

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-56>

УДК 677.014:502.174.1:330.3

ІЩУК ТЕТЯНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0009-8679-9020>

e-mail: ishchuk.tetiana@khmnu.edu.ua

ІВАНІШЕНА ТЕТЯНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3206-9307>

e-mail: ivanishenat@khmnu.edu.ua

ПРИНЦИПИ «ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ» ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ У ВИРОБНИЦТВІ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ

У роботі здійснено комплексний аналіз можливостей інтеграції принципів «зеленої хімії» у виробництво та переробку текстильних матеріалів у контексті трансформації текстильної промисловості до моделей сталого розвитку та циркулярної економіки. Визначено основні екологічні виклики галузі, зокрема високу ресурсоемність технологічних процесів, значне водоспоживання, використання токсичних реагентів, утворення небезпечних відходів і накопичення текстильних відходів у межах лінійної моделі виробництва. Обґрунтовано необхідність переходу до замкнутих виробничих циклів із залученням вторинної сировини як стратегічного напрямку зниження антропогенного навантаження на довкілля. Узагальнено сучасні підходи до механічної, хімічної та ензимної переробки текстильних матеріалів, охарактеризовано їх екологічні, технологічні та енергетичні особливості. Показано, що механічна переробка є найбільш енергоефективною, однак супроводжується погіршенням фізико-механічних властивостей волокон. Хімічні методи забезпечують отримання регенованих матеріалів високої якості, але потребують оптимізації щодо енерговитрат і безпечності реагентів. Ензимні та біокаталітичні технології вирізняються високою селективністю, низькотемпературними умовами проведення процесів та мінімальним утворенням побічних продуктів.

Доведено, що застосування біорозкладних поверхнево-активних речовин, природних органічних кислот, каталізаторів, ферментів і систем моніторингу в режимі реального часу сприяє зниженню енерговитрат, водоспоживання, токсичності стічних вод і викидів парникових газів. На основі результатів оцінки життєвого циклу підтверджено екологічну та ресурсну доцільність використання вторинної сировини у виробництві текстильних виробів масового споживання. Визначено перспективність впровадження гібридних технологічних схем переробки та масштабування біотехнологічних рішень як стратегічних напрямів сталого розвитку текстильної галузі.

Ключові слова: зелена хімія, текстильні матеріали, вторинна сировина, рециклінг, сталий розвиток, циркулярна економіка.

ISHCHUK TETIANA, IVANISHENA TETIANA

Khmelnitskyi National University

PRINCIPLES OF "GREEN CHEMISTRY" AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE PRODUCTION OF TEXTILE MATERIALS FROM RECYCLED RAW MATERIALS

The paper provides a comprehensive analysis of the possibilities of integrating the principles of "green chemistry" into the production and processing of textile materials in the context of the transformation of the textile industry to sustainable development models and a circular economy. The main environmental challenges of the industry are identified, in particular, the high resource intensity of technological processes, significant water consumption, the use of toxic reagents, the formation of hazardous emissions and the accumulation of textile waste within the linear production model. The need to transition to closed production cycles with the involvement of secondary raw materials as a strategic direction for reducing anthropogenic environmental burden is substantiated. Modern approaches to mechanical, chemical and enzymatic processing of textile materials are summarized, their environmental, technological and energy features are characterized. It is shown that mechanical processing is the most energy-efficient, but is accompanied by a deterioration in the physical and mechanical properties of fibers. Chemical methods provide high-quality regenerated materials, but require optimization in terms of energy consumption and reagent safety. Enzyme and biocatalytic technologies are characterized by high selectivity, low-temperature process conditions and minimal formation of by-products.

It has been proven that the use of biodegradable surfactants, natural organic acids, catalysts, enzymes and real-time monitoring systems contributes to the reduction of energy consumption, water consumption, wastewater toxicity and greenhouse gas emissions. Based on the results of life cycle assessment, the environmental and resource feasibility of using secondary raw materials in the production of mass-consumption textile products has been confirmed. The prospects of implementing hybrid processing technological schemes and scaling up biotechnological solutions as strategic directions for sustainable development of the textile industry have been determined.

Keywords: green chemistry, textile materials, secondary raw materials, recycling, sustainable development, circular economy.

Стаття надійшла до редакції / Received 08.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 26.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Іщук Тетяна, Іванішена Тетяна

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасна текстильна промисловість характеризується високою ресурсо- та енергоемністю виробничих процесів, що зумовлює значний антропогенний вплив на навколишнє середовище. Технологічні стадії отримання, оброблення та оздоблення текстильних матеріалів супроводжуються інтенсивним споживанням води, енергії та хімічних реагентів, а також утворенням значних обсягів емісій забруднюючих речовин, у тому числі небезпечних. Особливої актуальності набуває проблема утилізації та переробки текстильних відходів, які в умовах лінійної моделі виробництва переважно накопичуються на сміттєзвалищі.

Використання вторинної сировини розглядається як альтернативного джерела ресурсів сприяє підвищенню екологічної і економічної ефективності текстильного виробництва [1]. Проте традиційні методи переробки текстильних відходів часто базуються на застосуванні енергоемних процесів і токсичних хімічних

сполук, що протирічить сучасним вимогам сталого розвитку. У цьому контексті інтеграція принципів «зеленої хімії» у технології виробництва текстильних матеріалів зі вторинної сировини є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на мінімізацію екологічних ризиків, оптимізацію матеріальних потоків та формування екологічно безпечних і ресурсоефективних технологічних систем.

Аналіз досліджень та публікацій

У сучасних наукових дослідженнях простежується стійка тенденція до інтеграції принципів «зеленої хімії» у виробництво текстильних матеріалів, що напряму пов'язано з використанням вторинної сировини. Raj і Chowdhury [2] підкреслюють важливість застосування нетоксичних реагентів та екологічно безпечних методів оздоблення, що знижує сумарне хімічне навантаження на виробництво. Подібний підхід представлено й у роботі Das та ін. [3], де розглянуто сучасні маловідходні технології, орієнтовані на підвищення циклічності ресурсів. Значну увагу у літературі приділено ферментативній обробці целюлозних матеріалів: Stanescu [4] і Eid та Ibrahim [5] демонструють потенціал ензимів для зменшення енерговитрат та підвищення екологічної безпечності обробки. У ширшому контексті циркулярної економіки Maity та ін. [6] і Ghosh та ін. [7] аналізують можливості хімічної валоризації текстильних відходів, підкреслюючи значення інноваційних технологій для формування сталих виробничих моделей у текстильній галузі.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз практичних можливостей застосування принципів «зеленої хімії» і концепції сталого розвитку при виробництві текстильних матеріалів із вторинної сировини.

Виклад основного матеріалу

Текстильна промисловість у XXI столітті стикається з одними з наймасштабніших екологічних викликів серед усіх виробничих секторів. Швидке зростання мас-маркету, поява феномену «fast fashion» та збільшення попиту на дешевий одяг спричинили різке зростання обсягів текстильних відходів, значна частина яких опиняється на полігонах або у спалювальних системах [2]. Лише невеликий відсоток текстильної продукції підлягає реальному рециклінгу, тоді як решта втрачається в ланцюгах споживання. Проблематика текстильних відходів також посилюється широким застосуванням синтетичних і змішаних волокон, що ускладнює переробку через різну хімічну природу матеріалів. Виробництво первинних волокон супроводжується значними витратами води, енергії, застосуванням токсичних хімікатів і генерацією забруднень, що актуалізує необхідність переходу до сталих підходів у виробництві та переробці текстильних матеріалів [2]. У контексті цього основними орієнтирами виробництва стають принципи «зеленої хімії».

Застосування принципів «зеленої хімії» у текстильній промисловості створює можливість перетворення текстильних відходів на нові волокна та матеріали з мінімальним використанням токсичних реагентів, енергії й води, що формує основу циркулярних виробничих моделей. У межах цього підходу хімічні процеси розглядаються не як джерело утворення потенційно небезпечних сполук, а як інструмент забезпечення максимально чистого, енергоефективного та безпечного виробництва. Основні принципи зеленої хімії — запобігання утворенню відходів, максимальна економія атомів, застосування безпечних розчинників, створення безпечніших хімічних речовин та продуктів, розробка продуктів здатних до розкладання, підвищення енергоефективності, використання каталізу, аналіз в режимі реального часу [2], [3], [4], [5].



Рис. 1. Принципи «Зеленої хімії» у виробництві та переробці текстильних матеріалів

Впровадження принципів «зеленої хімії» у виробництво текстильних матеріалів зі вторинної сировини також сприяє і досягнення Цілей сталого розвитку ООН. Застосування екологічно безпечних технологічних рішень дозволяє зменшити утворення відходів, підвищити ресурсо- та енергоефективність виробництва, а також мінімізувати негативний вплив на довкілля і здоров'я людини. Взаємозв'язок окремих принципів «зеленої хімії» з відповідними Цілями сталого розвитку (ЦСР) у текстильній промисловості представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Зв'язок принципів «зеленої хімії» з Цілями сталого розвитку ООН у виробництві текстильних матеріалів зі вторинної сировини

Принцип «зеленої хімії»	Сутність принципу	Реалізація у текстильному виробництві зі вторинної сировини	Відповідні ЦСР
Запобігання утворенню відходів	Мінімізація утворення відходів на всіх стадіях виробництва	Використання відходів текстилю та полімерів як вторинної сировини, замкнуті водооборотні системи	ЦСР 12 «Відповідальне споживання і виробництво», ЦСР 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура»
Максимальна економія атомів	Максимальне включення реагентів у кінцевий продукт	Технології перероблення полімерних волокон без утворення побічних продуктів	ЦСР 12, ЦСР 8 «Гідна праця та економічне зростання»
Застосування безпечних розчинників	Заміна токсичних розчинників на екологічно безпечні	Використання води, іонних рідин у якості розчинників у процесах фарбування та обробки текстилю	ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія», ЦСР 3 «Міцне здоров'я і благополуччя»
Створення безпечних хімічних речовин і продуктів	Зменшення токсичності готової продукції	Розробка нетоксичних барвників і апретів для вторинних волокон	ЦСР 3, ЦСР 12
Підвищення енергоефективності	Зменшення енергоспоживання виробничих процесів	Використання низькотемпературних технологій переробки, фарбування, сушіння текстильних матеріалів,	ЦСР 7 «Доступна та чиста енергія», ЦСР 13 «Боротьба зі зміною клімату»
Використання каталізу	Підвищення селективності та зниження витрат ресурсів	Каталітичні процеси обробки, фарбування, апретування, модифікації волокон, синтез текстильних допоміжних матеріалів	ЦСР 9, ЦСР 12
Розробка продуктів, здатних до розкладання	Можливість біодеградації матеріалів після завершення їх життєвого циклу	Створення текстильних матеріалів, що легко переробляються або біологічно розкладаються	ЦСР 12, ЦСР 14 «Збереження морських екосистем»
Аналіз у режимі реального часу	Контроль процесів для запобігання утворенню забруднень	Автоматизований моніторинг якості води, викидів та параметрів технологічних процесів	ЦСР 9, ЦСР 12, ЦСР 6

Вторинна сировина для виробництва текстильних матеріалів формується переважно з постспоживчих та поствиробничих відходів, зокрема зношеного одягу, обрізків тканин і технологічних залишків пряжі або матеріалів. За складом така сировина є неоднорідною та містить як натуральні (бавовна, віскоза), так і синтетичні волокна (поліестер, поліамід), а також залишки барвників, апретів і функціональних добавок, що свідчить про необхідність застосування селективних методів механічної, хімічної або біокаталітичної переробки відповідно до принципів зеленої хімії. У виробництві матеріалів із вторинної сировини ці принципи проявляються передусім у заміні традиційних хімічних реагентів на екологічні альтернативи. Наприклад, у процесах очищення та підготовки текстильних відходів дедалі ширше застосовують біорозкладні поверхнево-активні речовини (ПАР) природного походження, концентрації яких зазвичай становлять 1–3%, що відповідає ефективності традиційних промислових

ПАР, але при цьому знижується токсичність стічних вод на 40–60% порівняно [4]. Такі реагенти не накопичуються у навколишньому середовищі та швидко розкладаються, що повністю узгоджується з концепцією екологічно безпечних циклів виробництва. Додатково природні органічні кислоти, такі як лимонна або оцтова, можуть замінити сильні мінеральні кислоти у процесах нейтралізації або знебарвлення, що дозволяє зменшити корозію обладнання і мінімізувати утворення шкідливих солей. Іншим напрямом реалізації принципів зеленої хімії є оптимізація енерговитрат. Механічні методи перероблення текстилю — подрібнення, розпушування та повторне прядіння волокон — характеризуються відносно низьким енергоспоживанням. У середньому механічне розпушування потребує 0,3–0,6 кВт·год енергії на 1 кг матеріалу, тоді як виробництво первинного поліестеру може вимагати до 5–6 кВт·год/кг енергії. Звідси слідує, що використання механічних методів дає змогу у 8–12 разів зменшити енергетичне навантаження на виробничий цикл, що є однією з ключових вимог зеленої хімії [2], [5]. Поряд із тим механічні методи дають змогу мінімізувати застосування води та токсичних реагентів, однак мають і певні недоліки — скорочення довжини волокон і зниження їхньої міцності, що обумовлює необхідність часткового введення первинних волокон у готову пряжу [7], [8], [9].

Варто підкреслити, що одним із напрямів зеленої хімії є зниження токсичності процесів фарбування та оздоблення текстильних волокон та матеріалів. Традиційні барвники й апретувальні речовини часто містять важкі метали, формальдегід або ароматичні аміни. Концепція зеленої хімії сприяє заміні таких систем натуральними поліфенольними барвниками, хітозаном, альгінатами чи іншими біополімерами. Ці матеріали не тільки зменшують загальну токсичність процесу на 30–70%, але й можуть надавати додаткові функції матеріалам, а саме, забезпечувати антибактеріальні властивості, захист від ультрафіолету або високу гігроскопічність, що дозволяє скоротити кількість допоміжних реагентів [4], [6]. До того ж застосування таких біополімерів сприяє зменшенню обсягів стічних вод і підвищує біорозкладність готової продукції, що особливо важливо в контексті підтримки циркулярних циклів у текстильній промисловості.

Наступним кроком у розвитку зелених технологій є застосування каталізаторів та ферментів у хімічній деполімеризації полімерів, передусім поліетилентерефталату. Ензимні процеси працюють у температурному діапазоні 35–70 °С, що суттєво нижче від температур традиційного гідролізу — 200–250 °С. Це знижує енергоспоживання у 5–10 разів і забезпечує високий рівень селективності — понад 90% виходу цільових мономерів [10], [11], [12], [13]. Ферментативні методи майже не утворюють токсичних побічних продуктів, а реакційне середовище можна використовувати повторно.

Важливою складовою зеленої хімії є контроль хімічних процесів у режимі реального часу. У текстильній індустрії дедалі частіше впроваджуються спектрофотометричні, хроматографічні та інфрачервоні датчики, які дають змогу точно відстежувати хімічні параметри реакції та коригувати процеси без зайвого перевитрачання реагентів. Цей підхід дозволяє зменшити їхнє надмірне використання на 15–25%, оптимізувати тривалість виробничих циклів та знизити кількість небажаних домішок у кінцевому продукті. Принцип реального часу моніторингу також істотно скорочує навантаження на очисні споруди, адже зменшує концентрацію хімічно активних компонентів у стічних водах та мінімізує ризики аварійних викидів у процесі виробництва.

Впровадження принципів зеленої хімії в текстильній промисловості дозволяє кардинально змінити підходи до виробництва й перероблення матеріалів, зміщуючи акцент з лінійної моделі «виробництво — споживання — утилізація» до циркулярної, орієнтованої на збереження цінності матеріалу, довгий життєвий цикл та вторинну сировину [10], [11], [12], [13]. Для практичної реалізації циркулярної моделі в текстильній промисловості необхідним є впровадження ефективних технологій перероблення текстильних матеріалів, здатних забезпечити збереження матеріальних ресурсів, зменшення хімічного навантаження на довкілля та повторне залучення волокон у виробничий цикл. Саме вибір і поєднання методів переробки визначають ступінь відповідності текстильного виробництва принципам зеленої хімії та сталому розвитку.

До основних способів переробки текстильних матеріалів відносять механічне, хімічне, а також ензимні та біотехнологічні методи перероблення. Взаємозв'язок між основними методами переробки текстильних матеріалів та принципами зеленої хімії узагальнено на рис. 2.

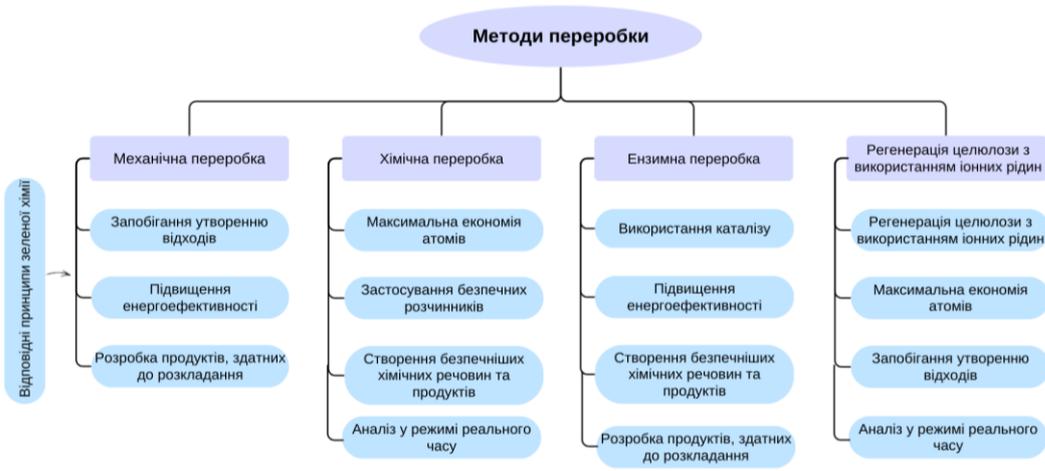


Рис. 2. Відповідність основних методів переробки текстильних матеріалів принципам зеленої хімії

Механічна переробка текстилю передбачає подрібнення, розпушування, очистку та повторне прядіння волокон. Цей метод — один із найбільш екологічно дружніх методів, оскільки він не потребує значного використання хімікатів і води [3], [6]. Енергоспоживання також є нижчим порівняно з хімічним рециклінгом. Однак метод має низку важливих обмежень: деградація довжини волокон, зниження міцності й потреба у змішуванні з первинними волокнами для отримання якісної продукції [7], [8]. Складно піддаються механічному переробленню змішані тканини, зокрема поліестер/бавовна. Останні дослідження демонструють, що удосконалення обладнання — гнучкі шредери, спеціальні барабани та алгоритми сортування — можуть значно підвищити ефективність процесу [8]. Водночас механічний рециклінг розглядається як складова гібридних моделей переробки, що поєднують механічні та хімічні методи.

Хімічний рециклінг забезпечує можливість отримання високоякісних мономерів і регенованих волокон, які за властивостями можуть відповідати або навіть перевищувати первинні аналоги [3], [5]. Цей метод особливо важливий для переробки синтетичних і змішаних тканин, недоступних для механічної обробки. До основних методів хімічного рециклінгу відносяться: сольволиз (гліколиз, метаноліз, гідроліз); кислотно-лужна деполімеризація; використання іонних рідин та глибоких евтектичних розчинників [14], [15]; хімічне фракціонування композиційних волокон. Перевагою цих процесів є можливість селективного розкладання компонентів у змішаних тканинах. Наприклад, глибокі евтектичні розчинники дають змогу відокремлювати поліестер від бавовни, зберігаючи при цьому якість обох фракцій [14], [15]. До недоліків слід віднести: висока вартість обладнання, енергозатратність, складність очищення розчинів і потреба у масштабуванні до промислових обсягів.

Ще одним з дієвих способів переробки є ензимні та біотехнологічні методи перероблення. Біотехнологічні методи, зокрема ферментативна деполімеризація забезпечують високу селективність, працюють за низьких температур і тисків, не потребують токсичних реагентів та дозволяють отримувати мономери високої чистоти [10], [11], [12], [13]. Найбільших успіхів досягнуто у переробці поліетилентерефталату: сучасні ферменти можуть забезпечувати відновлення понад 99% чистої терефталевої кислоти. Дедалі активніше розробляються ферменти для поліамідів та еластанів, однак їхня активність і стабільність залишаються предметом досліджень.

Для порівняння енерговитрат технологій отримання волокна доцільно враховувати тип сировини — первинну та вторинну. У випадку первинної сировини йдеться про виробництво волокна з природних або синтетичних полімерів, що використовуються вперше. Вторинна сировина — це текстильні відходи або використані матеріали, які повторно вводяться у виробничий цикл (рециклінг). Завдяки відсутності етапів видобутку та первинного синтезу волокон обробка вторинної сировини, як правило, потребує менших енерговитрат. Порівняльні значення енергоспоживання наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Енергоспоживання при отриманні 1 кг волокна залежно від типу сировини

Технологія отримання волокна	Первинна сировина (кВт·год/кг)	Вторинна сировина (кВт·год/кг)	Особливості
Механічна	0,3 – 0,6	0,2 – 0,4	Вторинна сировина економить енергію за рахунок відсутності етапів первинного синтезу
Хімічна	5 – 6	3 – 4	Вторинна сировина потребує менше хімічних реагентів та енергії
Ензимна (біокаталітична)	0,5 – 1	0,3 – 0,6	Низькотемпературні процеси ефективні для вторинної сировини
Регенерація целюлози з використанням іонних рідин	2 – 3	1 – 1,5	Енергоефективна заміна хімічних розчинників, замкнуті цикли, мінімальні втрати сировини

Як приклад реалізації принципів зеленої хімії та циркулярної економіки в Україні можна навести компанію Re:inventex, яка розвиває сучасну інфраструктуру з переробки текстильних відходів, включно з механічним рециклінгом та виробництвом відновлених волокон з різних типів відходів текстильних матеріалів. Діяльність цього проєкту спрямована на зменшення екологічного навантаження шляхом перетворення відходів на вторинну сировину з мінімальними втратами ресурсів і енергії, що відповідає принципам зеленої хімії та цілям сталого розвитку [16].

Для об'єктивного порівняння екологічних переваг первинної та вторинної сировини застосовується оцінка життєвого циклу (LCA), який охоплює енерговитрати, водоспоживання та потенційні екологічні впливи

на всіх етапах - від видобутку до утилізації. Оцінка життєвого циклу використовується як кількісний інструмент верифікації екологічного профілю матеріалів, що дозволяє інтегрально оцінити ефективність застосування принципів зеленої хімії та розглянутих методів переробки текстильних матеріалів. Узагальнені результати LCA-досліджень для виробництва однієї футболки з різної сировини наведено в таблиці 3 [17].

Таблиця 3

Порівняння показників LCA для виробництва 1 футболки з первинної та вторинної сировини

Показник впливу	Первинна сировина	Вторинна сировина	Результат
Енерговитрати, МДж/шт	25–30	8–12	↓ 50–65 %
Викиди CO ₂ -екв., кг	5–7	1,5–2,5	↓ ~60 %
Водоспоживання, л	2000–2700	300–500	↓ ~80 %
Евтрофікація	Висока	Низька	↓ істотно
Екотоксичність	Висока	Помірна	↓ істотно

Результати демонструють істотне зниження сукупного екологічного навантаження при використанні вторинної сировини порівняно з первинною. Зокрема, енерговитрати скорочуються на 50–65 %, викиди парникових газів (CO₂-екв.) — приблизно на 60 %, а водоспоживання — до 80 %, що безпосередньо відображає реалізацію таких принципів зеленої хімії, як запобігання утворенню відходів, підвищення енергоефективності та безпечний дизайн продуктів. Таким чином, результати оцінки життєвого циклу підтверджують, що використання вторинної сировини при виробництві текстильних виробів масового споживання, є науково обґрунтованим шляхом розвитку циркулярних моделей у текстильній промисловості та практичної реалізації принципів зеленої хімії.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

У результаті дослідження встановлено, що інтеграція принципів «зеленої хімії» у виробництво текстильних матеріалів зі вторинної сировини забезпечує суттєве зниження екологічного навантаження: енерговитрати скорочуються на 50–65 %, водоспоживання — до 80 %, а викиди CO₂-екв. — приблизно на 60 % порівняно з використанням первинних волокон. Показано, що механічна переробка є найбільш енергоефективною (0,2–0,4 кВт·год/кг), однак потребує поєднання з іншими методами через погіршення властивостей волокон. Хімічні та ензимні методи дозволяють отримувати високоякісні регеновані матеріали, при цьому біокаталітичні процеси забезпечують селективність понад 90–99 % і знижують енергоспоживання у 5–10 разів. Застосування біорозкладних реагентів та автоматизованого моніторингу процесів зменшує токсичність стічних вод на 40–70 %, а витрати реагентів на 15–25 %. Перспективи подальших досліджень пов'язані з масштабуванням ензимних технологій, розробкою гібридних схем переробки та впровадженням замкнених циркулярних моделей у текстильній промисловості.

Література

1. Ішук Т., Іванішена Т. Напрямки використання вторинної сировини у легкій промисловості. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2025. Т. 349, № 2. С. 166–170. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-24.
2. Raj A., Chowdhury A., Ali S. W. Green chemistry: its opportunities and challenges in colouration and chemical finishing of textiles. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2022. Vol. 27. P. 100689. DOI: 10.1016/j.scp.2022.100689.
3. Das P. P., Muduli M., Borah S., Chaudhary V. Green chemistry for sustainable textiles: modern design and approaches. Green chemistry for sustainable textiles: modern design and approaches. 2021. P. 121–136. DOI: 10.1016/B978-0-323-85204-3.00031-2.
4. Stanescu M. D. Applications of enzymes in processing cellulosic textiles: a review of the latest developments. Cellulose Chemistry and Technology. 2023. Vol. 57, № 1–2. P. 1–15. DOI: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.01.
5. Eid B. M., Ibrahim N. A. Recent developments in sustainable finishing of cellulosic textiles employing biotechnology. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124701. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124701.
6. Maity S., Pandit P., Singha K., Kar S. Progress in innovative green chemistry and circular economy in textiles. Textile dyes and pigments: a green chemistry approach. 2022. P. 443–455. DOI: 10.1002/9781119905332.ch23.

7. Ghosh J., Repon M. R., Rupanty N. S., Asif T. R., Tamjid M. I., Reukov V. Chemical valorization of textile waste: advancing sustainable recycling for a circular economy. *ACS Omega*. 2025. Vol. 10, № 12. P. 11697–11722. DOI: 10.1021/acsomega.4c10616.
8. Coscieme L., Manshoven S., Gillabel J., Grossi F., Mortensen L. F. A framework of circular business models for fashion and textiles: the role of business-model, technical, and social innovation. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*. 2022. Vol. 18, № 1. P. 451–462. DOI: 10.1080/15487733.2022.2083792.
9. Єфремова О., Іванішена Т., Іщук Т., Трухіна О., Єфремова Ю. Сучасний стан поводження з полімерними відходами. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2022. Т. 311, № 4. С. 26–31. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-311-4-26-31.
10. Menezes E., Singh N., Athalye A. Application of enzymes for sustainable textile chemical processing. *Sustainable textile chemical processing*. 2024. P. 14–40. DOI: 10.1016/B978-104000344-2.00001-0.
11. Almulaiky Y. Q., Altalhi T., El-Shishtawy R. M. Enhanced catalytic performance of *Candida rugosa* lipase through immobilization on zirconium-2-methylimidazole: a novel biocatalyst approach. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 279. P. 135211. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135211.
12. El-Sayed H., El-Fiky A. F., Mowafi S. Extremozymes as future appropriate benign elements for eco-friendly wet processing of wool and silk. *Journal of Natural Fibers*. 2022. Vol. 19, № 16. P. 15035–15044. DOI: 10.1080/15440478.2022.2069634.
13. Jang Y.-C., Park R., Cho H., Kang H., Jeong J.-H., Song H., Lee C., Lee H. Comparative analysis of textile circular economy by material flow. *Journal of Korea Society of Waste Management*. 2024. Vol. 41, № 3. P. 297–309. DOI: 10.9786/kswm.2024.41.3.297.
14. Sanjrani M. A., Gang X., Mirza S. N. A. A review on textile solid waste management: disposal and recycling. *Waste Management and Research*. 2025. Vol. 43, № 4. P. 522–539. DOI: 10.1177/0734242X241257093.
15. Singh A., Sahay S. S., Sharma P. Overview of textile waste. *Nanotechnology-assisted recycling of textile waste: sustainable tools for textiles*. 2025. P. 3–27. DOI: 10.1002/9781394175017.ch1.
16. Re:inventex. Комплексна переробка текстильних відходів – екологічний вибір, що працює на ваш бізнес [Електронний ресурс]. URL: <https://www.reinventex.com.ua> (дата звернення: 04.02.2026).
17. Tænketaanken Tekstilrevolutionen. Life cycle assessment of 5 T-shirts produced by ID® Identity (T-shirts 0300, 0370, 0510, 0552, 0552b) [Електронний ресурс]. København, 2023. URL: https://id.dk/Files/Images/identity/Files/ID_Life-Cycle-Assessment-of-5-T-shirts_Report.pdf (дата звернення: 05.02.2026).

References

1. Ishchuk T., Ivanishena T. Napriamky vykorystannia vtorynnoi syrovyny u lehkii promyslovosti. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Т. 349, № 2. С. 166–170. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-24.
2. Raj A., Chowdhury A., Ali S. W. Green chemistry: its opportunities and challenges in colouration and chemical finishing of textiles. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2022. Vol. 27. P. 100689. DOI: 10.1016/j.scp.2022.100689.
3. Das P. P., Muduli M., Borah S., Chaudhary V. Green chemistry for sustainable textiles: modern design and approaches. *Green chemistry for sustainable textiles: modern design and approaches*. 2021. P. 121–136. DOI: 10.1016/B978-0-323-85204-3.00031-2.
4. Stanescu M. D. Applications of enzymes in processing cellulosic textiles: a review of the latest developments. *Cellulose Chemistry and Technology*. 2023. Vol. 57, № 1–2. P. 1–15. DOI: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.01.
5. Eid B. M., Ibrahim N. A. Recent developments in sustainable finishing of cellulosic textiles employing biotechnology. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 284. P. 124701. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124701.
6. Maity S., Pandit P., Singha K., Kar S. Progress in innovative green chemistry and circular economy in textiles. *Textile dyes and pigments: a green chemistry approach*. 2022. P. 443–455. DOI: 10.1002/9781119905332.ch23.
7. Ghosh J., Repon M. R., Rupanty N. S., Asif T. R., Tamjid M. I., Reukov V. Chemical valorization of textile waste: advancing sustainable recycling for a circular economy. *ACS Omega*. 2025. Vol. 10, № 12. P. 11697–11722. DOI: 10.1021/acsomega.4c10616.
8. Coscieme L., Manshoven S., Gillabel J., Grossi F., Mortensen L. F. A framework of circular business models for fashion and textiles: the role of business-model, technical, and social innovation. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*. 2022. Vol. 18, № 1. P. 451–462. DOI: 10.1080/15487733.2022.2083792.
9. Yefremova O., Ivanishena T., Ishchuk T., Trukhina O., Yefremova Yu. Suchasnyi stan povodzhennia z polimernymi vidkhodamy. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2022. Т. 311, № 4. С. 26–31. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-311-4-26-31.
10. Menezes E., Singh N., Athalye A. Application of enzymes for sustainable textile chemical processing. *Sustainable textile chemical processing*. 2024. P. 14–40. DOI: 10.1016/B978-104000344-2.00001-0.
11. Almulaiky Y. Q., Altalhi T., El-Shishtawy R. M. Enhanced catalytic performance of *Candida rugosa* lipase through immobilization on zirconium-2-methylimidazole: a novel biocatalyst approach. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 279. P. 135211. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135211.
12. El-Sayed H., El-Fiky A. F., Mowafi S. Extremozymes as future appropriate benign elements for eco-friendly wet processing of wool and silk. *Journal of Natural Fibers*. 2022. Vol. 19, № 16. P. 15035–15044. DOI: 10.1080/15440478.2022.2069634.
13. Jang Y.-C., Park R., Cho H., Kang H., Jeong J.-H., Song H., Lee C., Lee H. Comparative analysis of textile circular economy by material flow. *Journal of Korea Society of Waste Management*. 2024. Vol. 41, № 3. P. 297–309. DOI: 10.9786/kswm.2024.41.3.297.
14. Sanjrani M. A., Gang X., Mirza S. N. A. A review on textile solid waste management: disposal and recycling. *Waste Management and Research*. 2025. Vol. 43, № 4. P. 522–539. DOI: 10.1177/0734242X241257093.
15. Singh A., Sahay S. S., Sharma P. Overview of textile waste. *Nanotechnology-assisted recycling of textile waste: sustainable tools for textiles*. 2025. P. 3–27. DOI: 10.1002/9781394175017.ch1.
16. Re:inventex. Комплексна переробка текстильних відходів – екологічний вибір, що працює на ваш бізнес [Електронний ресурс]. URL: <https://www.reinventex.com.ua> (date of access: 04.02.2026).
17. Tænketaanken Tekstilrevolutionen. Life cycle assessment of 5 T-shirts produced by ID® Identity (T-shirts 0300, 0370, 0510, 0552, 0552b) [Електронний ресурс]. København, 2023. URL: https://id.dk/Files/Images/identity/Files/ID_Life-Cycle-Assessment-of-5-T-shirts_Report.pdf (date of access: 05.02.2026).