тари для потреб оборонного сектору протягом 2022–2025 років. Найвища активність із залучення цього ресурсу до виготовлення маскувальних засобів фіксується у великих урбанізованих центрах (Львів, Київ, Дніпро, Харків), що просторово корелює з розташуванням потужних виробництв з обсмаження кави та логістичних хабів зеленої кави. Саме у Львові перші волонтерські спільноти вже влітку 2022 року почали співпрацювати з кав'ярнями та отримувати від них мішки (рис.5.4).



а

б

в

а – готовий виріб та мішки для транспортування кави; б – елементи маскувального одягу; в – «кікімора» з використанням джутових волокон у польових умовах

Рисунок 5.4 – Маскувальні засоби з використанням джутових волокон, отриманих з мішків для транспортування кави (Волонтерський центр ГО "Ideya.center", м. Львів)

Далі масштабування такого досвіду йшло на схід, по мірі того як ситуація на арені військових дій стабілізувалась, окремі регіони повертались до більш спокійного життя, відновлювався сектор HoReCa та з'являлась можливість отримувати мішки. Практика такого локального «мілітарного апсайклінгу» є унікальним прикладом адаптації принципів циркулярної економіки до умов воєнного стану, що дозволяє одночасно задовольняти гострі соціально-оборонні потреби громад та ефективно мінімізувати обсяги захоронення на полігоні пакувальних відходів кавової індустрії.

Специфічним та складнопрогнозованим потоком відходів кавової індустрії є дріп-пакети, стрімке поширення яких зумовлене глобальним ринковим трендом на порційне споживання кави. Особливістю даного виду відходів є їхня глибока просторова дисипація: на відміну від логістичної тари (мішків), що акумулюється на виробництвах, дріп-пакети утворюються переважно в домогосподарствах, офісних центрах, готелях та під час подорожей. Така висока децентралізація джерел утворення значно ускладнює



процеси логістичного контролю та унеможливилося рентабельну організацію їх селективного збору.

З морфологічної точки зору дріп-пакет являє собою складну багатокомпонентну систему, яка поєднує щонайменше три різні фракції: відпрацьовану кавову гущу, внутрішній фільтрувальний елемент та зовнішню індивідуальну упаковку (рис. 5.5). Внутрішня фільтрувальна мембрана виготовляється переважно з перфорованого целюлозного матеріалу або нетканих полімерних волокон, які після екстракції напою утримують у собі ВКГ з високим рівнем залишкової вологості.



а



б



в



г



д

а – зовнішнє картонне пакування кави у дріп-пакетах; б, в, г – дріп-пакет у багатокомпонентному полімерному пакуванні; д – дріп-пакет з кавою  
Рисунок 5.5 – Складові елементи пакування дріп-пакета з кавою

Найбільш раціональним напрямком рециклінгу внутрішньої частини відпрацьованого дріп-пакета (фільтр разом із вологою гущею, за умови його целюлозного походження) є біологічне відновлення шляхом аеробного компостування [43]. Однак, як було експериментально доведено результатами досліджень, наведеними у розділі 3 даної роботи, частка таких відходів у загальній компостній масі строго лімітована і не повинна перевищувати 10 мас. % (мас.) [31]. Перевищення цього порогу неминуче призводить до зміщення кислотно-лужного балансу (рН) у кислий бік, що інгібує діяльність мікробіому та зменшує агрохімічну цінність кінцевого органічного добрива. Популярна технологія прямого внесення ВКГ у ґрунти поблизу кав'ярень без оцінки рН рівня ґрунтів та кількості внесеної ВКГ в умовах урбанізованих ґрунтів також призводить до закиснення ґрунтів [124].

Водночас найбільш екологічно проблемним елементом цієї системи є зовнішнє захисне пакування. Для збереження ароматичних властивостей кави воно виготовляється з багатошарових комбінованих матеріалів, які поєднують полімерні плівки (ПЕТ, ПЕ), бар'єрний металізований шар (алюмінієву фольгу) та адгезивні компоненти. Згідно з сучасними дослідженнями, через відсутність рентабельних промислових технологій розділення шарів, такі композитні плівки фактично не підлягають матеріальному рециклінгу [159]. Відповідно, у межах реальної муніципальної схеми поводження з відходами, зовнішня упаковка дріп-пакетів безальтернативно класифікується як залишкова фракція, що спрямовується на полігонне захоронення або високотемпературне спалювання.

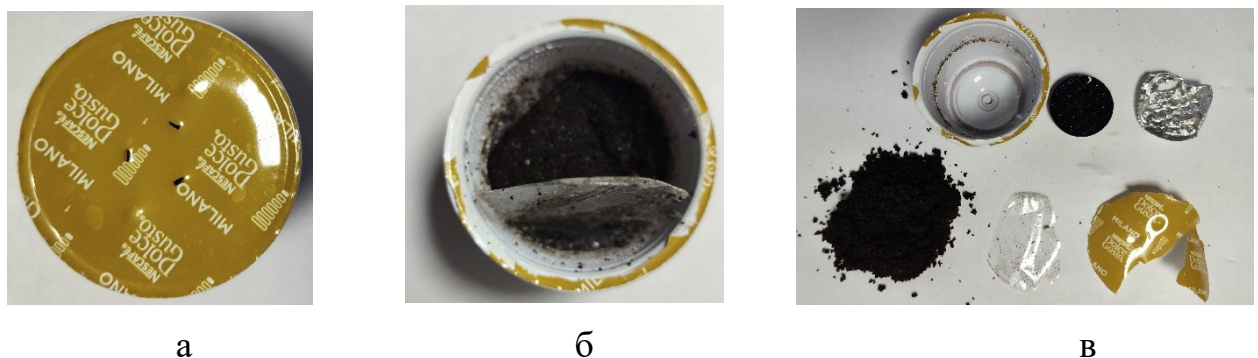
Третім, технологічно найскладнішим сегментом супутніх пакувальних відходів кавової індустрії є капсули для порційних кавоварок. За специфікою просторової генерації цей тип відходів кардинально відрізняється від логістичної тари (мішків) та дріп-пакетів. Основними осередками їх утворення є адміністративно-офісні приміщення, сегмент малого HoReCa, зони самообслуговування та домогосподарства, де відсутнє професійне кавоварочне обладнання. Така екстремальна децентралізація джерел утворення робить



централізований муніципальний збір цих відходів економічно нерентабельним, внаслідок чого переважна більшість капсул потрапляє до загального потоку твердих побутових відходів (ТПВ) із подальшим захороненням на полігонах.

Аналіз сучасного ринку дозволяє виділити дві домінуючі конструктивні системи кавових капсул, які принципово відрізняються за морфологічним складом та потенціалом до рециклінгу: аналоги систем Nespresso та Dolce Gusto. Капсули першого типу зазвичай виготовляються з мономатеріалу – харчової алюмінієвої фольги. З точки зору циркулярної економіки це є безперечною перевагою, оскільки після очищення від органічного залишку (ВКГ) алюміній підлягає багаторазовому матеріальному рециклінгу. Збір таких капсул найчастіше реалізується через фірмові пункти продажу в межах програм розширеної відповідальності виробника

Натомість капсули типу Dolce Gusto являють собою складну багатокомпонентну (композитну) систему, що суттєво ускладнює їхню подальшу утилізацію (рис.5.6)



а – зовнішній вигляд капсули Dolce Gusto; б – початковий етап морфологічного розбору; в – внутрішні структурні компоненти

Рисунок 5.6 – Морфологічна структура та деконструкція кавової капсули закритого типу (на прикладі системи Dolce Gusto)

Детальний морфологічний розбір засвідчив, що чотири з п'яти базових елементів такої капсули виготовлені з різних за фізико-хімічною природою

полімерних матеріалів, і лише один елемент (перфорована мембрана) — з алюмінію (рис. 5.6, в). Пряме маркування на окремих компонентах відсутнє через їхні малі габарити та специфіку поетапного термоформування. Хоча на зовнішньому картонному пакуванні виробником задекларовано використання поліпропілену (PP), структурний аналіз вказує на наявність додаткових ізоляційних шарів. Зокрема, для забезпечення абсолютного бар'єрного захисту кави від окислення киснем повітря використовується шар сополімеру етилену та вінілового спирту (EVOH). Наявність такого адгезивно пов'язаного шару унеможливорює пряму переробку корпусу капсули на стандартних лініях рециклінгу поліпропілену без суттєвої втрати фізико-механічних властивостей вторинної гранули.

Незважаючи на загальну складність переробки системи в цілому, найбільш перспективним для селективного вторинного використання компонентом є внутрішній полімерний розподільчий диск (візуально ідентифікується як темно-коричнева рельєфна вставка). Цей елемент має габаритні розміри до 35 мм у діаметрі та близько 1 мм у висоту. Його конструктивною перевагою є низька адгезія до вологої кавової гущі: диск легко піддається механічному відокремленню від інших компонентів капсули, майже не забруднюється органічним залишком та є компактним для накопичення. Відповідно, за умови організації локального ручного або напівавтоматизованого розбору (наприклад, на базі еко-хабів чи соціальних кав'ярень), саме цей структурний елемент може бути найефективніше вилучений та направлений на матеріальний рециклінг як високоякісна полімерна сировина.

Значний об'єм супутніх відходів у порційному сегменті кавової індустрії формує зовнішнє картонне пакування. На відміну від морфологічно складних полімерних капсул чи металізованого зовнішнього пакування, целюлозно-паперова фракція є найбільш доступним матеріалом для прямої інтеграції у цикли матеріального рециклінгу. Висока гігроскопічність картону зумовлює його стрімку деградацію у разі потрапляння до потоку змішаних

муніципальних відходів. Контакт із вологою кавовою гущою чи іншими харчовими рештками призводить до мікробіологічного забруднення та незворотної втрати фізико-механічних властивостей паперового волокна, що фактично виводить його з ресурсного обігу. За умови дотримання умов сортування – збереження сухості та відсутності забруднень органічними залишками – таке пакування виступає якісною вторинною сировиною, що підлягає переробці на паперових фабриках.

Систематизацію логістично-технологічних параметрів та оцінку потенціалу рециклінгу всіх досліджених типів супутніх пакувальних відходів кавової індустрії наведено у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Порівняльна оцінка логістично-технологічного потенціалу рециклінгу супутніх відходів кавової індустрії

Тип відходу	Простота логістичного збору	Складність морфологічної сепарації	Потенціал ресурсного відновлення	Головні лімітуючі фактори
Мішки з-під зеленої кави	Висока	Низька або середня	Високий	Зношення, біологічне забруднення, наявність полімерних вставок
Дріп-пакети	Низька або середня	Висока	Обмежений	Багатошарова металізована упаковка, екстремальна децентралізація утворення
Алюмінієві капсули	Середня	Середня	Середній або високий за наявності монозбору	Необхідність вилучення вологої гущі, промивання оболонки
Багатокомпонентні капсули	Низька	Висока	Низький	Наявність бар'єрних шарів (EVOH), складність розділення
Картонне пакування	Висока	Низька	Високий	Гігроскопічність, потреба суворого дотримання умов сухого збору та зберігання

## 5.4 SWOT аналіз розробленої комплексної системи управління відходами виробництва та споживання кави

На основі результатів виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та обґрунтовано комплексну систему управління ресурсними потоками кавової індустрії, функціонування якої ґрунтується на засадах регенерації та мінімізації обсягів полігонного захоронення (рис. 5.7). Запропонована система охоплює повний життєвий цикл – від імпорту та обсмажування зеленого кавового зерна до децентралізованого споживання готового напою та утилізації супутнього пакування.

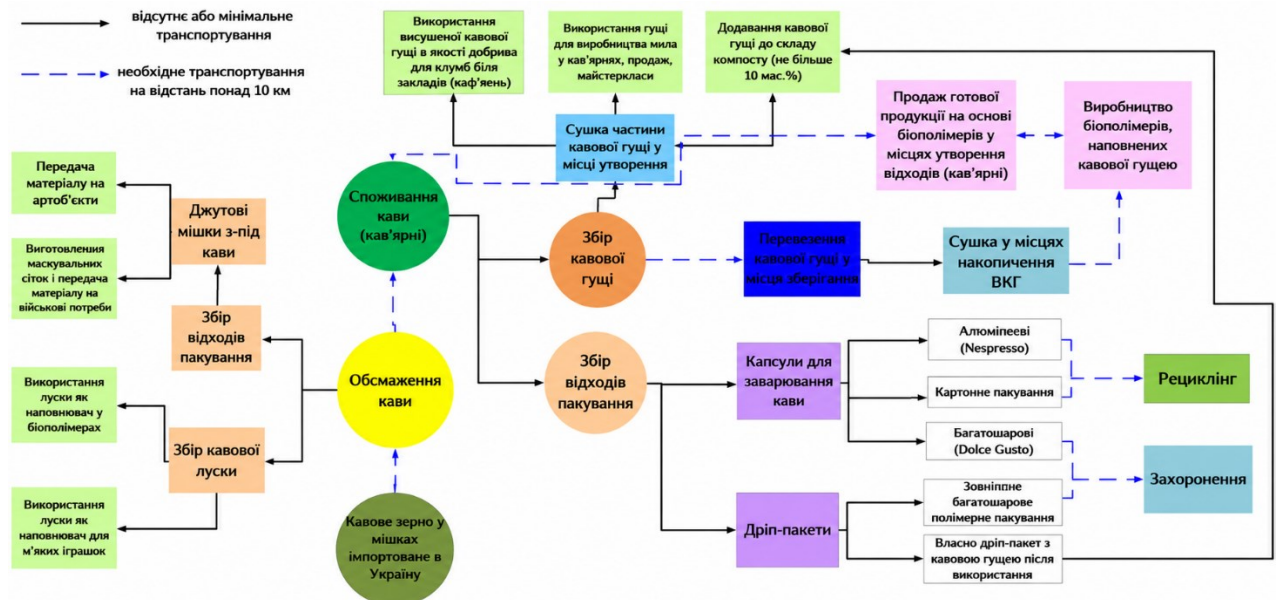


Рисунок 5.7 – Структурно-логічна схема функціонування комплексної системи управління відходами кавової індустрії

Особливістю розробленої системи є її багаторівневність та диференційований підхід до різних типів відходів. Відповідно до наведеної схеми, управління ресурсними потоками реалізується на трьох взаємопов'язаних рівнях:

Перший рівень – етап виробництва (обсмажування). Тут реалізується принцип промислового симбіозу, за якого відходи вилучаються як чисті

вторинні ресурси у місцях їх масової генерації. Кавова луска спрямовується для використання як дисперсний наповнювач у біорозкладних полімерних композитах, а в окремих випадках – як екологічний наповнювач для сенсорних дитячих іграшок. Відпрацьована джутова тара (мішки) передається для соціально-орієнтованого «мілітарного апсайклінгу» (виготовлення маскувальних засобів) або застосовується як арт-об'єкти для екологічного оформлення інтер'єрів кав'ярень, замикаючи таким чином життєвий цикл матеріалу всередині самої індустрії.

Другий рівень – етап децентралізованого споживання. На цій стадії ключовим вектором є логістичний збір, сушіння та локальна переробка відпрацьованої кавової гущі. Згідно зі схемою, висушена двома способами ВКГ розподіляється за трьома пріоритетними напрямками подальшого використання: як компонент для виробництва полімерних композитів, як лімітована добавка до агрокомпосту (не більше 10 % мас.) та як сировина для виготовлення крафтових косметичних засобів.

Третій рівень – поводження із супутнім пакуванням. Система чітко розмежовує потоки залежно від їхнього морфологічного складу. Картонна тара та мономатеріальні (алюмінієві) капсули за умови дотримання вимог окремого збору та зберігання спрямовуються на відповідні лінії матеріального рециклінгу. Натомість багатошарове зовнішнє пакування дріп-пакетів та композитні капсули, що не підлягають розшаруванню, класифікуються як залишкова фракція.

Наукову та безперечну практичну цінність запропонованої системи підсилює розроблена в межах дослідження технологія виготовлення крафтового мила з додаванням ВКГ. Створення авторського продукту з унікальним візуальним брендуванням (логотипом) дозволяє успішно трансформувати ВКГ з категорії «органічного відходу» у категорію цінного косметичного компонента (рис.5.8). У даному випадку розроблений продукт за своїми експлуатаційними властивостями успішно конкурує з масовими комерційними аналогами. Більше того, впровадження практики проведення

тематичних майстер-класів з миловаріння на базі кав'ярень-хабів виступає потужним інструментом екологічного просвітництва. Це дозволяє споживачу безпосередньо та інтерактивно долучитися до процесу локального рециклінгу, що радикально підвищує рівень екосвідомості суспільства та формує лояльність клієнтів до циркулярних ініціатив соціально відповідального бізнесу.



а, б – виготовлене мило з ВКГ; в – розроблений логотип для продукції

Рисунок 5.8 – Приклад виготовленого мила з наповнювачем ВКГ та розроблений логотип виробу

Для комплексної оцінки життєздатності та стратегічних перспектив впровадження даної розробки було проведено SWOT-аналіз (табл. 5.8).

Аналіз слабких сторін вказує на критичну вразливість системи до людського фактору, зокрема на залежність від якості первинного сортування безпосередньо в місцях утворення відходів. Крім того, повноцінне функціонування системи вимагає залучення додаткових ресурсів у логістику та енергоємні процеси стабілізації (сушіння) кавової гущі на станціях накопичення, а також об'єктивно ускладнюється технологічними обмеженнями щодо автоматизованого рециклінгу складних багатошарових пакувальних матеріалів (дріп-пакетів, капсул).

Таблиця 5.8 – SWOT-аналіз моделі утилізації відходів виробництва та споживання та кави

<p style="text-align: center;"><b>Сильні сторони</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Можливість створення продуктів з доданою вартістю з використанням відходів виробництва та споживання кави</li> <li>– Відповідність принципам циркулярної економіки та ієрархії управління відходами</li> <li>– Зменшення обсягів відходів, що направляються на захоронення</li> <li>– Низька собівартість вхідної сировини для локальної переробки.</li> <li>– Високий соціальний ефект через залучення волонтерських та просвітницьких ініціатив.</li> <li>– Можливість інтеграції моделі у діяльність кав'ярень, закладів HoReCa, соціальних підприємств та локальних екологічних ініціатив.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Слабкі сторони</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Критична залежність від первинного сортування в місцях утворення відходів</li> <li>– Необхідність додаткових витрат на сушіння (на станціях накопичення), зберігання, транспортування та сортування відходів</li> <li>– Обмежена придатність складних пакувальних матеріалів (дріпів, капсул) до автоматизованого рециклінгу</li> <li>– Необхідність підвищення рівня екосвідомості на локальному рівні для ефективного впровадження</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Можливості</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Розвиток локальних систем циркулярної економіки у сфері кавового бізнесу та HoReCa</li> <li>– Створення нових напрямків зеленого бізнесу та додаткових робочих місць</li> <li>– Використання системи як базису для екологічного брендингу та підвищення корпоративної соціальної відповідальності (КСВ) бізнесу.</li> <li>– Розширення мережі еко-майстерень у кав'ярнях для популяризації Zero Waste культури</li> <li>– Запровадження інноваційних методів еко-арт-терапії та психологічної рекреації з використанням вторинної кавової сировини (кавовий живопис, створення фактурних виробів на основі мильних композицій)</li> <li>– Можливість отримання грантової підтримки в межах програм сталого розвитку ЄС</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Загрози</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Низький рівень культури сортування відходів серед споживачів і частини бізнесу.</li> <li>– Нестабільність логістичних ланцюгів в умовах воєнного стану.</li> <li>– Ризик мікробіологічного псування сировини при несвоєчасній первинній обробці.</li> <li>– Низький рівень платоспроможного попиту на товари вторинної переробки в окремих регіонах.</li> </ul>

Незважаючи на зазначені обмеження, розроблена модель генерує потужний спектр можливостей, відкриваючи шляхи для створення нових напрямів «зеленого» підприємництва та генерації додаткових робочих місць. Важливою стратегічною можливістю є вплив системи на рівень корпоративної

соціальної відповідальності (КСВ) бізнесу. Інтеграція волонтерських ініціатив із забезпечення оборонних потреб та проведення відкритих еко-просвітницьких заходів дозволяє трансформувати стандартний заклад HoReCa із суто комерційного об'єкта в соціально відповідальний простір. Більше того, залучення відпрацьованої кавової гущі та джутових матеріалів відкриває нові перспективи для розвитку напрямів еко-арт-терапії. Використання цих безпечних, фактурних та ароматичних вторинних ресурсів у творчих майстер-класах (зокрема, кавовий живопис чи створення фактурних мильних композицій) не лише сприяє емоційному розвантаженню та психологічній рекреації учасників, але й формує на підсвідомому рівні глибоку повагу до принципів безвідходного споживання.

Водночас практична імплементація системи може стикатися з низкою зовнішніх загроз. Головними ризиками виступають загальний низький рівень культури поводження з відходами в суспільстві, а також мікробіологічна нестабільність вологої органічної фракції у разі порушення логістичних ланцюгів, що є особливо критичним фактором в умовах воєнного стану. Додатковим стримуючим бар'єром може слугувати обмежений платоспроможний попит на еко-продукцію з вторинної сировини в окремих регіонах.

Загалом, проведений аналіз свідчить, що розроблена комплексна система має високий адаптивний потенціал. Основними драйверами її успіху є поєднання технологічних рішень (виробництво біорозкладних полімерних композиційних матеріалів та мила) із соціальними інструментами (арт-терапія, майстер-класи, волонтерство).

Найбільш проблемним сегментом залишається децентралізоване пакування, рециклінг якого потребує створення спеціалізованої інфраструктури. Ефективне впровадження системи дозволить не лише зменшити антропогенне навантаження на екосистеми через скорочення обсягів захоронення відходів, але й створити дієву платформу для екологічної



трансформації міського середовища, де заклади кавової індустрії виступають активними центрами циркулярної економіки.

### 5.5 Висновки до розділу 5

1. Обґрунтовано та розроблено комплексну систему управління ресурсними потоками кавової індустрії, яка охоплює повний життєвий цикл продукту (від імпорту та обсмажування сировини до децентралізованого споживання та утилізації пакування). Перехід від лінійної моделі до багаторівневої циркулярної стратегії дозволяє мінімізувати обсяги полігонного захоронення та забезпечити стабільну регенерацію вторинних ресурсів.

2. Виявлено просторову специфіку генерації кавових відходів, яка характеризується глибокою просторовою дисипацією (особливо для порційної кави та супутнього пакування).

3. Здійснено порівняльний морфологічний та логістично-технологічний аналіз супутніх пакувальних відходів. Встановлено, що потенціал їх ресурсного відновлення зумовлений конструктивними особливостями: від високої придатності мономатеріалів (алюмінієві капсули, картон) та джутової тари (успішно інтегрованої у соціальні проєкти «мілітарного апсайклінгу») до критичних обмежень багат шарових композитних систем (пакування дріп-пакетів, капсули з EVOH-шаром), утилізація яких потребує спеціалізованої інфраструктури для розділення.

4. Експериментально та практично підтверджено доцільність локальної валоризації відпрацьованої кавової гуцці. Розроблена технологія виготовлення мила на основі ВКГ з унікальною візуальною ідентифікацією виступає не лише дієвим інструментом матеріального рециклінгу, але й потужною базою для впровадження інноваційних методів еко-арт-терапії та підвищення рівня корпоративної соціальної відповідальності малого бізнесу.

5. На основі проведеного SWOT-аналізу доведено високий адаптивний потенціал розробленої комплексної системи. Встановлено, що синергія технологічних (виробництво біокомпозитів, агрокомпосту) та соціально-просвітницьких інструментів формує стійку платформу для екологічної трансформації міського середовища, знижуючи антропогенне навантаження на екосистеми навіть в умовах нестабільності логістичних ланцюгів та воєнного стану.

Зміст розділу відображено у наступних наукових публікаціях [25], [26], [31], [52], [156].

## ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі науково обґрунтовано та розроблено екологічно безпечну технологію комплексної утилізації твердих органічних залишків кавової індустрії, що забезпечує запобігання їхньому багатотонному накопиченню у навколишньому середовищі та створює умови для ефективного повернення відходів виробництва й споживання у повторний ресурсний обіг. Відповідно до поставлених завдань отримано наступні результати, які мають наукову та практичну значущість:

1. На основі аналізу соціокультурних та економічних чинників встановлено закономірності просторового накопичення відходів кавової індустрії. Доведено, що сучасна глобалізована модель споживання кави, поширення локального обсмажування та зростання мережі закладів HoReCa призводять до просторового розриву природних біогеохімічних циклів і формування масивних, децентралізованих потоків органічних та пакувальних відходів в умовах урбанізованих територій.

2. Здійснено комплексну оцінку екологічної небезпеки полігонного захоронення кавової гущі та кавової луски. Встановлено, що їх неконтрольований анаеробний розпад супроводжується викидами парникових газів, утворенням високотоксичних фільтратів, локальним закисленням та забрудненням ґрунтів, що науково обґрунтовує абсолютну імперативність відмови від полігонного захоронення та впровадження нових технологій їхньої матеріальної утилізації.

3. Обґрунтовано еколого-технологічні параметри низькоенергоємного процесу термічної стабілізації відпрацьованої кавової гущі. Доведено, що сушіння сировини до безпечного рівня вологості, втому числі із залученням вторинних теплових ресурсів промислового пекарського обладнання, є обов'язковим технологічним етапом, який дозволяє запобігти швидкому мікробіологічному псуванню, розвитку пліснявих грибів та підготувати сировину до подальшого зберігання і використання.

4. За результатами комплексної еколого-агрохімічної оцінки виявлено механізми впливу безпосереднього внесення неферментованих кавовмісних відходів на загальний агроекологічний стан ґрунтів. Встановлено закономірності зміни структурно-механічних та водно-фізичних параметрів, а також зафіксовано ризики підвищення фітотоксичності, що дозволило науково обґрунтувати жорсткі межі їхнього екологічно безпечного застосування як ґрунтових меліорантів.

5. Встановлено чітку кореляційну залежність між дисперсністю відпрацьованої кавової гущі та мийною здатністю екологічно безпечних композицій на її основі. Експериментально доведено, що використання кавової гущі як природного абразиву дозволяє ефективно видаляти складні побутові та технічні забруднення, при цьому висока технологічність засобів забезпечується оптимальним розміром частинок та їх рівномірним розподілом у мильній матриці.

6. Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено еколого-технологічну доцільність використання відпрацьованої кавової гущі як органічного наповнювача для біорозкладних полімерних матеріалів. Аналіз експлуатаційних, фізико-механічних та структурних властивостей отриманих екокомпозитів довів, що інтеграція лігноцелюлозної кавової сировини дозволяє суттєво зменшити витрати первинних полімерів, підвищити ресурсоефективність та розширити сферу матеріальної валоризації відходів.

7. Розроблено комплексну модель екологічно безпечного управління децентралізованими потоками відходів споживання кави в умовах урбанізованих територій. Запропонована багаторівнева система, побудована на засадах циркулярної економіки, передбачає концептуальну трансформацію кав'ярень у локальні еко-хаби для роздільного збирання та первинної стабілізації кавової гущі з її подальшим багатовекторним переспрямуванням у виробництво біокомпозитів, мийних засобів, агрокомпостів та інтеграцією у соціально-екологічні проекти.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткач Д., Білокур Г. Вплив глобалізації на розвиток міжнародних соціально-економічних процесів. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2022. №4(68). С. 28–35.
2. Alkharafi N, Alsabah M. Globalization: An Overview of Its Main Characteristics and Types, and an Exploration of Its Impacts on Individuals, Firms, and Nations. *Economies*. 2025. Vol. 13(4):91. URL: <https://doi.org/10.3390/economies13040091> (дата звернення: 06.07.2025).
3. Cornali F., Tirocchi S. Globalization, Education, Information and Communication Technologies: What Relationships and Reciprocal Influences? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 47. P. 2060–2069.
4. Маленко Я. В., Ворошилова Н. В., Поздній Є. В. Глобалізація та екологічні проблеми: навчальний посібник. Кривий Ріг: КДПУ, 2024. Частина I. 291 с.
5. Прушківська Е. В., Шевченко Ю. О. Суперечності розвитку глобалізації: національний аспект. *Вісник Запорізького національного університету*. 2009. №1(4). С. 161–166.
6. Приходько В. П., Бочкай А. А. Екологічні проблеми в контексті прискореної економічної глобалізації та безпечного розвитку. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2023. №49. С. 110–113.
7. Франкопан П. Шовкові шляхи. Нова історія світу. Київ : Лабораторія, 2024. 624 с.
8. Гальчинський А. С. Глобальні трансформації: концептуальні альтернативи. Київ : Либідь, 2006. 312 с.
9. Бауман З. Глобалізація: наслідки для людини і суспільства. Київ: Видавництво «Києво-Могилянська академія», 2008. 112 с.
10. Pendergrast M. *Uncommon Grounds : The History of Coffee and How It Transformed Our World*. New York : Basic Books, 2010. 480 p.
11. Балущинська А., Тобіасевич Е. Кава як символ колоніалізму:

соціальна історія кави як частина глобальних владних відносин і культурної дифузії. *Культурологічний альманах*. 2025. № 2. С. 346–357.

12. Bressani R. Coffee Pulp: Composition, Technology, and Utilization. Guatemala : Institute of Nutrition of Central America and Panama (INCAP), 1979. 97 p.

13. Coffee Pulp: An Industrial By-product with Uses in Agriculture, Nutrition and Biotechnology / N. Fierro-Cabrales [et al.] // *Reviews in Agricultural Science*. 2020. Vol. 8. P. 323–341.

14. Ofori-Frimpong K., Afrifa A. A., Appiah M. R. Amounts of NPK removed from soil in harvested coffee berries as guiding baseline for planning fertilizer requirements. *Ghana Journal of Agricultural Science*. 2010. Vol. 43, No. 1. P. 3–7.

15. Coffee Report and Outlook [Electronic resource] / International Coffee Organization. London, 2023. URL: <https://icocoffee.org/> (дата звернення: 12.03.2025).

16. Historical Data on the Global Coffee Trade [Electronic resource] / International Coffee Organization. URL: <https://ico.org/resources/historical-data-on-the-global-coffee-trade/> (дата звернення: 12.03.2025).

17. Mussatto S. I., Machado E. M. S., Martins S., Teixeira J. A. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*. 2011. Vol. 4. No. 5. P. 661–672.

18. World Integrated Trade Solution (WITS). Coffee, not roasted or decaffeinated exports by country (2019-2022). Washington, D.C. : World Bank, 2024.

19. Top Global Coffee Exports by Country during 2023-2024. 2025. URL: <https://www.tendata.com/blogs/export/6429.html> (дата звернення: 12.03.2025).

20. Нечитайло П. Османська кав'ярня XVII століття у центрі Кам'янця-Подільського. Локальна історія. 2024. URL: <https://localhistory.org.ua/rubrics/artifact/osmanska-kaviarnia-xvii-stolittia-u-tsentri-kamiantsia-podilskogo/> (дата звернення: 12.03.2025).

21. Мельницька Ю. За п'ять років Україна збільшила імпорт кави на

63%. Investory News. 2021. URL: <https://investory.news/za-pyat-rokiv-ukraina-zbilshila-import-kavi-na-63/> (дата звернення: 12.03.2025).

22. Про Митний тариф України : Закон України від 19.10.2022 № 2697-IX : станом на 31 груд. 2025 р. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-20#Text> (дата звернення: 31.12.2025).

23. Економічна статистика / зовнішньоекономічна діяльність. Державна служба статистики України. URL: <https://ess.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 02.12.2025).

24. Вітюк О. В., Залевська В. О. Аналіз розвитку ринку кавових напоїв в Україні. *Innovation and Sustainability*. 2023. № 1. С. 115–122.

25. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Пріоритетні напрямки використання залишків виробництва та споживання кави. *Євроінтеграція екологічної політики України* : матеріали четвертої Всеукр. наук.-практ. конф., м. Одеса, 25 жовтня 2022 р. Одеса : ОДЕУ, 2022. С. 110. .

26. Кочетов М. С. Вплив пересувних кав'ярень на урбоекосистему. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України* : матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., до дня пам'яті Ф. В. Стольберга, Харків, 02–03 листопада 2023 р. Харків, 2023. С. 37–38.

27. Coffee Development Report 2020: The Value of Coffee. International Coffee Organization. London, 2020.

28. Nab C., Maslin M. Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam and other global producers. *Geo: Geography and Environment*. 2020. Vol. 7, Iss. 2.

29. Shalene Jha, Christopher M. Bacon, Stacy M. Philpott, V. Ernesto Méndez, Peter Läderach, Robert A. Rice Shade Coffee: Update on a Disappearing Refuge for Biodiversity. *BioScience*. 2014. Vol. 64, Iss. 5. P.416–428.

30. Moreira A. S., Nunes F. M., Domingues M. R., Coimbra M. A. Coffee melanoidins: structures, mechanisms of formation and potential health impacts. *Food Funct.* 2012. Vol. 3(9). URL: <https://doi.org/10.1039/c2fo30048f> (дата

звернення: 12.03.2025).

31. Тихомирова Т. С., Шестопапов О. В., Разно М. Р., Кочетов М. С. Дослідження впливу складу компосту на його здатність покращувати якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 72–78.

32. Тихомирова Т. С., Кочетов М. С. Дослідження впливу відходів обсмаження та споживання кави на якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2025. № 29. С. 155–161.

33. Lee J. D., Kim J., Lee S. Study of Recycled Spent Coffee Grounds as Aggregates in Cementitious Materials. *Recent Progress in Materials*. 2023. Vol. 5, Iss. 1. P. 1–13.

34. Forcina A., Petrillo A., Travaglioni M., De Felice F. A comparative life cycle assessment of different spent coffee ground reuse strategies and a sensitivity analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 391. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135727> (дата звернення: 16.02.2025).

35. Farm to cable: life cycle assessment of carbon electrocatalysts derived from coffee waste / S. Chu та ін. *RSC Sustainability*. 2025. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/su/d5su00618j> (дата звернення 14.10.2025).

36. Pazmino M. L., Mero-Benavides M., Aviles D., Blanco-Marigorta A. M., Tinoco D. L., Ramirez A. D. Life cycle assessment of instant coffee production considering different energy sources. *Cleaner Environmental Systems*. 2024. Vol.12 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100174> (дата звернення 14.10.2025).

37. Haile M. Integrated valorization of spent coffee grounds to biofuels. *Biofuel Res. J.* 2014. Vol. 1. P. 65–69.

38. Abdullah M., Кос А. В. Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication. *Renew. Energy*. 2013. Vol. 50. P. 965–970.

39. Melo M. M. R. та ін. Supercritical fluid extraction of spent coffee grounds: Measurement of extraction curves, oil characterization and economic analysis. *J. Supercrit. Fluids*. 2014, 86. P. 150–159.



40. Kondamudi N., Mohapatra S. K., Misra M. Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. *J. Agric. Food Chem.* 2008. Vol. 56. Iss.24 P. 11757–11760.
41. Haile M., Asfaw A., Asfaw N. Investigation of waste coffee ground as a potential raw material for biodiesel production. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2013. Vol. 3. P. 854–860.
42. Kwon E. E., Yi H., Jeon Y. J. Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. *Bioresour. Technol.* 2013. Vol. 136. P. 475–480.
43. Girotto F., Lavagnolo M. C., Pivato A. Spent Coffee Grounds Alkaline Pre-treatment as Biorefinery Option to Enhance their Anaerobic Digestion Yield. *Waste and Biomass Valorization*. 2017. Vol.9. Iss.12. DOI: 10.1007/s12649-017-0033-8 (дата звернення 28.01.2025).
44. Lee M., Yang M., Choi S., Shin J., Park C., Cho S. K., Kim, Y. M. Sequential production of lignin, fatty acid methyl esters and biogas from Spent Coffee Grounds via an integrated physicochemical and biological process. *Energies* 2019. Vol. 12. P. 2360. DOI: 10.3390/en12122360 (дата звернення 28.01.2025).
45. Primaz C. T., Schena T., Lazzari E., Caramãoa E. B., Jacques R. A. Influence of the temperature in the yield and composition of the bio-oil from the pyrolysis of spent coffee grounds: Characterization by comprehensive two dimensional gas chromatography. *Fuel*. 2018. Vol. 232. P. 572–580.
46. Corr G., Paniagua L., Pal U., Bañuelos F., Rosas M. Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions. *Energy Convers. Manag.* 2013. Vol. 74. P. 471–481.
47. Martínez-Carrer D., Aguilar A., Martínez W., Bonilla M., Morales P., Sobal M. Commercial production and marketing of edible mushrooms cultivated on coffee pulp in Mexico. In *Coffee Biotechnology and Quality, Proceedings of the Third International Seminar on Biotechnology in the Coffee Agro-Industry*, Londrina, Brazil; Sera T., Soccol C. R., Pandey A., Roussos S., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2000. P. 471–488.

48. Velázquez-Cedeñ M. A., Mata G., Savoie J.-M. Waste-reducing cultivation of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius* on coffee pulp. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2002, 18. P. 201–207.

49. Потенціал використання кавової гущі у технологіях функціональних продуктів харчування. Огляд / В. О. Сукманов, О. М. Комар, О. В. Сукманов, Т. І. Юдіна. *Journal of Chemistry and Technologies.* 2024. Vol. 32, № 3. С. 605–648.

50. Franca A. S., Oliveira L. S. Potential uses of spent coffee grounds in the food industry. *Foods.* 2022. Vol. 11. P. 2064. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11142064> (дата звернення 28.01.2025).

51. Elezović A, Kelle BP, Oras A, Mujkić H, Memić M, Kojčin E, Bulbulušić M, Mujčinović A, Nikolić A, Bečić F. Caffeinated Skincare Development and Optimization: Upcycling Spent Coffee Grounds Into Natural Exfoliants. *J. Cosmet Dermatol.* 2025. Vol. 24(12). DOI: 10.1111/jocd.70607. (дата звернення 22.02.2025).

52. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Використання кавової гущі у складі очищаючих засобів як елемент сталого управління відходами. *Інтегровані технології та енергозбереження.* 2025. № 3. С. 132–141.

53. Costa C., Marques M., Martins A. M., Gonçalves L., Pinto P., Ribeiro H. M., Marto J., Paiva A. Upcycling Spent Coffee Grounds into Bioactive Extracts Using New Natural Deep Eutectic Systems for Sustainable Topical Formulations. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering.* 2025. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.4c06397> (дата звернення 03.04.2025).

54. Piasek A. M., Bardadyn P., Trojan Z., Jelonek K., Wysocki L., Kobiela T., Sobiepanek A. та ін. Research on Spent Coffee Grounds: From Oil Extraction to its Potential Application in Cosmetics. *Waste and Biomass Valorization.* 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03284-2> (дата звернення 03.06.2025).

55. Iriundo-DeHond A., Martorell P., Genovés S. Ramón D., Stamatakis K., Fresno M., Molina A., Del Castillo M. D. Coffee Silverskin Extract Protects against

Accelerated Aging Caused by Oxidative Agents. *Molecules*. 2016. Vol. 21, Iss. 6. 721. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21060721> (дата звернення 28.01.2025).

56. Kang B.-J., Jeon J.-M., Bhatia S.K., Kim D.-H., Yang Y.-H., Jung S., Yoon J.-J. Two-Stage Bio-Hydrogen and Polyhydroxyalkanoate Production: Upcycling of Spent Coffee Grounds *Polymers*. 2023. Vol. 15. Iss. 3. 681. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15030681> (дата звернення 28.01.2025).

57. Bomfim A. S. C., Oliveira D. M., Voorwald H. J. C., Benini K., Dumont M. J., Rodrigue D. Valorization of Spent Coffee Grounds as Precursors for Biopolymers and Composite Production. *Polymers*. 2022. Vol. 14. Iss. 4. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8840223/> (дата звернення 28.01.2025).

58. Mäder G., Rüegg N., Tschichold T., Yildirim S. Utilizing spent coffee grounds as sustainable fillers in biopolymer composites: influence of particle size and content. *Sustainable Food Technology*. 2025. Vol. 3. P. 1151–1163.

59. Boughanmi O., Allegue L., Marouani H., Koubaa A., Beauregard M. Upcycling Spent Coffee Grounds-Based Composite for 3D Printing: A Review of Current Research / A. M. Arun Mohan та ін. *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9. Iss. 9. 467. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9090467> (дата звернення 28.10.2025).

60. Лебедєв В. В., Мірошніченко Д. В., Тихомирова Т. С., Савченко Д. О., Мазченко М. В., Мисяк В. Р., Кочетов М. С., Соловей Л. В. Дослідження гібридних екологічно безпечних біодеградабельних композитів на основі полілактиду, кавової гущі та гумінових речовин. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 4. С. 46–54.

61. Farisa M., Prathisha A.A., Shalini V.A., Saravanya Dr. K. S. From waste to wear: Transforming Coffee Grounds into Sustainable Textile Dye for cotton/hemp fabric. *International Journal of Innovative Research in Technology*. 2024. Vol. 11. Iss. 10. P. 1336–1340.

62. Becker. P., Howarth S., Ciesielska-Wrobel I. Eco-Friendly Dyeing Processes of Nylon 6.6 Woven Fabrics with Used Coffee Grounds (UCG).

*Sustainability*. 2024. Vol. 16. Iss. 20. 8919. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208919> (дата звернення 28.01.2025).

63. Prihadi A.R. Maimulyanti A. Chemical Compounds of Coffee Ground and Spent Coffee Ground for Pharmaceutical Products. *Pharmaceutical and Biomedical Sciences Journal*. 2021. URL: <https://doi.org/10.15408/pbsj.v2i2.18338> (дата звернення 28.01.2023).

64. Bevilacqua, E.; Cruzat, V.; Singh, I.; Rose'Meyer, R.B.; Panchal, S.K.; Brown, L. The Potential of Spent Coffee Grounds in Functional Food Development. *Nutrients*. 2023. Iss. 15(4). P. 994. URL: <https://doi.org/10.3390/nu15040994> (дата звернення 24.05.2023).

65. Biondić Fučkar, V.; Božić, A.; Jukić, A.; Krivohlavek, A.; Jurak, G.; Tot, A.; Serdar, S.; Žuntar, I.; Režek Jambrak, A. Coffee Silver Skin—Health Safety, Nutritional Value, and Microwave Extraction of Proteins. *Foods*. 2023. Iss. 12. Vol.3. P. 518. URL: <https://doi.org/10.3390/foods12030518> (дата звернення 12.02.2024).

66. Полянський С. В. Ґрунтознавство з основами географії ґрунтів : понятійно-термінологічний словник. 2-ге вид., переробл. та доповн. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. 202 с.

67. Литовченко О. М. Плодівництво : підручник. 2-ге вид., переробл. та доповн. Вінниця : Твори, 2021. 416 с

68. Методичні вказівки з вивчення навчальної дисципліни «Ягідництво» для здобувачів вищої освіти / уклад. О. В. Князюк. Умань : УНУС, 2022. 84 с.

69. Болобон Н.М. Вплив ґрунтово-кліматичних умов на урожайність суниці садової (FRAGARIA ANANASSA L.). *Садівництво*. 2023. Вип.78. С. 26–31.

70. Кочетов М.С., Черкашина Г.М. Дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гуцці. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 4. С. 125-134.

71. Lebedev V. V., Miroshnichenko D.V., Tykhomyrova T.S. Study of brown

coal humic substances hybrid modification on sorption resistance of biodegradable materials. *Colloquium-journal*. 2023. № 10 (169). P. 26-28.

72. ДСТУ 4886.20:2007 Сіль кухонна. Визначення крупності. Київ: ТК 58, УкрНДІсіль, 2007. 5с.

73. Ображей А.Ф., Погребняк Л.І. та ін. Методичні вказівки по санітарно-мікологічній оцінці та поліпшенню якості кормів. Київ, 1998. 107 с.

74. ДСТУ ISO 11294 Кава обжарена мелена. Загальний метод визначення вмісту вологи при втраті маси за температури 103 °С. Київ: ЗАТ «Укркондитер», 2008. 8с.

75. Demianová A., Bobková A., Poláková K., Jurčaga L., Bobko M., Lidiková J., Mesárošová A., Belej L., Bučko O. *J* Moisture content and its possible effect on textural properties and color of green Coffea Arabica. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2023. Vol. 12, Iss. 4. URL: <https://doi.org/10.55251/jmbfs.9491> (дата звернення 04.02.2024).

76. ДСТУ ISO 10381–6:2015. Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 6. Київ: Держспоживстандарт України, 2017. 12 с.

77. ДСТУ ISO 11269–2:2002. Якість ґрунту. Визначення дії забруднювачів на флору ґрунту. Частина 2. Київ: Держстандарт України. 14 с.

78. ДСТУ ISO 10390:2023 Якість ґрунту. Визначення рН. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 18 с.

79. ДСТУ 9178:2022 Ґрунти. Методи лабораторного визначення коефіцієнта фільтрації. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 24 с.

80. Атлас ґрунтів Харківської області / за ред. М. О. Горіна, С. А. Балюка. Харків : Вид-во ННЦ «ІГА», 2006. 102 с.

81. Цейтлін М. А., Тихомирова Т.С., Крючкова В.В. Дослідження впливу циклів прання на експлуатаційні властивості текстильних виробів. *Вісник КрНУ*. 2025. Вип. 2 (151). С. 54-61.

82. Tykhomyrova T., Kochetov M., Pavlenko R. Kariev A., Kopylov S., Vitalii Lavryk V., Masikevych Yu. Environmentally Safety Biodegradable Composites Based On Renewable Biopolymer Materials And Coffee Grounds:

Mechanical and Dielectric Properties. 2025 *IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2025. P.1-4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/11288471/proceeding?sortType=vol-only-seq&isnumber=11288549&refinementName=Author&refinements=Author:Kochetov%20Mykyta> (дата звернення 04.02.2026).

83. ДСТУ ISO 1183-1:2015 Пластмаси. Методи визначення густини непористих пластмас. Частина 1. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 14 с.

84. ДСТУ ISO 1133-1:2017 Пластмаси. Визначення швидкості текучості розплаву. Частина 1. Стандартний метод. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 25 с.

85. ДСТУ ISO 3146:2005 Пластмаси. Визначення характеристик плавлення. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 15 с.

86. Підгорна Л.П., Черкашина Г.М., Лебедєв В.В. Теорія та методи дослідження і випробування пластмас, клеїв та герметиків. Харків. НТУ «ХПІ». 2015. 276 с.

87. Faure F., Perrot A., Pimbert S., Lecompte Th.. Water absorption measurements on WPCs: Assessment of size and direction dependencies in order to design fast and accurate quality control tests. *Polymer Testing*. 2019. Iss 77. pp.105899

88. Girimurugan R., Saravanan K.G., Manickavasagam P., Gurunathan G., Vairavel M. Experimental Studies on Water Absorption Behaviour of Treated and Untreated Hybrid Bio-Composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1059. Art. 012017. URL: [https://www.researchgate.net/publication/366425088\\_Experimental\\_Studies\\_on\\_Water\\_Absorption\\_Behaviour\\_of\\_Treated\\_and\\_Untreated\\_Hybrid\\_Bio-Composites](https://www.researchgate.net/publication/366425088_Experimental_Studies_on_Water_Absorption_Behaviour_of_Treated_and_Untreated_Hybrid_Bio-Composites) (дата звернення 03.02.2024).

89. Катрук Д.С., Левицький В.Є., Масюк А.С., Куліш-Пеленська Б.І., Кисиль Х.В., Ларук І.В. Вплив водних середовищ на стійкість модифікованих полілактидних матеріалів. *Питання хімії та хімічної технології*. 2025. № 1. С. 4–12.

90. DIN 53435:2018-09. Testing of plastics – Bending test and impact test on

dynstat test specimens. Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2018. 32 p.

91. Effect of alkali treatment on the mechanical properties of Poly (lactic acid) / Guineacorn husk particulate bio-composites / U. Shehu, U. S. Ishiaku, T. Ause, R. M. Taib, O. Aponbiede. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2016. Issue 29. P. 17–32.

92. Liu Y., Lu S., Luo J., Zhao Y., He J., Liu C., Chen Z., Yu X. Research progress of antistatic-reinforced polymer materials: A review. *Polymers for advanced technologies*. 2023. Vol.34. Iss.4. P.1393-1404.

93. ДСТУ ISO 5084:2004 Матеріали текстильні. Визначання товщини текстильних матеріалів та текстильних виробів. Вид офіц. Київ.

94. Расторгуєва М.Й., Євтушенко В.В., Горізонтова О.В. Матеріалознавство та експертиза текстильних виробів. Херсон, 2009. 206 с.

95. Біоіндикація. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт / А.І. Горова та ін. Д.: Національний гірничий університет, 2014. – 76 с.

96. Кочетов М. С., Пітак Р. О. Дослідження процесів розвитку плісневих грибів на відходах споживання кави. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. 33-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14–17 травня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 438.

97. Артемов В. О., Бахчеван Е. В., Бочко О. А. Циркулярна економіка – виклики сучасності. *Економіка та суспільство*. 2023. №58. С.1-11.

98. Tinoco-Caicedo D. L., Mero-Benavides M., Corral-Santos S. Experimental and Simulation Study of Convective Drying Process of Spent Coffee Grounds Including an Exergoeconomic Analysis. *Congress on Research, Development and Innovation in Renewable Energies*. Cham : Springer, 2025. P. 75–83. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-88995-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-88995-0_6) (дата звернення 18.08.2025).

99. Gómez-de la Cruz F. J., Palomar-Carnicero J. M., Hernández-Escobedo Q., Cruz-Peragón F. Experimental studies on mass transfer during convective drying of spent coffee grounds generated in the soluble coffee industry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. Vol. 145, Iss. 1. P. 97–107.

100. Li Y., Chen M. Q. Far-infrared irradiation drying behavior of typical biomass briquettes. *Energy*. 2017. Vol. 121. P. 726–738.
101. Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Gavrilov A., Vsevolodov O., Sirotuk I., Terziev S. Experimental studies on the kinetics of infrared drying of spent coffee grounds. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2020. № 1/1(51). С. 4–10.
102. Fu B. A., Chen M. Q. Microwave drying performance of spent coffee grounds briquette coupled with mineral additives. *Drying Technology*. 2020. Vol. 38, Iss. 15. P. 2094–2101.
103. Dong W., Hu R., Chu Z., Zhao J., Tan L. Effect of microwave vacuum drying on the drying characteristics, color, microstructure, and antioxidant activity of green coffee beans. *Molecules*. 2018. Vol. 23, Iss. 5. P. 1146. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23051146> (дата звернення 13.09.2024).
104. Solberg S. B., Solberg S. Ø. Spent coffee grounds as a sustainable coffee flavouring ingredient in muffins. *Exploration of Foods and Foodomics*. 2025. Vol. 3. P. 101066. DOI: <https://doi.org/10.37349/eff.2025.101066> (дата звернення 18.12.2025).
105. Tun M. M., Raclavská H., Juchelková D., Růžicková J., Šafář M., Štrbová K., Gikas P. Spent coffee ground as renewable energy source: Evaluation of the drying processes. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 275. P. 111204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111204> (дата звернення: 12.03.2024).
106. Bouhzam I., Cantero R., Margallo M., Aldaco R., Bala A., Fullana-I-Palmer P., Puig R. Extraction of Bioactive Compounds from Spent Coffee Grounds Using Ethanol and Acetone Aqueous Solutions. *Foods*. 2023. Vol. 12, Iss. 24. P. 4400. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12244400> (дата звернення 12.03.2024).
107. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіон України, 2013. 141 с.
108. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : затв. постановою Головного держ. санітарного лікаря України від



01.12.1999 № 42. Київ : МОЗ України, 1999. 12 с.

109. How to Handwash? With soap and water. *World Health Organization*. URL: <https://www.who.int/docs/default-source/patient-safety/how-to-handwash-poster.pdf> (дата звернення: 29.04.2025).

110. Samadi A. [та ін.]. Stratum corneum hydration in healthy adult humans according to the skin area, age and sex: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*. 2022. Vol. 36, No. 10. P. 1693–1711.

111. Балюк С. А., Кучер А. В., Максименко Н. В. Ґрунтові ресурси України: стан, проблеми і стратегія сталого управління. *Український географічний журнал*. 2021. № 2. С. 3–11.

112. Оверковська Т. К. Еколого-правові засади охорони ґрунтів. *Підприємництво, господарство і право*. 2020. № 11. С. 89–105.

113. Золотарьова І. Б. Родючість ґрунтів меліорованих земель Львівської області. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2018. №6(76). URL : <https://www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/dopovidi2018.06.004> (дата звернення: 12.03.2024).

114. Зайцев Ю. О., Демчишин А. М., Гунчак М. В. Стан родючості ґрунтів Львівської області. *Агроекологічний журнал*. 2023. № 1. С.92–100.

115. Полянська К. В. Екологічні наслідки воєнних дій на дику природу України. *Журнал про екологічні наслідки війни / Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. 2023. Вип. 10. С. 9-21.

116. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Найдьонова О. Є. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів території Харківського району Харківської області. *Український журнал природничих наук*. 2024. №7. С. 25-32.

117. Бондар Т.О., Шестопапов О.В., Босюк А.С., Сакун А.О., Нечипоренко Д.І., Бондар Т.В. Ефективність біоремедіації нафтозабруднених ґрунтів України. *Аграрні інновації*. 2025. № 33. С. 261–265.

118. Бондар Т.О., Шестопапов О.В., Босюк А.С., Сакун А.О., Нечипоренко Д.І., Бондар Т.В. Біоремедіаційне відновлення нафтозабруднених ґрунтів: експериментальне дослідження. *Екологічні науки*. 2025. № 5 (62), ч. 1. С. 181–188. URL:

119. Маліченко В. В. Аналіз сучасного досвіду використання відходів кави в Україні. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, 22-24 листопада 2023 р. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. С.303-304.

120. Ronga D. [та ін.]. Valorization of spent coffee grounds, biochar and other residues to produce lightweight clay ceramic aggregates suitable for nursery grapevine production. *Horticulturae*. 2020. Vol. 6, No. 4. Art. 58. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040058> (дата звернення: 12.03.2024).

121. Cervera-Mata A. [та ін.]. Impact of spent coffee grounds as organic amendment on soil fertility and lettuce growth in two Mediterranean agricultural soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2017.1387651> (дата звернення: 12.03.2024).

122. Мічута О. Р., Мартинюк П. М., Герус В. А. Математичне моделювання процесів хімічної та контактної суфозій в ґрунтах : монографія. Рівне : НУВГП, 2016. 208 с.

123. Полевецький В. В., Собко Ю. Т. Механіка ґрунтів : консп. лекцій. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2023. 56 с.

124. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Дослідження впливу відходів споживання кави на рівень рН ґрунтів. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 16 травня 2024 р. Харків : НУЦЗУ, 2024. С. 306–307.

125. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Перспективи використання відходів споживання кави в якості антислизького агенту. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, м. Харків, 14–16 грудня 2022 р. Харків : НТУ «ХП», 2022. С. 339.

126. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. Iss 1. P. 257.

127. Tilsted J. P. et al. Ending fossil-based growth: confronting the political economy of petrochemical plastics. *One Earth*. 2023. Vol. 6. Iss. 6. P. 607–619.

128. Таланюк В. В. Основні характеристики та промислове застосування біополімерів на основі полігідроксibuтирату (огляд). *Екологічні науки*. 2020. № 1 (28). С. 83–89.

129. Формування високонаповнених біокомпозитних матеріалів на основі модифікованих матриць природного походження : монографія / В. Д. Руденко [та ін.]. Луцьк : Луцький НТУ, 2023. 184 с.

130. Supri S., Felicia W. X. L., Affandy M. A. M., Padam B. S., Prihanto A. A., Rovina K. Macroalgae-Based Bio-Based Packaging: characteristics, green extraction methods, and applications as sustainable solutions. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 15. Iss.1. P. 249–266.

131. Harkal N. V. A., Deshmukh N. S. P. A review on biodegradable polymers: Used as packaging Materials. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*. 2023. Vol. 25. P.107–115.

132. Samir A., Ashour F. H., Hakim A., Bassyouni M. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*. 2022. Vol. 6. Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00277-7> (дата звернення: 28.05.2025).

133. Adrah K., Ananey-Obiri D., Tahergorabi R. Development of bio-based and biodegradable plastics. *Springer eBooks*. 2021. P. 3663–3687.

134. Nofar M., Salehiyan R., Ray S. S. Influence of nanoparticles and their selective localization on the structure and properties of polylactide-based blend nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 215. P. 108845.

135. Bollakayala V. L., Etakula N., Vuba K. K., Manne Y. S., Uttaravalli A. N. Preparation and characterization of green composites based on expanded

polystyrene waste and biomass: Sustainable management approach. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 66. P. 1762–1768.

136. Le T., Gacoin A., Li A., Mai T. H., Wakil N. E. Influence of various starch/hemp mixtures on mechanical and acoustical behavior of starch-hemp composite materials. *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 75. P. 201–211.

137. Lebedev V., Tykhomyrova T., Litvinenko I., Avina S., Saimbetova Z. Design and research of eco-friendly polymer composites. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 259–266.

138. Lebedev V., Tykhomyrova T., Filenko O., Cherkashina A., Lytvynenko O. Sorption resistance studying of environmentally friendly polymeric materials in different liquid mediums. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 168–174.

139. Matjašič T., Simčič T., Medvešček N., Bajt O., Dreo T., Mori N. Critical evaluation of biodegradation studies on synthetic plastics through a systematic literature review. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 752. P. 141959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141959> (дата звернення: 14.03.2025).

140. Ahmad M. R., Chen B., Oderji S. Y., Mohsan M. Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 173. P. 719–733.

141. Lebedev V., Miroshnichenko D., Tykhomyrova T., Kariev A., Zinchenko M., Bukatenko N., Filenko O. Design and research of environmentally friendly polymeric materials modified by derivatives of coal. *Petroleum & Coal*. 2023. Vol. 65, № 2. P. 334.

142. Lebedev V., Tykhomyrova T., Miroshnichenko D., Filenko O., Kariev A., Grigorova T. Design and research of environmental friendly polymeric materials modified by humic substances. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684. P. 040014.

143. Abbassi F. E. E., Assarar M., Ayad R., Sabhi H., Buet S., Lamdouar N. Effect of recycling cycles on the mechanical and damping properties of short alfa fibre reinforced polypropylene composite. *Journal of Renewable Materials*. 2019.

Vol. 7, № 3. P. 253–267.

144. de Bomfim A. S. C., de Oliveira D. M., Benini K. C. C. d. C., Cioffi M. O. H., Voorwald H. J. C., Rodrigue D. Effect of spent coffee grounds on the crystallinity and viscoelastic behavior of polylactic acid composites. *Polymers*. 2023. Vol. 15. Art. 2719. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15122719> (дата звернення: 14.02.2025).

145. Gaidukova G., Platnieks O., Aunins A., Barkane A., Ingrao C., Gaidukovs S. Spent coffee waste as a renewable source for the production of sustainable poly(butylene succinate) biocomposites from a circular economy perspective. *RSC Adv*. 2021. Vol. 11. P. 18580.

146. Waisarikit A, Suadaung N, Khamtho B, Hadad B, Ross GM, Topham PD, Ross S, Mahasaranon S. Extracted Spent Coffee Grounds as a Performance-Enhancing Additive for Poly(Lactic Acid) Biodegradable Nursery Bags in Agriculture. *Polymers*. 2025; 17(5):561. <https://doi.org/10.3390/polym17050561>

148. Mohanty A. K., Vivekanandhan S., Pin J.-M., Misra M. Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. *Science*. 2018. Vol. 362, Issue 6414. P. 536–542.

149. European Commission. A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. COM/2020/98 final. Brussels, 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098> (дата звернення: 12.03.2025).

150. Коваленко О., Яценко Л. Циркулярна економіка як ефективний інструмент скорочення втрат та відходів продовольства в Україні та світі. *Продовольчі ресурси*. 2022. Т. 10, № 19. С. 200–209.

151. Теодорович Л., Кияниця М. Шляхи зменшення харчових відходів на рівні закладів гостинності та споживачів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Економічні науки*. 2022. № 3. С. 252–258.

152. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2022. № 36. Ст. 273. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20> (дата звернення: 12.03.2025).

153. Горішевський П. А., Бірюкова О. В., Рibaкова С. С. Інноваційні підходи до реалізації концепції сталого розвитку в готельно-ресторанному бізнесі: світові практики та стратегічні орієнтири для України. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Серія: «Економічні науки». 2025. Т. 1, № 10(102). С. 11–19.

154. Бойда С. В. Соціальне підприємництво як інструмент післявоєнної відбудови економіки України. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 58. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-25> (дата звернення: 12.03.2025).

155. Кочетов М. С., Бутко В. С. Стале управління відходами пакування зеленого кавового зерна. *Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування* : матеріали Міжнар. наук. конф., 14–15 травня 2025 р. Харків, 2025. С. 218–219.

156. Шестопапов О. В., Цейтлін М. А., Крючкова В. В., Кочетов М. С. Дослідження можливості вторинного використання мішків для транспортування кави в системі циркулярної економіки. *Екологічні науки*. № 5 (62), ч. 2. С. 122–128.

157. Ishak M. I. S., Al Manasir Y., Nor Ashikin N. S. S., Md Yusuff M. S., Zuknik M., Abdul Khalil H. P. S. Application of cellulosic fiber in soil erosion mitigation: Prospect and challenges. *BioResources*. 2021. Vol. 16, No. 2. P. 4474–4522

158. Baheti V., Militky J., Mishra R., Behera B. Wet pulverization of waste jute fibers as reinforcement for biodegradable nanocomposite films. *Journal of Textile Science & Engineering*. 2013. Vol. 3, Issue 2. P. 130. DOI: 10.4172/2165-8064.1000130 (дата звернення: 10.11.2024).

159. Kaiser K., Schmid M., Schlummer M. Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*. 2018. Vol. 3, No. 1. P. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling3010001>.

ДОДАТОК А  
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Статті у наукових фахових видання України*

1. Лебедєв В. В., Мірошніченко Д. В., Тихомирова Т. С., Савченко Д. О., Мазченко М. В., Мисяк В. Р., Кочетов М. С., Соловей Л. В. Дослідження гібридних екологічно безпечних біодеградабельних композитів на основі полілактиду, кавової гущі та гумінових речовин. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 4. С. 46–54.

URL: <https://doi.org/http://doi.org/10.20998/2078-5364.2022.4.05>

(Наказ МОН України №886 від 02.07.2020, Б)

2. Тихомирова Т. С., Шестопапов О. В., Разно М. Р., Кочетов М. С. Дослідження впливу складу компосту на його здатність покращувати якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 72–78.

URL: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.12>

(Наказ МОН №1471 від 26.11.2020, Б)

3. Тихомирова Т. С., Кочетов М. С. Дослідження впливу відходів обсмаження та споживання кави на якість ґрунтів. *Аграрні інновації*. 2025. № 29. С. 155–161.

URL: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.29.25>

(Наказ МОН №1471 від 26.11.2020, Б)

4. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Використання кавової гущі у складі очищаючих засобів як елемент сталого управління відходами. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 3. С. 132–141.

URL: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.3.12>

(Наказ МОН України №886 від 02.07.2020, Б)

5. Шестопапов О.В., Цейтлін М.А, Крючкова В.В., Кочетов М.С. Дослідження можливості вторинного використання мішків для транспортування кави в системі циркулярної економіки. *Екологічні науки*. № 5 (62), ч. 2. С. 122-128.

URL:<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.20>

(Наказ МОН № 409 від 17.03.2020, Б)

6. Кочетов М.С., Черкашина Г.М. Дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 4. С. 125-134.

URL:<https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.4.11>

(Наказ МОН України №886 від 02.07.2020, Б)

#### *Опубліковані праці апробаційного характеру*

7. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Пріоритетні напрямки використання залишків виробництва та споживання кави. *Євроінтеграція екологічної політики України* : матеріали четвертої Всеукр. наук.-практ. конф., м. Одеса, 25 жовтня 2022 р. Одеса : ОДЕУ, 2022. С. 110.

8. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Перспективи використання відходів споживання кави в якості антислизького агенту. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, м. Харків, 14–16 грудня 2022 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 339.

9. Кочетов М. С., Сахнюк Д. М. Використання залишків пакування кави для виготовлення маскувального одягу як елемент сталого розвитку України під час війни. *Екологічна безпека держави* : тези доп. 17-ї Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 20 квітня 2023 р. Київ : НАУ, 2023. С. 12–13.

10. Кочетов М. С. Вплив пересувних кав'ярень на урбоекосистему. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України* : матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., до дня пам'яті Ф. В. Стольберга, Харків, 02–03 листопада 2023 р. Харків, 2023. С. 37–38.

11. Кочетов М. С., Васильєв М. І. Використання залишків споживання кави в сільському господарстві. *Інформаційні технології: наука, техніка,*



*технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. 31-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, м. Харків, 17–20 травня 2023 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. С. 353.

12. Кочетов М. С., Тихомирова Т. С. Дослідження впливу відходів споживання кави на рівень рН ґрунтів. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 16 травня 2024 р. Харків : НУЦЗУ, 2024. С. 306–307.

13. Кочетов М. С., Разно М. Р. Дослідження впливу складу компосту на родючість ґрунтів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. 32-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2024, 22–25 травня 2024 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 362.

14. Кочетов М. С., Косенкова І. Д. Довгостроковий вплив кавової гущі на властивості ґрунтів. *Консолідація заради майбутнього: наукові здобутки вчених задля перемоги та післявоєнної відбудови України* : зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та спеціалістів, 29 серпня 2024 р. Полтава, 2024. С. 14–16.

15. Кочетов М. С. Використання відходів споживання кави для отримання біопалива: перспектив для України. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 18-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 19–22 листопада 2024 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 662–663.

16. Адашевський О. В., Кочетов М. С. Дослідження потенціалу використання харчових відходів в якості компонентів палива. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 14 травня 2025 р. Харків : НУЦЗУ, 2025. С. 338–339.

17. Кочетов М. С., Бутко В. С. Стале управління відходами пакування зеленого кавового зерна. *Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування* : матеріали Міжнар. наук. конф., 14–15 травня 2025 р. Харків, 2025. С. 218–219.

18. Кочетов М. С., Пітак Р. О. Дослідження процесів розвитку плісневих грибів на відходах споживання кави. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. 33-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14–17 травня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 438.
19. Tykhomyrova T., Kochetov M., Pavlenko R. Kariev A., Kopylov S., Vitalii Lavryk V., Masikevych Yu. Environmentally Safety Biodegradable Composites Based On Renewable Biopolymer Materials And Coffee Grounds: Mechanical and Dielectric Properties. 2025 *IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2025. P.1-4.
20. Крючкова В.В., Кочетов М.С. , Тихомирова Т.С., Шестопапов О.В. Мішкловина як відновлюваний ресурс у системі циркулярної економіки: екологічний та технологічний потенціал. *XIX Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»*, 19–21 листопада 2025 року: матеріали конференції. Харків, 2025. С. 678 –679.

## ДОДАТОК Б

# ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС



«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Перший проректор  
з науково-педагогічної роботи  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»  
доктор техн. наук,  
професор Руслан МИГУЩЕНКО  
«13» січня 2023р.

## ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри  
«Хімічна техніка та промислова екологія»  
Кочетова Микити Сергійовича на тему «Розробка та впровадження  
екологічно безпечної технології утилізації відходів виробництва та  
споживання кави»

Матеріали дисертаційної роботи Кочетова М.С., одержані на основі узагальнення результатів, виконаних на базі теоретичних та експериментальних наукових досліджень щодо розробки шляхів екологічно безпечної технології утилізації відходів кави використовуються у навчальному процесі НТУ «ХПІ» при підготовці здобувачів спеціальностей E2 «Екологія» та G2 «Технології захисту навколишнього середовища»:

1. При викладанні навчальної дисципліни «Техніка та технологія захисту ґрунтів та надр» зі спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища» використовуються результати досліджень щодо впливу кавової гущі на родючість ґрунтів.

2. При викладанні навчальних дисциплін «Системи управління відходами» зі спеціальності E2 «Екологія» та «Комплексне управління відходами» для здобувачів спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища» результати досліджень основних чинників утворення відходів в сфері HoReCa та методів поводження з кавовими відходами.

3. При викладанні навчальної дисципліни «Екологічні засади сталого розвитку країни» зі спеціальності E2 «Екологія» результати впровадження сталих практик використання відходів кави в залежності від типів закладів харчування та обсягів накопичення відходів.

Все це дало можливість забезпечити підвищення рівня як теоретичної так і практичної підготовки здобувачів та підвищити науковий рівень випускних робіт здобувачів та курсового проектування.

Директор ННІ МІТ к.т.н., проф.

Віталій ЄПФАНОВ

Зав. кафедри ХТПЕ к.т.н., доц.

Олексій ШЕСТОПАЛОВ

Доц. кафедри ХТПЕ, к.т.н., доц.

Дмитро НЕЧИПОРЕНКО

## ДОДАТОК В

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО  
ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Фізична особа підприємець

Ківа Євгеній Олегович

«10» вересня 2025 р

## АКТ

*Впровадження результатів дисертаційної роботи*

Комісія у складі: від Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: здобувача Кочетов Микита Сергійович; завідувача кафедри хімічної техніки та промислової екології, проф., к.т.н. Шестопалов Олексій Валерійович; доц., к.т.н, доц. кафедри хімічної техніки та промислової екології Тихомирова Тетяна Сергіївна та від фізичної особи-підприємця директора Ківа Євгенія Олеговича.

Підтверджуємо, що за результатами дисертаційної роботи Кочетова Микити Сергійовича на тему «Розробка та впровадження екологічно безпечної технології утилізації відходів виробництва та споживання кави», було розроблено та передано практичні рекомендації щодо поводження з відходам обсмаження кавових зерен. Розроблені рекомендації передбачають можливість використання даних відходів (silver skin) як вторинної сировини для подальшого використання як доданки до полімерних матеріалів а бо у сільському господарстві. Надані рекомендації містять детальний аналіз небезпеки відходів обсмаження кавових зерен у разі їх потрапляння до повітря робочої зони та атмосферного повітря, а також конкретні рекомендації щодо їх збору й зберігання для можливості подальшого використання.

Зазначені матеріали підлягають застосуванню у діяльності ФОП з метою реалізації стратегії сталого розвитку, оптимізації поводження з відходами та дотримання вимог екологічної безпеки

Передача матеріалів та рекомендацій здійснена на безоплатній основі. Цей акт не передбачає виникнення фінансових зобов'язань між сторонами.



Від фізичної особи – підприємця  
Ківа Євгеній

Від НТУ «ХПІ»  
Олексій ШЕСТОПАЛОВ  
Тетяна ТИХОМИРОВА  
Микита КОЧЕТОВ

## ДОДАТОК Г

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО  
ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Фізична особа підприємець

Копилов Денис Валерійович

«28» листопада 2025 р

## АКТ

*Впровадження результатів дисертаційної роботи*

Комісія у складі: від Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: здобувача Кочетов Микита Сергійович; завідувача кафедри хімічної техніки та промислової екології, проф., к.т.н. Шестопапов Олексій Валерійович; доц., к.т.н, доц. кафедри хімічної техніки та промислової екології Тихомирова Тетяна Сергіївна та від фізичної особи–підприємця директора Копилова Дениса Валерійовича.


Підтверджуємо, що за результатами дисертаційної роботи Кочетова Микити Сергійовича на тему «Розробка та впровадження екологічно безпечної технології утилізації відходів виробництва та споживання кави», було розроблено та передано практичні рекомендації щодо поводження з відпрацьованою кавовою гушею, що утворюється в закладах сфери HoReCa. Розроблені рекомендації передбачають можливість використання відходів споживання кави як вторинної сировини для подальшої переробки у складі очищаючих засобів власного виробництва. Надані матеріали можуть бути використані у практичній діяльності фізичної особи – підприємця при впровадженні сталих практик у сфері HoReCa, оптимізації системи поводження з органічними відходами та зменшенні негативного впливу на навколишнє природне середовище, що відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку.

Передача матеріалів та рекомендацій здійснена на безоплатній основі. Цей акт не передбачає виникнення фінансових зобов'язань між сторонами.

Від фізичної особи – підприємця  
Денис КОПИЛОВ



Від НТУ «ХПІ»  
Олексій ШЕСТОПАЛОВ  
Тетяна ТИХОМИРОВА  
Микита КОЧЕТОВ





## ДОДАТОК Д

## РЕЗУЛЬТАТИ МІКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

УКРАЇНА  
УКРАЇНСЬКА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК  
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
"ІНСТИТУТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ І  
КЛІНІЧНОЇ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ"  
№00497087

№ 533 від "23" жовтня 2024 р.  
61023, м. Харків, вул. Пушкінська, 83

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Директор ННЦ «ІЕКВМ»,  
док. вет. наук, професор  
А.П. ПАЛІЙ  
«23» жовтня 2024 р.

## ВИСНОВОК

за результатами досліджень проби відходів, яка надійшла від приватної особи, м. Харків.

У лабораторію токсикології, безпечності та якості с/г продукції ННЦ «ІЕКВМ» 15.10.2024 р. надійшла одна проба сировини у не запечатаному вигляді без акту відбору проб.

ТОКСИКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.Мікологічні дослідження.

Дослідження проби проводили за допомогою адаптованих методів мікологічного аналізу, які включали первинне виділення, шляхом висіву у живильне середовище – агари сусло та Чапека, виділення у чисту культуру, видову ідентифікацію. Ступінь контамінації мікроскопічними грибами визначали за кількістю колонієутворюючих одиниць (КУО) у перерахунку на 1 г корму\*.

Таблиця - Загальна контамінація та видовий склад мікроскопічних грибів, виділених з проби.

№ з/п	Назва кормів	Видовий склад виділених мікроскопічних грибів	Загальна контамінація мікроміцетами	Максимально допустимий рівень для кормів
1	Проба 1 Кавова гуща	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , Дріжджеподібні гриби	23,25×10 <sup>4</sup> спор у 1 грамі корму	5,0×10 <sup>4</sup> КУО, (колонієутворюючих одиниць) в 1 г корму)**

\* Методичні вказівки по санітарно-мікологічній оцінці і поліпшенню якості кормів» Затв. Держдепартаментом ветмедицини АПК України №15-14/73 від 6.03.1998 р.

\*\* Перелік максимально допустимих рівнів небажаних речовин у кормах та кормовій сировині для тварин», № 131, Затв. Мін. Агрополітики та продовольства України 19.03.2012 р.

ВИСНОВОК:

За мікологічними дослідженнями кавової гущі, яка відповідає пробі 1, було встановлено надмірний ступінь контамінації мікроскопічними грибами, причому санітарно значущим видом *Aspergillus niger*.\*

\*Примітка. *A. niger* – збудник опортуністичної інфекції, який зазвичай вражає нижні дихальні шляхи та викликана вдиханням спор ниткоподібного гриба *Aspergillus*, які, як правило, присутні у навколишньому середовищі. Спори проростають і формують

гіфи, які потрапляють у кровоносні судини, при інвазивному захворюванні викликають геморагічний некроз та інфаркт. Симптоматика може нагадувати астму, пневмонію, синусит або швидко прогресуюче системне захворювання. Аспергілі як сапрофіти зустрічаються у зовнішньому середовищі на різних субстратах - в ґрунті, кормах, підстилці, де за сприятливих умов температури і вологи інтенсивно розвиваються. Захворювання аспергільозом зазвичай виникає при наявності будь-яких чинників, які ослаблюють організм тварин - неповноцінна годівля, антисанітарні умови утримання та ін.

**Рекомендації:**

**1. Провести знезараження доступним способом - двократне просушування за температури 180-200 °С тощо.** (Методичні вказівки по санітарно-мікологічній оцінці і поліпшенню якості кормів» (Затв. Держдепартаментом ветмедицини АПК України №15-14/73 від 6.03.1998 р.).

**2. Провести повторні мікологічні дослідження обробленої кави та після отримання негативного результату використовувати без обмежень.**

23 жовтня 2024 року

В.о. зав. лаб., PhD



Коренева Ю.М.

Пров. наук. співр., канд. вет. наук



Ярошенко М.О.