

БАШЛАЙ СЕРГІЙ

Сумський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2247-5440>serhii.bashlai@snau.edu.ua

РЕЗНІЧЕНКО ВІТА

Центральноукраїнський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5693-0942>vita.micenko16@gmail.com

«ЗЕЛЕНА ХІМІЯ» ТА ІННОВАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ: ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНІ ПРОДУКТИ

Стаття розглядає роль «зеленої хімії» у сталому розвитку, особливо у сфері сільського господарства, в контексті глобальної конкуренції та обмеження ресурсів. Мета дослідження – аналіз впливу «зеленої хімії» та використання інноваційних матеріалів на розвиток екологічно безпечних продуктів у сільському господарстві. Автори аналізують, як стійкість і сталий розвиток перетворюються на важливі вимоги для сучасного господарювання, зосереджуючись на балансі між охороною навколишнього середовища та безпечним виробництвом продуктів. Було визначено процеси інтеграції концепцій «зеленої хімії» у розробку екологічно безпечних продуктів, що відбуваються на рівні молекулярного дизайну та використання безпечних хімічних процесів. Досліджено впровадження інноваційних матеріалів, які сприяють створенню продуктів і процесів з мінімальним впливом на довкілля, зокрема за допомогою нетоксичних і відновлюваних ресурсів. Обґрунтовано заходи з розробки нових зелених каталізаторів та методів, які забезпечують ефективність атомів і використання безпечних розчинників. Сформовано практичне застосування принципів «зеленої хімії» в агрохімічній галузі, що сприяє зменшенню використання шкідливих хімічних речовин і пестицидів. Підкреслено значення «зеленої хімії» в сільському господарстві, зокрема в контексті виробництва харчових продуктів з низькими витратами та нульовими відходами. Надана оцінка впливу неправильного використання пестицидів на забруднення агрохімічних полів та впровадження альтернативних підходів, зокрема органічного землеробства. Визначені аспекти, що відображають комплексний підхід до вирішення проблем екологічної безпеки та сталого розвитку за допомогою «зеленої хімії», що є новаторським у контексті сучасного сільського господарства. Дослідження зосереджене на визначенні способів, якими «зелена хімія» може сприяти створенню продуктів, які мінімізують шкоду для довкілля та здоров'я людини.

Ключові слова: «зелена хімія», «зелений» синтез, екологічна сільськогосподарська діяльність, токсичні речовини, екологічно безпечні продукти, безпестицидна технологія.

BASHLAI SERHII

Sumy National Agrarian University

REZNICHENKO VITA

Central Ukrainian National Technical University

"GREEN CHEMISTRY" AND INNOVATIVE MATERIALS: ENVIRONMENTALLY SAFE PRODUCTS

The article examines the role of "green chemistry" in sustainable development, especially in the field of agriculture, in the context of global competition and resource limitations. The purpose of the research is to analyze the impact of "green chemistry" and the use of innovative materials on the development of safe and environmentally friendly products in agriculture. The authors analyze how sustainability and sustainable development are becoming important requirements for modern business, focusing on the balance between environmental protection and safe production of products. The processes of integrating the concepts of "green chemistry" into the development of safe and environmentally friendly products, which occurs at the level of molecular design and the use of safe chemical processes, were defined. The introduction of innovative materials that contribute to the creation of products and processes with a minimal impact on the environment, in particular with the help of non-toxic and renewable resources, has been studied. Measures for the development of new green catalysts and methods that ensure the efficiency of atoms and the use of safe solvents are substantiated. The practical application of the principles of "green chemistry" in the agrochemical industry has been formed, which contributes to the reduction of the use of harmful chemicals and pesticides. The importance of "green chemistry" in agriculture is emphasized, particularly in the context of low-cost, zero-waste food production. An analysis of the impact of modern farming methods on the emission of greenhouse gases and the development of strategies to reduce this impact with the help of "green chemistry" was carried out. An assessment of the impact of improper use of pesticides on the contamination of agrochemical fields and the implementation of alternative approaches, in particular organic farming, is provided. Identified aspects reflecting a comprehensive approach to solving the problems of environmental safety and sustainable development with the help of "green" chemistry, which is innovative in the context of modern agriculture. The research is focused on identifying ways in which "green chemistry" can contribute to the creation of products that minimize harm to the environment and human health.

Keywords: "green" chemistry, "green" synthesis, ecological agricultural activity, toxic substances, ecologically safe products, pesticide-free technology.

Постановка проблеми

Стійкість і сталий розвиток називають наступною промисловою революцією – вимогою для ведення господарства в умовах глобальної конкуренції та браку ресурсів. Сталий розвиток вимагає збалансування навколишнього середовища та виробництва екологічно безпечних продуктів в сфері сільського господарства. Агропромислові виробники більше не можуть дотримуватися екологічних норм, вважаючи, що вони будуть економічно безпечними [1]. Вони повинні розробити стійкий погляд на бізнес-бачення та

поведінку, які охоплюють концепції саме «зеленої хімії», життєвого циклу мислення та оцінки ризиків. Сьогодні саме «зелена хімія» (ЗХ) базується на ряді принципів, які можна використовувати для формування продуктів, реакцій і методів, які є більш безпечними для навколишнього середовища та людей. ЗХ розроблено в усіх галузях хімії, таких як органічна, біохімічна, неорганічна, фізична, токсикологічна, полімерна, екологічна тощо [2, 3]. Якщо не використовуються або не виробляються небезпечні матеріали, тоді ризик дорівнює нулю, і немає необхідності турбуватися про усунення шкідливих сполук із навколишнього середовища. ЗХ також стосується скорочення сировини, відходів, ризиків, енергії, впливу на навколишнє середовище та витрат [4, 5]. Питання сталого розвитку та навколишнього середовища швидко стають найважливішими темами для виробництва та розробки продуктів [6, 7]. Виконання ЗХ є одним із заходів, які можна підготувати для відновлення якості навколишнього середовища. Майбутні виклики у сфері ресурсів, економіки, навколишнього середовища та стійкості вимагають більш кваліфікованих, організованих технологій, пов'язаних із хімікатами та виробництвом. ЗХ пододала ці виклики, відкривши різноманітні можливості для максимізації бажаних речовин і зменшення побічних продуктів, обладнання, що використовується для утворення екологічно чистих хімічних речовин, які за своєю суттю є екологічними [8-10]. Дослідження, пов'язані з ЗХ, були зосереджені на зменшенні або виключенні використання або виробництва токсичних речовин для навколишнього середовища та здоров'я [11-13].

Аналіз останніх досліджень

Основною метою статті є аналіз впливу «зеленої хімії» та використання інноваційних матеріалів на розвиток безпечних та екологічно чистих продуктів у сільському господарстві. Задачі дослідження: провести аналіз використання принципів «зеленої хімії» та їх застосування в розробці безпечних хімічних продуктів і процесів; дослідити використання інноваційних матеріалів у виробництві та їх вплив на екологічну безпеку і стійкість продуктів; визначити роль «зеленої хімії» у створенні ефективних та безпечних методів виробництва в сільському господарстві; оцінити вплив застосування «зеленої хімії» на зменшення використання небезпечних хімікатів і пестицидів.

Методологічна база дослідження базується на концепції стійкого розвитку і на принципах «зеленої хімії». Використано метод балансування. Так «зелених порцій» має бути три в «зеленій» реакції: розчинник, реагент/каталізатор, і енергії витрат. «Зелена хімія» несе екологічне покращення, це тягне за собою мінімізацію впливу шкідливих проміжних продуктів і усунення використання небезпечних хімікалій в процедурах хімічного синтезу. В «зеленій хімії» використовуються методи контролю для моніторингу хімічних реакцій з метою оптимізації умов реакції, зниження витрат реагентів та мінімізації утворення відходів: 1) характеристики сполук, які відповідають критеріям екологічності; 2) підготовка з поновлюваних або легкодоступних ресурсів і екологічно дружніх процесів; 3) низька тенденція до появи раптових, жорстоких, непередбачуваних реакцій, такий як екс-вибухи що може спричинити пошкодження або спричинити витік хімікатів і побічних продуктів у в навколишнє середовище; 4) низький рівень токсичності; 5) відсутність токсичних або екологічно небезпечних компонентів, особливо важких металів; 6) швидкість розпаду, особливо біорозпад в умовах навколишнього середовища; 7) низька тенденція до біонакопичення в харчовому ланцюзі.

Виклад основного матеріалу

«Зелена хімія» передбачає проектування та розробку продуктів і процесів, які мінімізують або виключають використання та утворення хімічних речовин, небезпечних для навколишнього середовища та здоров'я людини. Принципи «зеленої хімії» передбачають розробку зелених каталізаторів і використання нетоксичних інноваційних матеріалів. «Зелена хімія» наголошує на застосуванні реакцій, що покращують ефективність атомів, використанні системи розчинників без розчинників або безпечних для навколишнього середовища вторинної переробки та використанні відновлюваних ресурсів. На шляху до безпечних для навколишнього середовища процесів і продуктів, була організована конференція, під час якої ряд хіміків обговорили вплив сільськогосподарської та промислової діяльності на хімічний склад атмосфери. Вони порадили «дизайн для навколишнього середовища»: межі ля роботи зі споживачами та забезпечення безпеки харчових продуктів і культур, розроблених екологічними методами для екологічної сільськогосподарської практики [14, 15].

Сьогодні «зелена хімія» відіграє нову парадигму в галузі сільського господарства. В останні кілька років для сталого виробництва в сільському господарстві збільшується використання відновлюваних ресурсів, біомаси для виробництва харчових продуктів на біологічній основі з низькими витратами, нульовими відходами, значними соціальними цінностями та мінімізацією впливу на навколишнє середовище:

- застосування зелених принципів у сільському господарстві;
- вибір нетоксичної сировини;
- розробка безпечних та енергоефективних синтетичних процедур;
- максимальна інтеграція всіх матеріалів у продукт, усунення допоміжних, за можливості;
- створення довговічних, нетоксичних продуктів із збереженою функціональністю;
- забезпечення природного розкладання всіх продуктів і побічних продуктів наприкінці терміну служби.

У 1998 р. Настас П. і Уорнер Дж. розробили 12 принципів «зеленої хімії». Зелена хімія починається з молекулярного рівня та в кінцевому підсумку вказує на найважливіші екологічно безпечні процеси та продукти [16]. Принципи «зеленої хімії» стосуються зменшення або видалення шкідливих речовин із синтезу. Таким чином, зменшується або виключається використання токсичних речовин для здоров'я людини та навколишнього середовища. Принципи «зеленої хімії» особливо актуальні для виробництва агрохімікатів через їх прямиї вплив на здоров'я людей і навколишнє середовище. Однак поточна сільськогосподарська практика все ще базується на інтенсивних методах виробництва з використанням нестійких технологій, розроблених під час «зеленої революції» (рис. 1).

Стійкість сільського господарства є основною сферою, яка потребує стратегій «зеленої хімії» в агрохімічній галузі для впровадження розумного використання пестицидів і добрив. За останні кілька років виробництво синтетичних пестицидів зросло, а сучасні методи ведення сільського господарства спричинили викиди значних парникових газів, наприклад, щорічні викиди 83% закису азоту (N_2O) у всьому світі [17].



Рис. 1. Модель використання 12 принципів «зеленої хімії» [18]

Несприятливий вплив агрохімічного забруднення полів через непрямий або прямий вплив неправильного використання пестицидів впливає на тварин і здоров'я людини. До пестицидів належать усі хімічні речовини, які використовуються в сільському господарстві, але вони в харчовому ланцюзі разом із біозбільшенням і біонакопиченням мають негативний вплив на тварин і життя людини [19]. Щоб мінімізувати ці шкідливі наслідки, слід збільшити використання методів органічного землеробства замість синтетичних пестицидів. Ці пестициди також спричиняють забруднення ґрунтових вод і призводять до евтрофікації річкових і озерних вод і переміщення токсичних хімікатів з навколишнього середовища в організм. Існують деякі пестициди, наприклад ДДТ, які розчиняються та накопичуються в жирових тканинах і викликають біозбільшення в харчовому ланцюзі [20, 21].

Нова аграрна технологія характеризується широким використанням високоврожайних сортів сільськогосподарських культур, хімічних добрив, пестицидів та зрошення. По мірі того, як увага споживачів зміщується в бік створення сталого та безпечного постачання продовольства, агрохімічна промисловість потребуватиме другої «зеленої революції» з використанням принципів «зеленої хімії», щоб впроваджувати продукцію, відповідну новим аграрним технологіям. Самі біологічні засоби захисту рослин мають масштабовану та екологічну технологію, яка має безпосередній вплив на стале сільське господарство для широкого асортименту виробництва [8]. В даний час інноваційні ферменти використовуються для синтезу біокаталізаторів, які пропонують економічні переваги у фармацевтиці та сільському господарстві.

Сьогодні виробник наголошує на заміні традиційних розчинників на екологічно безпечні аналоги для зменшення негативного впливу на працівників у хімічній галузі та захисту навколишнього середовища. Наразі «зелені» розчинники становлять близько 10% ринку. В останні кілька років лабораторний синтез і виробництво в промисловості замінили на реакції без каталізатора на воді та у воді [22].

Нещодавно органічні розчинники з високою летючістю та внутрішньою токсичністю були замінені іонними рідинами (IP), що пояснюється рівнем саме екологічної безпеки їх використання. Іонні рідини – це

органічні солі, які зазвичай плавляться при температурі нижче 1000 °С, мають високу термічну стабільність, майже нелетючі за нормальних умов, розчиняють неполярні та полярні органічні та неорганічні сполуки. З цієї причини іонні рідини називаються «дизайнерські розчинники» [23].

Існує список із семи дуже або надзвичайно небезпечних пестицидів, які продовжують використовуватися. Пестициди, такі як моноокрофос і оксидеметон-метил, вважаються ВООЗ пестицидами класу I. Оскільки пестициди класу I можуть бути смертельними в дуже низьких дозах, багато з них заборонені в ряді країн, але вони все ще використовуються в деяких країнах, що призводить до смерті фермерів. За допомогою «зеленої хімії» тепер можливо перетворити легкодоступні похідні фурану в різноманітні синтетично цінні поліоксигеновані молекули, які часто присутні в природних матеріалах [24] (рис. 2).

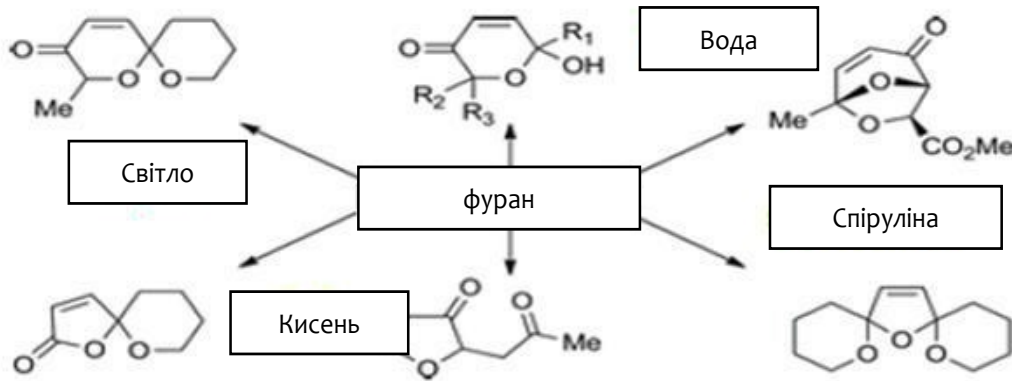


Рис. 2. «Зелена» хімічна реакція отримання поліоксигенованих молекул в природних матеріалах (розроблено авторами)

Як ми бачимо, деякі хімічні речовини, які все ще традиційно використовуються в сільському господарстві, пов'язані з несприятливим впливом на навколишнє середовище та здоров'я людини. Зростає занепокоєння щодо того, як ведеться сільське господарство для сталого сільського господарства, які ресурси буде залучено [12]. Так приклади використання принципів «зеленої хімії» у сільському господарстві для вирощування безпечних та екологічно чистих продуктів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Приклади впровадження 12 принципів «зеленої хімії» у використанні інноваційні матеріалів, отримання екологічно безпечних продуктів (побудовано авторами на основі [25-27])

№	Принцип	Приклад та інноваційні матеріали
1.	Профілактика отруєнь	Використання методу підготовки проб без розчинників
2.	Підвищення ефективності атомів хімічних елементів	Гідрування карбонової кислоти до альдегіду за допомогою твердої речовини (каталізатор)
3.	Застосування менш небезпечного хімічного синтезу	Синтез адипінової кислоти шляхом окислення циклогексену за допомогою перекису водню
4.	Засоби захисту рослин	Сучасні екологічно безпечні й органічні засоби захисту рослин
5.	Використання безпечних розчинників і допоміжних речовин	Екстракція надкритичної рідини, синтез в іонній рідині
6.	Розробка та запровадження енергоефективного дизайну	Поліолефени полімери, альтернативні PWC (полімеризація здатна зменшити енергоспоживання)
7.	Використання відновлюваної сировини	Виробництво ПАР
8.	Зменшення зайвої дериватизації	Дериватизація в розчині в зразку(підготовка)
9.	Посилення каталізу	Ефективний Au (III) каталізований синтез б-енаміонів з 1,3-дикарбонільні сполуки й аміни
10.	Створення біологічно розчинних продуктів	Синтез продуктів, що біологічно розкладаються
11.	Створення аналітичних методів моніторингу в реальному часі	Використання лінійних аналізаторів для моніторингу водовідходів
12.	Зменшення наслідків хімічних аварій	ди-Ме карбонат є екологічно чистим заміник галогенідів ди-Ме сульфату в реакції метилювання

Перший принцип наочно ілюструється численними прикладами процесів і виробництв, особливо органічного синтезу, у яких шкідливі реагенти все частіше замінюються на менш шкідливі, ефективніші, які дають менше побічних продуктів та легше утилізуються (рис. 3).

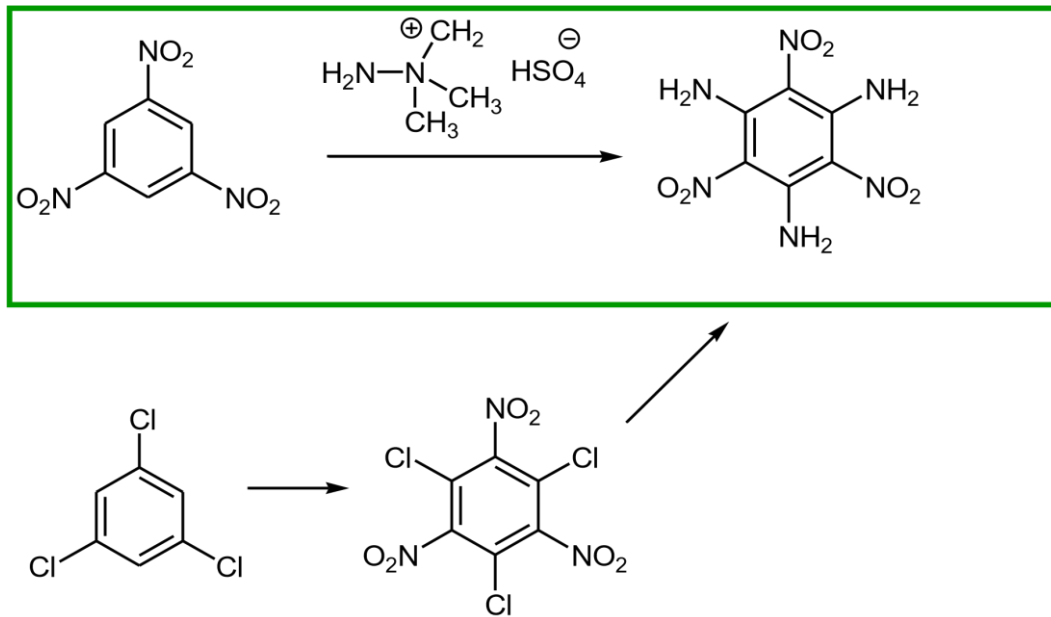


Рис. 3. Приклад «зеленого» органічного синтезу (розроблено авторами)

Методи «зеленого» синтезу, за можливості, треба вибирати таким чином, щоб усі матеріали, використані в процесі, були максимально переведені в кінцевий продукт [17].

Методи «зеленого» синтезу слід вибирати так, щоб використані синтезовані речовини були якнайменш шкідливими для людини та навколишнього середовища (рис. 4).

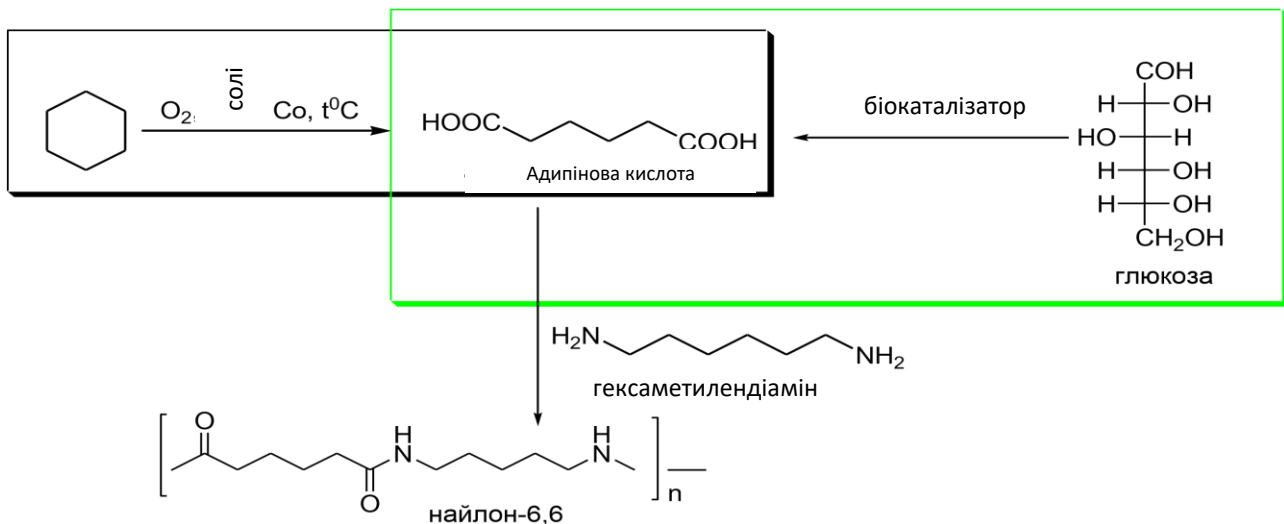


Рис. 4. Отримання безпечних синтезованих речовин в умовах «зеленої хімії» (розроблено авторами)

Конверсія кетону в лактон зазвичай протікає під дією м-хлорпербензойної кислоти. Цей новий спосіб пропонується для проведення цього процесу з використанням хлібопекарських дріжджів як біокатализатору кисню повітря як окислювача. Цей приклад містить відразу два «зелені» компоненти – каталізатор і повітря (замість вибухонебезпечного та неекономічного окислювача) (рис. 5) [10].

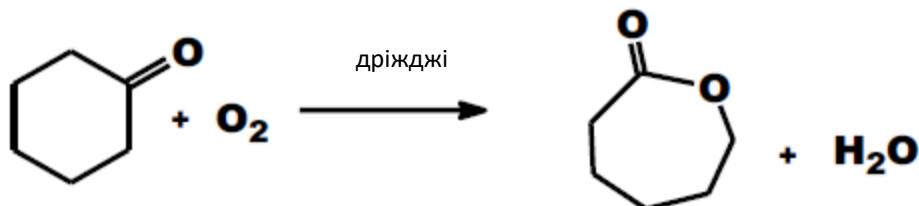


Рис. 5. Хлібопекарські дріжджі, як біокатализатор («зелені» компоненти) [10]

Слід зазначити, що застосування біокатализаторів – екологічно більш прийнятний підхід у порівнянні з каталізаторами, оскільки дозволяє використовувати відновлювану природну сировину (дріжджі).

Так «зелена хімія», спрямована на досягнення прибутку сільського господарства та харчової промисловості, процвітання громади та покращення якості ґрунту шляхом зменшення залежності від використання невідновлюваних ресурсів, наприклад синтетичних добрив і пестицидів, мінімізації негативного впливу на якість води, дику природу та безпеку [28]. Існують різні альтернативи хімічного землеробства, такі як біологічне сільське господарство, органічне землеробство, природне землеробство, біодинамічне сільське господарство, екологічне сільське господарство. Біопестициди є органічними за своєю природою, тому їх можна використовувати в сільському господарстві для боротьби зі шкідниками, комахами, бур'янами, а також для фізіології та продуктивності рослин. Ці біопестициди біологічно розкладаються в навколишньому середовищі.

Ми відзначаємо систематичне зростання світового попиту на екологічно чисті продукти харчування. Сьогодні в суспільстві поширена думка, що екологічно безпечну продукцію досить «просто зробити звичайним способом». Під «звичайним способом» виробництва розуміється виробництво сільськогосподарської продукції в умовах дефіциту фінансових коштів, тобто без внесення мінеральних добрив, пестицидів та інших засобів захисту. Тим часом, виробництво екологічно безпечної продукції передбачає застосування складніших, а отже, і більш витратних технологій, навіть у порівнянні з інтенсивними технологіями [29]. Крім застосування органічних добрив, необхідно використовувати екологічно безпечні засоби захисту рослин, а також підтримувати на необхідному рівні родючість ґрунту.

Для інформування споживачів потрібно вказувати місце, де виробляються органічні продукти харчування, зокрема імпортна продукція, що має відповідний до стандарту сертифікації логотип країни походження. Органічний логотип дозволяється використовувати лише за умови, якщо 95-98% інгредієнтів продовольства є органічними. Неорганічна продукція може містити вказівку на органічне походження окремих компонентів та їх переліку. Під час виробництва органічних продуктів категорично забороняється використання генетично модифікованих організмів (ГМО) [30].

Наприклад, згідно з приватними екологічними стандартами групи «С» (стандарти ЄС), господарювання можна вести двома різними способами [31]. Це означає, що частину полів можна обробляти за правилами екологічного виробництва, іншу – звичайними методами, тобто зі застосуванням мінеральних добрив та пестицидів. Проте, за деякими винятками, ту саму культуру не можна вирощувати екологічним і звичайним способами. Крім того, в даному випадку саме виробництво, як і сертифікація виробленої агропродукції, ускладнюються через безліч додаткових вимог чіткого поділу звичайного та екологічного агровиробництва (полів, машин, знарядь, складів, обладнання тощо) [32].

Безпестицидна технологія не вимагає застосування отруйних хімічних речовин та хімічних добрив. Для підвищення конкурентоспроможності культурних рослин організовують більш ретельну передпосівну обробку ґрунту, збільшують норми висіву, проводять підживлення рослин азотними добривами. Так, ми можемо навести приклад у сфері вирощування картоплі, коли понад 10% від врожаю використовується на корм тваринам через те, що виробництво перевищує потреби (табл. 2).

Таблиця 2

Відходи картоплі та потенціал їхньої «зеленої» переробки [33]

Сільськогосподарське виробництво (%)	Оптовики (%)	Роздрібні торговці (%)	Домогосподарство (%)
15–24	12–24	1–3	15
Втрата поля (%)	Втрата сортування (%)	Втрата зберігання (%)	Роздрібні торговці
1–2	3–13	3–5	1,5–3

Приблизно 18% картоплі за вагою становить крохмаль, який використовується для різноманітних промислових цілей, включаючи виробництво паперу, як харчову добавку та в корм для домашніх тварин. «Зелена хімія» в переробці картоплі для одержання крохмалю потребує багато води, і хоча методологію вилучення крохмалю було оптимізовано, все ще є потенціал для вдосконалення. Наприклад, «стічна» вода, що утворюється під час екстракції крохмалю, багата білками. Приблизно 2% від маси бульб картоплі становлять білок, і під час процесу шліфування/миття 85% цього білка екстрагується в картопляний сік (PFJ), тобто екстракція білка відбувається випадково в процесі рафінування крохмалю [33].

Картопляний білок можна відносно легко відновити за допомогою ряду методів осадження залежно від бажаних властивостей кінцевого білка, ці методи осадження варіюються від використання простого кислотного нагріву до використання сульфату амонію, який зазвичай використовується як добриво, що дозволяє повторно використовувати воду для зрошення полів, для вирощування картоплі. Картопляний білок вважається дуже високоякісним у порівнянні з білками, отриманими з інших рослинних джерел, завдяки відносно високій концентрації незамінної амінокислоти лізину, який зазвичай міститься в низькій концентрації в інших рослинних білках. Подібні продукти поповнюють список екологічно безпечних продуктів (ЕБП), які стають більш популярними в економічно розвинутих країнах, причиною цього служить шкода, що завдається людині, від вживання продуктів, що містять консерванти і хімічні речовини. Внаслідок цього цільова аудиторія ЕБП значно розширилася, у містах стали з'являтися органічні магазини, малі фермерські господарства, що спеціалізуються на вирощуванні ЕБП, розширилися та перетворилися на великі компанії [34].

Ми вважаємо, що серед ключових критеріїв віднесення продукту до категорії екологічно безпечних,

і потрібно враховувати вміст у продукції барвників, консервантів, хімічних речовин та добрив, а також шкоду, яку завдається природі під час виробництва харчових продуктів. До цих факторів слід додати використання технологій з мінімальною кількістю відходів, розширення асортименту смакових якостей екологічно чистих продуктів та оптимальне використання вторинної сировини у їхньому виробництві. Окрім цього, потрібно підкреслити необхідність розробки та впровадження інноваційних «зелених» технологій у хімічній індустрії та патентування нових розробок у цій галузі.

Таким чином, сталий розвиток сільського господарства та застосування «зеленої хімії» є взаємопов'язаними напрямками. Екологічним хімікам важливо співпрацювати з фермерами для використання екологічно безпечних технологій у сталому сільському господарстві, а фермерам необхідні надійні та екологічно чисті ресурси для своєї діяльності.

Висновки

Метою проведеного огляду є акцентування на важливості застосування «зеленої хімії» у сільському господарстві, що має рішуче значення для досягнення сталого розвитку, привертається увага наукової спільноти і споживачів харчових продуктів на необхідності виробництва продуктів і процесів, що виключають або мінімізують використання токсичних речовин, що важливо для здоров'я людини та екологічної безпеки. Використання «зеленої хімії» в сільському господарстві секторі має забезпечити виробництво продукції, яке є безпечним для споживачів, зменшуючи ризики для здоров'я, пов'язані з хімічними речовинами.

Проведене дослідження підкреслює важливість «зеленої хімії» у створенні продуктів та процесів, які мінімізують використання та утворення шкідливих хімічних речовин, тим самим забезпечуючи безпеку для довкілля та здоров'я людини. Саме застосування нетоксичних інноваційних матеріалів та розробка зелених каталізаторів є фундаментальними елементами «зеленої хімії», що ведуть до створення більш безпечних та ефективних продуктів.

Доведено, що саме «зелена хімія» наголошує на важливості реакцій, які покращують ефективність атомів і використання безпечних систем розчинників, сприяючи таким чином екологічній безпеці та ефективності. Сучасна «зелена хімія» відіграє значну роль у сільському господарстві, сприяючи використанню відновлюваних ресурсів та біомаси для створення продуктів із низькими витратами, мінімальними відходами та позитивним соціальним впливом.

Доведено, що екологічним хімікам необхідно співпрацювати з фермерами для реалізації цих технологій, що дозволить фермерам отримувати надійні та екологічно безпечні ресурси для своєї діяльності.

Визначено, що «зелена хімія» надає нових шляхів для створення екологічно безпечних продуктів. Існуючі методи ведення сільського господарства, які включають використання небезпечних хімічних речовин, потребують переосмислення та зміни на користь сталого розвитку. Обґрунтовано, що використання нових матеріалів та методів у виробництві, таких як екстракція надкритичної рідини або синтез в іонних рідинах, відіграє ключову роль у реалізації принципів «зеленої хімії».

References

1. Das Soni, G. D. (2015). Advantages of green technology, *International Journal of Research – GRANTHAALAYAH, Social Issues and Environmental Problems*, 3 (9), 1-5.
2. Vasylenko, I. A., Chuprinov, E. V., Ivanchenko, A. V., Skyba, M. I., Vorobyova, V. I., Galish, V. V. (2019). *Zeleni tehnolohiyi u promyslovosti: Monohrafiya*. Dnipro, Accent 366 p. [in Ukrainian]
3. Patel, M., Patel, H., Mevada, S., Patel, O. (2020). Chemistry goes green: a review on current and future perspectives of pharmaceutical green chemistry. *World Journal of Pharmaceutical and Medical Research*, 6(7), 125-131.
4. Krishna, N. Ganesh, Deqing, Zhang, Scott, J. Miller, Kai, Rossen, Paul J. Chirik, Marisa C. Kozlowski, Julie, B. Zimmerman, Bryan, W. Brooks, Phillip, E. Savage, David, T. Allen, and Adelina, M. Voutchkova-Kostal. (2021). *Green Chemistry: A Framework for a Sustainable Future Environmental. Science & Technology*, 55 (13), 8459-8463. DOI: 10.1021/acs.est.1c03762
5. Singh, G., Wakode, S. (2018). Green Chemistry Drift: A Review. *Sch. Academia Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 7(6), 274-279. doi:10.21276/sajp.2018.7.6.10
6. Kharissova, Q. V., Kharisov, B. I., González, C. M. O., Méndez, Y. P., López, I. (2019). Greener synthesis of chemical compounds and materials. *Royal Society Open Science*, 6(11), 191378. <https://doi.org/10.1098/rsos.191378>
7. Asif, Mohammad. (2021). Green synthesis, green chemistry, and environmental sustainability: an overview on recent and future perspectives of green chemistry in pharmaceuticals. *Green Chemistry & Technology Letters*, 7, 18-27. 10.18510/gctl.2021.713.
8. Adam, D. H., Supriadi, Y. N., Ende, Siregar, Z. M. E. (2020). Green Manufacturing, Green Chemistry And Environmental Sustainability: A Review. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(04), 2209-2211.
9. Palit, S. (2021). Application of nanotechnology in the energy industry, green sustainability and the visionary future. *Academia Letters*, Article 2326. <https://doi.org/10.20935/AL2326>
10. Journals, M. G. E. S., & Asif, M. (2021). Green synthesis, green chemistry, and environmental sustainability: an overview on recent and future perspectives green chemistry in pharmaceuticals. *Green Chemistry & Technology Letters*. 7(1), 18–27. <https://doi.org/10.18510/gctl.2021.713>

11. Journals, M. G. E. S. (2018). Applications Of Green Chemistry Principles in Agriculture Text. *GCTL*. Vol 4, №2, 12-12. <https://doi.org/10.18510/gctl.2018.421>.
12. Lasker, G. A., Mellor, K. E., Simcox, N. J. (2019). Green chemistry & chemical stewardship certificate program: a novel, interdisciplinary approach to green chemistry and environmental health education. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12(2), 178-186. doi: 10.1080/17518253.2019.1609601
13. Chen, M., Jeronen, E., Wang, A. (2020). What Lies Behind Teaching and Learning Green Chemistry to Promote Sustainability Education? A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 7876. <https://doi.org/10.3390/ijerph17217876>,
14. Orsini, S., Padel, S., Lampkin, N. (2018). Labour .Use on Organic Farms: a Review of Research since 2000. *Organic Farming*, Vol. 4, Iss. 1, 7–15. <https://doi.org/10.12924/of2018.04010007>
15. Valavanidis, M. (2016). Green chemistry and new technological developments new avenues for the green economy and sustainable future of science and technology. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/305207284>
16. Kraus, N. M., Kraus, K. M., Osetskiy, V. L. (2021). Green business in blue economy: quality management and development of innovative products. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Thermal Engineering, Manufacturing, and Production Management (ICTEMA 2020)*. Springer, Singapore (27- 28 June 2021, Jalpaiguri, India), Vol. 1. 383–394.
17. Medina, Valderrama C. J., Morales, Huamán H. I., Valencia-Arias, A., Vasquez, Coronado M. H., Cardona-Acevedo, S., Delgado-Caramutti, J. (2023). Trends in Green Chemistry Research between 2012 and 2022: Current Trends and Research Agenda. *Sustainability*, 15(18), 13946. <https://doi.org/10.3390/su151813946>.
18. Ivashura, A. A. (2022). Suchasni tendentsiyi rozvytku zelenoyi ekonomiky v umovakh hlobalizatsiyi ta minimalistychnoho rukhu: monographia. Kharkiv, HNEU named after S. Kuznetsa, 113 p. [in Ukrainian]
19. Palit, S. (2021). Application of nanotechnology in the energy industry, green sustainability and the visionary future. *Academia Letters*, Article 2326. <https://doi.org/10.20935/AL2326>
20. Karpenko, L., Serbov, M., Kwilinski, A., Makedon, V. & Drobyazko, S. (2018). Methodological platform of the control mechanism with the energy saving technologies. *Academy of Strategic Management Journal*, Volume 17, Issue 5, Retrieved from: <https://www.abacademics.org/articles/Methodological-platform-of-the-control-mechanism-1939-6104-17-5-271.pdf>
21. Perlati, B., Forim M. R., and Zuin, V. G. (2014). Green chemistry, sustainable agriculture and processing systems: a Brazilian overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1:5.
22. Wilson, M. P., Schwarzman, M.R. (2009). Toward a New U.S. Chemicals Policy: Rebuilding the Foundation to Advance New Science. *Green Chemistry, and Environmental Health. Environ. Health Perspect*, 117(8), 1202-1209. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800404>.
23. Gao, X., Liu, J., Zuo, X., Feng, X., Gao, Y. (2020). Recent advances in synthesis of benzothiazole compounds related to green chemistry. *Molecules*, 25(7), 1675.
24. Adam, D. H., Supriadi, Y. N., Ende, Siregar, Z. M. E. (2020). Green Manufacturing, Green Chemistry And Environmental Sustainability: A Review. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9(04), 2209-2211.
25. Makedon, V., Dzeveluk, A., Khaustova, Y., Bieliakova, O., Nazarenko, I. (2021). Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, Vol. 29. Iss. 1, 73-91.
26. Santi, M., Sancineto, L., Nascimento, V., Azeredo, J. B., Orozco, E. V. M., Andrade, L. H., Gröger, H., Santi, C. (2021). Flow Biocatalysis: A Challenging Alternative for the Synthesis of APIs and Natural Compounds. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), 990. <https://doi.org/10.3390/ijms22030990>
27. Ivankovic, A., Talic, S. (2017). Review of 12 Principles of Green Chemistry in Practice. *International Journal of Sustainable Development*, 6(3), 39-48. <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20170603.12>
28. Manmohan, S., Arjun, S., Khan, S.P., Eram, S., Sachan, N.K. (2012). Green chemistry potential for past, present and future perspectives. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 3(4), 31-36.
29. Makedon, V., Mykhailenko, O., & Krasnikov, P. (2023). Management of the development and implementation of national and international projects in the field of renewable energy. *Entrepreneurship and Innovation*, (26), 5-13. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1> [in Ukrainian].
30. Rocha, J. D. (2013). Chemistry without borders: the energy challenges. *Quim Nova*, 36 (10), 1540–1551.
31. de Marco, B. A., Rechelo, B. S., Tótolí, E. G., Kogawa, A. C., Salgado, H. R. N. (2019). Evolution of green chemistry and its multi dimensional impacts: A review. *The Saudi Pharmaceutical Journal*, 27(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2018.07.011>
32. FiBL & IFOAM – Organics International. The World of Organic Agriculture. Statistics & emerging trends (2022). Retrieved from: <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1344-organic-world-2022.pdf>
33. Ubuoh, E. (2016). Green Chemistry : A Panacea for Environmental Sustainability Agriculture in Global Perspective. *Global Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 4(1), 21-29.
34. Makedon, V. V., Mykhaylenko, O. H. (2023). Napryamky rozvytku medychnoho strakhuvannya v systemi natsional'noyi ekonomiky krayin. Prychornomors'ki ekonomichni studiyi, 79, 30-39 DOI: <https://doi.org/10.32782/bses.79-4> [in Ukrainian]