



Тетяна ІВАНІШЕНА,
кандидат технічних наук,
доцент Хмельницького національного університету

Синергія зеленої хімії та Цілей сталого розвитку ООН: новий підхід до формування екологічного мислення молоді

Анотація

У статті розглядається роль принципів зеленої хімії у формуванні дослідницьких компетентностей учнів Малої академії наук (МАН) та їхньому внеску в досягнення Цілей сталого розвитку ООН. Представлено методичні підходи до інтеграції принципів зеленої хімії в учнівські наукові роботи, приклади безпечних та екологічно орієнтованих експериментів, методику оцінювання сталості проєктів та рекомендації щодо впровадження екологічної тематики у навчальні програми.

Ключові слова: зелена хімія; Цілі сталого розвитку; екодизайн; екологічна освіта/

Постановка проблеми

Глобальні виклики — зміна клімату, виснаження природних ресурсів, деградація екосистем — вимагають нового підходу до навчання молоді й формування наукового світогляду. Зелена хімія (ЗХ) пропонує системні принципи створення безпечних, ресурсоефективних і відновлюваних хімічних технологій. Для учнівської наукової спільноти, зокрема учасників МАН, інтеграція принципів зеленої хімії в дослідницьку практику відкриває можливості не лише для безпечних експериментів, але й для реального внеску в досягнення Цілей сталого розвитку (ЦСР). До того ж упровадження цієї філософії в освітній процес є критично важливим для формування нового покоління свідомих науковців та інноваторів, здатних розробляти екологічно безпечні технології.

Мета: розробити методичні підходи та практичні рекомендації щодо впровадження принципів зеленої хімії у дослідницькі роботи учнів МАН з метою сприяння виконанню Цілей сталого розвитку.

Завдання:

- Проаналізувати зв'язок між принципами зеленої хімії та ЦСР;
- Розробити модель методичної підтримки дослідницьких проєктів учнів з елементами оцінки життєвого циклу (ОЖЦ) та екодизайну;
- Запропонувати приклади безпечних експериментів і мініпроєктів для учнів;

— Розробити критерії оцінювання сталості учнівських робіт;

— Надати рекомендації щодо впровадження у програму МАН та поза- і шкільну освіту.

Методи дослідження

У роботі застосовано комплекс методів: аналіз наукової та методичної літератури; інтерпретація документів політичного рівня (European Green Deal, ЦСР); проєктно-орієнтований метод навчання; експериментальні методики для розроблення безпечних лабораторних протоколів; елементи ОЖЦ для оцінки проєктів; опитування вчителів і наукових керівників для апробації методичних підходів.

Розв'язання проблеми

Поняття зеленої хімії сформульоване в роботах Anastas & Warner [1] та розвинуте у низці сучасних досліджень, котрі показують економічні й екологічні переваги від її впровадження. Європейський зелений курс [2] і міжнародні ініціативи підкреслюють роль наукової освіти у трансформації промисловості. Звіт UNEP Circularity Gap [3] та дослідження з екодизайну демонструють необхідність включення ОЖЦ і принципів циркулярної економіки у навчальні програми [4]. В Україні питання інтеграції зеленої хімії в освітній процес лише налагоджується, у роботах вітчизняних науковців наголошується на практичній спрямованості досліджень в освітньому середовищі, здебільшого це пов'язано з вищою освітою [5-7].

Зелена хімія, сформульована Полом Анастасом та Джоном Ворнером у 1990-х роках, ґрунтується на дванадцяти принципах, які слугують настановами для розробки нових хімічних продуктів та процесів, що зменшують або повністю усувають використання та утворення шкідливих речовин. Ці принципи охоплюють усі аспекти хімічного виробництва, починаючи від запобігання відходам та атомної ефективності, закінчуючи розробкою безпечніших хімічних синтезів, використанням відновлюваної сировини та дизайном для деградації.

Ключові принципи зеленої хімії:

1. Запобігання відходам: краще запобігти утворенню відходів, ніж потім їх очищати.

2. Атомна ефективність: максимально включати всі атоми реагентів у кінцевий продукт.

3. Менш небезпечні хімічні синтези: розробляти методи синтезу, які генерують речовини з малою або нульовою токсичністю.

4. Створення безпечніших хімічних продуктів: продукти мають бути ефективними, але мінімально токсичними.

5. Безпечніші розчинники та допоміжні речовини: уникати використання допоміжних речовин, де це можливо, і використовувати безпечніші, якщо вони необхідні.

6. Енергоефективність: проводити реакції при кімнатній температурі та атмосферному тиску, коли це можливо.

7. Використання відновлюваної сировини: використовувати відновлювану сировину (наприклад, біомасу) замість вичерпної (наприклад, нафтопродуктів).

8. Зменшення кількості побічних продуктів: уникати непотрібних кроків модифікації, які генерують додаткові відходи.

9. Каталіз: використовувати каталітичні, а не стехіометричні реагенти.

10. Проектування для розкладу: хімічні продукти мають розкладатися на нешкідливі речовини після виконання їх функції.

11. Аналіз у режимі реального часу для запобігання забрудненню: розробка методів моніторингу, які дозволяють контролювати процес і запобігати утворенню небезпечних речовин.

12. Безпечна хімія для запобігання аваріям: вибір речовин і форм їх використання, які мінімізують ризик хімічних аварій.

Дванадцять принципів зеленої хімії корелюються з низкою ЦСР [8-9]:

ЦСР 9: Промисловість, інновації та інфраструктура

– Зв'язок: Принципи зеленої хімії (особливо Атомна ефективність, Каталіз, Запобігання відходам) є основою для раціоналізації промислових процесів.

– Реалізація в МАН: Учні розробляють інноваційні, ресурсощадні методи синтезу або переробки відходів. Наприклад, проекти з розробки нових, екологічно чистих каталізаторів сприяють створенню стійкої промислової інфраструктури, що використовує мінімум ресурсів і генерує мінімум забруднення.

ЦСР 12: Відповідальне споживання та виробництво

– Зв'язок: Це найбільш пряма кореляція. ЦСР 12 вимагає суттєвого зменшення утворення відходів шляхом запобігання, скорочення, переробки та повторного використання.

– Реалізація в МАН:

- Принцип 1 (Запобігання відходам) та Принцип 10 (Проектування для розкладу) стають обов'язковими критеріями проектування.

- Учні працюють над створенням біорозкладних матеріалів (наприклад, полімерів з біомаси) або над розробкою методів використання промислових відходів як вторинної сировини (принцип Використання відновлюваної сировини). Вони вчать розраховувати Е-фактор, вимірюючи екологічний "слід" своєї хімічної реакції.

ЦСР 3: Міцне здоров'я та благополуччя

– Зв'язок: Принципи 3 та 4 (Менш небезпечні хімічні синтези та Створення безпечніших хімічних продуктів) безпосередньо пов'язані з мінімізацією ризиків для здоров'я.

– Реалізація в МАН: Учні досліджують або синтезують речовини, уникаючи використання високотоксичних розчинників (наприклад, бензолу, хлороформу), замінюючи їх на воду, етанол або надкритичний CO₂. Це забезпечує безпечніше лабораторне середовище та мінімізує вплив на здоров'я як самих дослідників, так і кінцевих споживачів продуктів.

ЦСР 13: Боротьба зі зміною клімату

– Зв'язок: Хімічна промисловість є значним споживачем енергії. Принцип 6 (Енергоефективність) сприяє скороченню викидів парникових газів.

– Реалізація в МАН: Учні вчать проводити реакції за умов, що потребують менше енергії, наприклад, при кімнатній температурі, або використовують енергоощадні методи, такі як сонохімія чи мікрохвильовий синтез. Це сприяє зменшенню вуглецевого сліду досліджень.

ЦСР 4: Якісна освіта

– Зв'язок: Інтеграція ЗХ в МАН є прикладом якісної, науково-орієнтованої та ціннісно-орієнтованої освіти, що готує громадян до життя в умовах сталого розвитку.

– Реалізація в МАН: МВЗХ перетворює традиційне хімічне навчання на міждисциплінарне та проблемно-орієнтоване, що повністю відповідає вимогам сучасної STEM-освіти.

Для учнівських досліджень це означає, що проекти з зеленої хімії можуть мати чітку прив'язку до міжнародних цілей, що посилює їхню значимість і потенціал для публікації та впливу, а також сприятиме формуванню екологічного мислення та інженерного підходу до хімії [10].

Дослідницьке навчання в МАН має на меті не лише поглиблення знань, а й розвиток критичного мислення, навичок проектування, планування експериментів, аналізу даних та презентації результатів.

Проекти учнів МАН у секціях «Хімія та біологія», «Екологія та аграрні науки», «Інженерія та матеріалознавство» традиційно охоплюють синтез нових речовин, аналітичну хімію, вивчення природних сполук, дослідження, спрямовані на вивчення взаємодії живих організмів із навколишнім середовищем, підвищення ефективності та сталості сільськогосподарського виробництва, розробці нових матеріалів, інноваційних технологій, проектуванні складних технічних систем та апаратів. Проте часто ці проекти можуть не повною мірою враховувати екологічний аспект. Упровадження зеленої хімії дозволяє зробити ці дослідження релевантнішими сучасним викликам і надати їм більшої практичної значущості.

Освітні переваги інтеграції зеленої хімії в МАН:

1) Актуалізація тем: дослідження, що базуються на принципах зеленої хімії, автоматично стають інновацій-

ними та соціально значущими (наприклад, розробка біорозкладних полімерів, синтез з використанням біомаси, «зелені» методи очищення води).

2) Розвиток інноваційних навичок: учні вчать не просто відтворювати реакції, а переосмислювати їх з точки зору мінімізації відходів та енерговитрат.

3) Формування екологічної відповідальності: дослідники з ранніх років усвідомлюють свою відповідальність за вплив наукової діяльності на довкілля.

Пропонується трирівнева модель інтеграції принципів зеленої хімії у шкільну освіту:

1) Теоретичний блок — вивчення принципів зеленої хімії, основ ОЖЦ, екодизайну;

2) Практичний блок — розробка та виконання безпечних експериментів, міні-ОЖЦ для простих продуктів;

3) Комунікаційний блок — підготовка постерів, презентацій та рекомендацій для локальних виробників.

Кожний проєкт повинен включати короткий розділ «Вплив на довкілля» з показниками: енергоспоживання, водоспоживання, утворення відходів, безпеки реагентів.

Упровадження теоретичного блоку передбачає оновлення навчальних матеріалів та програм, зокрема і для відповідних секцій МАН, наприклад обов'язкове вивчення 12 принципів зеленої хімії та методик їхнього застосування (наприклад, концепція Е-фактора (Environmental Factor) [11-12]), а також поширення інформації про тематичні напрями досліджень, такі як: каталіз, біомаса та відновлювана сировина, зелені розчинники, енергозбереження, фотохімічні реакції, мікрохвильовий та ультразвуковий синтез.

Практичний блок - це ядро моделі, де теоретичні знання трансформуються у практичні дослідницькі проєкти. Для кожного з етапів роботи над дослідженням можна запропонувати ряд інструментів, які сприяють переходу до сталості та принципів зеленої хімії (таблиця).

Впровадження підходів зеленої хімії на етапах дослідницької діяльності

Етап дослідницької роботи	Діяльність учня з погляду ЗХ	Інструменти оцінки
I. Вибір теми та планування	Вибір теми, що розв'язує екологічну проблему (наприклад, утилізація пластику). Обов'язкове порівняння «зеленого» та традиційного підходів.	Check-list 12-ти принципів зеленої хімії.
II. Проведення синтезу/аналізу	Максимізація атомної ефективності; використання безпечних розчинників (наприклад, вода, етанол); зменшення кількості відходів.	Розрахунок атомної ефективності (AE).

III. Обробка та аналіз результатів	Кількісне визначення відходів (Е-фактор). Аналіз токсичності отриманих продуктів та побічних речовин.	Розрахунок Е-фактора. Аналіз безпеки (MSDS/SDS).
IV. Оформлення та презентація	Обов'язкове включення розділу «Екологічна та економічна доцільність» проєкту. Обґрунтування відповідності 12 принципам ЗХ.	Критерії оцінки проєкту МАН.

Приклади учнівських досліджень і безпечних експериментів

Нижче наведено декілька прикладів міні-проєктів, придатних для досліджень:

1. Порівняння екологічного сліду натуральних і синтетичних волокон.

Мета: оцінити питомі витрати води та енергії; методи: збір даних із літератури, полегшені розрахунки, аналіз чутливості.

2. Розробка екологічно безпечного барвника на основі природних пігментів (бурак, червонокочанна капуста, куркума).

Мета: отримати барвник для тканини з мінімальними стічними водами; методи: екстракція, фіксація барвника натуральними закріплювачами, оцінка кольоростійкості, тест токсичності на основі біоіндикаторів (наприклад, водяні рослини).

3. Дослідження біорозкладності текстильних матеріалів.

Мета: порівняти швидкість біодеградації різних волокон; методи: прискорені лабораторні тести на ґрунті/компості, вимірювання виділеного CO₂, масові втрати зразка.

4. Оптимізація розкрою та моделі виробництва для зменшення текстильних відходів. Мета: мінімізувати відходи тканини; методи: цифровий дизайн розкрою, порівняння витрат матеріалу, калькуляція збережень.

5. Спрощена ОЖЦ для виробу — наприклад, футболки: збір даних, створення простого життєвого циклу, якісний аналіз найкритичніших етапів.

Важливим є також етап оцінювання таких проєктів, оскільки забезпечує зворотний зв'язок та корекцію дослідницької діяльності.

Для оцінки проєктів пропонується використовувати шкалу з п'яти показників:

1) Екологічний вплив (1–10) — на основі полегшеного ОЖЦ;

2) Інноваційність (1–10);

3) Безпека методів (1–10) — оцінка ризиків та застосування заміників шкідливих реагентів;

4) Практична застосовність (1–10) — чи може проєкт бути впроваджений у школі/локальному виробництві;

5) Комунікація результатів (1–10) — презентація, рекомендації для стейкхолдерів.

Підсумкова оцінка формується як зважене середнє, де екологічний вплив має підвищену вагу (наприклад, 30%).

Реалізація мого підходу неможлива без урахування матеріально-технічної бази (принаймні мінімальної), а також інформаційного забезпечення.

Для проведення «зелених» експериментів потрібне мінімальне, але спеціалізоване обладнання:

1. Мікрохвильові реактори (для прискорення реакцій та зменшення енерговитрат).
2. Устаткування для ультразвукової обробки (сонохімія).
3. Наявність багаторівневої системи очищення води (для використання води як «зеленого» розчинника).
4. Спектральне обладнання (для швидкого і точного аналізу продуктів, мінімізуючи потреби у додаткових реагентах для аналізу).
5. Доступ до баз даних безпеки (SDS/MSDS) для оцінки ризиків.

Колаборація закладів середньої освіти з закладами вищої освіти дозволить покращити цей аспект і підвищити науковість та інноваційність проєктів [13].

У свою чергу для наукових керівників, учителів закладів середньої освіти важливо включати модулі з зеленої хімії до програми підготовки учнів, проводити майстер-класи з безпечних експериментів; використовувати цифрові інструменти для спрощеної оцінки життєвого циклу; налагодити співпрацю з місцевими виробниками для апробації результатів та впровадження рекомендованих практик; забезпечити дотримання правил безпеки: заміна токсичних реагентів, використання мікрооб'ємів, застосування захисного обладнання; стимулювати до реалізації мультидисциплінарних проєктів: поєднання хімії, технологій, економіки та екології.

Інтеграція принципів зеленої хімії у дослідницькі роботи учнів МАН сприятиме: підвищенню екологічної грамотності учнів; формуванню практичних навичок проведення безпечних експериментів; створенню молодих науковців, здатних впроваджувати сталий дизайн і технології; зближенню навчальної та виробничої спільнот; підвищенню шансів учнів на участь у міжнародних конкурсах і грантах, орієнтованих на сталі інновації.

Зелена хімія є ефективним освітнім та науковим інструментом для формування екологічного мислення молоді та реалізації Цілей сталого розвитку в рамках МАН. Методична модель, набір безпечних експериментів і критеріїв оцінювання, запропоновані у статті, забезпечують практичну базу для впровадження сталого підходу у дослідницьку діяльність учнів. Подальші кроки включають розробку навчальних модулів, створення бази даних спрощених оцінок життєвого циклу для типових виробів і проведення пілотних проєктів у регіональних відділеннях МАН.

Використані джерела

1. Green Chemistry: Theory and Practice / P. T. Anastas, J. C. Warner, Oxford University Press, 1998. 135 p.
2. The European Green Deal Striving to be the first climate-neutral continent. URL: <https://salo.li/a562E3c>.
3. CGR 2023. Circularity Gap Reporting Initiative - Home. URL: <https://www.circularity-gap.world/2023>.
4. Vânia G. Zuin, Ingo Eilks, Myriam Elschami and Klaus Kümmerer Education in green chemistry and in sustainable chemistry: perspectives towards sustainability Green Chem., The Royal Society of Chemistry, 2021, 23, 1594–1608
5. Зелена хімія для чистих хімічних технологій. Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмою «Хімічні технології та інженерія» спец. 161 Хімічні технології та інженерія / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Е. Чигиринець, Г. В. Сокольський, В. І. Воробйова, Т. С. Жук, О. С. Бережницька. – Електрон. текст. дані (1 файл: 8,49 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 306 с.
6. Іванішена Т.В. Реалізація ідей сталого розвитку при викладанні дисциплін хіміко-технологічної спрямованості у закладах вищої освіти/ Т.В. Іванішена, О. О. Трухіна // збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної/ онлайн-конференції «Тенденції і проблеми розвитку сучасної хімічної освіти», 28 жовтня 2022 року. – Івано-Франківськ: ХНУ, 2022. – с. -15-19
7. З.С.Черешня, Т.В.Іванішена, І.О.Підганюк. Зелені технології у переробці відходів соєвого виробництва/Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих вчених та студентів, 21 листопада 2024 р. – Хмельницький: ХНУ, 2024. – с.261-264.
8. Завдання та індикатори досягнення Цілей сталого розвитку в Україні на період до 2030 року. URL: <https://salo.li/a266402>.
9. Green and sustainable chemistry: framework manual URL: <https://salo.li/7118FfC>.
10. Про схвалення Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) URL: <https://salo.li/d8118AA>.
11. Sheldon, R. A. The E Factor 25 Years On: The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. Green Chemistry, 2017, 19, p. 4504-4512.
12. Martínez J, Cortés JF, Miranda R. Green Chemistry Metrics, A Review. Processes. 2022, 10(7), P.1274. URL: <https://doi.org/10.3390/pr10071274>.
13. Vaz CRS, Morais C, Pastre JC, Júnior GG. Teaching Green Chemistry in Higher Education: Contributions of a Problem-Based Learning Proposal for Understanding the Principles of Green Chemistry. Sustainability. 2025, 17(5) URL: <https://doi.org/10.3390/su17052004>.