

УДК 661:620

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.02

ПРИКЛАД СИНЕРГІЇ ПІДХОДІВ ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ ТА ЗЕЛЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**С. О. ПЕТРОВ¹, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО², С. А. КУЦЕНКО¹, Т. В. ФАЛАЛЄЄВА¹,
Ю. В. ПЕТРОВА³, К. О. МІНАКОВА⁴**

¹ кафедра органічного синтезу та фармацевтичних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

² кафедра передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

³ кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

⁴ кафедра фізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

* e-mail: serhii.petrov@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглядаються актуальні виклики сучасного світу, пов'язані з кліматичними змінами, забрудненням довкілля, виснаженням природних ресурсів та зростанням енергетичних потреб. У статті пропонуються нові підходи до виробництва, використання та утилізації хімічних продуктів та енергії, які були б сталі, ефективні, безпечні та конкурентоспроможні. Зелена хімія та зелена енергетика виступають як два важливих напрямки, які спрямовані на мінімізацію або усунення використання та утворення небезпечних речовин, використання відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та рекуперації, а також створення продуктів, які були б сумісні з принципами кругової економіки та сталого розвитку. Акцентовано увагу на тому, що зелена хімія та зелена енергетика не можуть бути розглянуті як ізольовані сфери, а повинні бути інтегровані в синергійний спосіб, щоб досягти більшої ефективності та стійкості. Матеріал представлено у трьох змістовних розділах: перший розділ присвячений зеленій хімії, другий розділ – зеленій енергетиці, а третій розділ – розглядає приклад синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості. У роботі досліджено один з варіантів синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики на прикладі одночасного рішення проблеми засмічення охолоджуючого ставка електростанції водоростями і використанням цих водоростей, як альтернативної, економічно вигідної сировини для виробництва біологічно-активних добавок та барвників. На прикладі запропонованого виробництва, було досліджено основні принципи, напрямки та приклади синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, а також зроблена оцінка переваг, викликів та перспективи такої синергії. Оцінка переваг та недоліків довела, що синергійний підхід до зеленої хімії та енергетики є ефективним, тому що він дозволяє досягати більшої економії ресурсів, зменшення викидів та відходів, покращення якості продуктів та збільшення конкурентоспроможності. Такий підхід також сприяє створенню інноваційних рішень, які враховують потреби сталого розвитку та кругової економіки. У результаті досліджень було виявлено, що інтеграція підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловість вимагає додаткових наукових досліджень та розвитку для вирішення ряду проблем та викликів. Тому в роботі акцентується увага на необхідності до активізації наукової, освітньої, державної та громадської діяльності, спрямованої на підтримку та розвиток синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, як одного з ключових факторів сталого розвитку України.

Ключові слова: зелена хімія; зелена енергетика; технологія виробництва; відновлювальна сировина; БАД; барвники.

AN EXAMPLE OF THE SYNERGY OF THE APPROACHES OF GREEN CHEMISTRY AND GREEN ENERGY

**S. PETROV¹, D. DANYLCHENKO², S. KUTSENKO¹, T. FALALIEIEVA¹,
Y. PETROVA³, K. MINAKOVA⁴**

¹ Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Electrical Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

³ Foundry Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

⁴ Physics Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The current challenges of the modern world related to climate change, environmental pollution, depletion of natural resources, and growing energy needs are examined. New approaches to the production, use and disposal of chemical products and energy that would be sustainable, efficient, safe and competitive are proposed. Green chemistry and green energy are two important areas that are aimed at minimizing or eliminating the use and generation of hazardous substances, the use of renewable energy sources, the improvement of energy efficiency and recovery, as well as the creation of products that would be compatible with the principles of a circular economy and sustainable development. The article focuses on the fact that green chemistry and green energy cannot be considered as isolated areas, but must be integrated in a synergistic way to achieve greater efficiency and sustainability. The article consists of three substantive sections: the first section is devoted to green chemistry, the second section - on green energy, and the third section - considers an example of the synergy of green chemistry and green energy approaches in industry. In the work, one of the options for the synergy of the approaches of green chemistry and green energy is investigated, using the example of a simultaneous solution to the problem of clogging the cooling pond of the power plant with algae and the use of these algae as an

alternative, economically profitable raw material for the production of biologically active additives and dyes. In this article, on the example of the proposed production, the main principles, directions and examples of synergy of green chemistry and green energy approaches in industry were investigated, as well as an assessment of the advantages, challenges and prospects of such synergy was made. The assessment of advantages and disadvantages proved that a synergistic approach to green chemistry and energy is effective because it allows to achieve greater savings of resources, reduction of emissions and waste, improvement of product quality and increase of competitiveness. This approach also contributes to the creation of innovative solutions that take into account the needs of sustainable development and the circular economy. As a result of the work, it was found that the integration of green chemistry and green energy approaches in industry requires additional scientific research and development to solve a number of problems and challenges. Therefore, the work emphasizes the need to intensify scientific, educational, state and public activities aimed at supporting and developing the synergy of green chemistry and green energy approaches in industry, as one of the key factors of sustainable development of Ukraine.

Keywords: green chemistry; green energy; production technology; renewable raw materials; nutritional supplements; dyes

Вступ

Сучасний світ зіткнувся з небувалими викликами, пов'язаними з кліматичними змінами, забрудненням довкілля, виснаженням природних ресурсів та зростанням енергетичних потреб. Ці виклики вимагають нових підходів до виробництва, використання та утилізації хімічних продуктів та енергії, які були б сталі, ефективні, безпечні та конкурентоспроможні. У цьому контексті, зелена хімія та зелена енергетика виступають як два важливих напрямки, які спрямовані на мінімізацію або усунення використання та утворення небезпечних речовин, використання відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та рекуперації, а також створення продуктів, які були б сумісні з принципами кругової економіки та сталого розвитку.

Однак, зелена хімія та зелена енергетика не можуть бути розглянуті як ізольовані сфери, а повинні бути інтегровані в синергійний спосіб, щоб досягти більшої ефективності та стійкості. Синергія підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості означає використання зеленої хімії як інструменту для зменшення споживання енергії, викидів та відходів в хімічних процесах, а також використання зеленої енергетики як джерела для забезпечення хімічних процесів відновлюваною, чистою та доступною енергією. Така синергія може призвести до покращення якості продуктів, зниження вартості виробництва, збільшення конкурентоспроможності, а також до позитивного впливу на навколишнє середовище та суспільство.

Аналіз досліджень і публікацій

Зелена енергетика – це напрямок енергетики, який передбачає використання відновлюваних джерел енергії, енергоефективності, рекуперації та екологічності. Україна має ряд стратегій, підходів та документів, які спрямовані на підтримку та розвиток зеленої енергетики, таких як:

проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року [1], який презентовано Міністерством енергетики та захисту довкілля України у січні 2020 року. Цей документ визначає національну ціль з енергоефективності, частку відновлюваних джерел енергії, зменшення

видобувних галузей та вугільних ТЕС, перехід до кругової економіки та інтеграцію енергетичних ринків України з європейськими;

Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року [2], який затверджено Кабінетом Міністрів України у грудні 2021 року. Цей документ встановлює національну ціль з енергоефективності до 2030 року, а саме: первинне та кінцеве споживання енергії в Україні у 2030 році не повинне перевищувати відповідно 91 468 тис. та 50 446 тис. тонн нафтового еквіваленту. Також Національним планом встановлюються та описуються низка горизонтальних та секторальних заходів щодо досягнення зазначеної мети (в сферах житлових та бюджетних будівель, транспорту, промисловості, енергетики);

огляд Стратегії енергетичної безпеки України від Європейсько-Українського Енергетичного Агентства (ЄУЕА) [3], який опубліковано у лютому 2020 року. Цей документ аналізує сильні та слабкі сторони, можливості та загрози для енергетичної безпеки України, а також надає рекомендації щодо забезпечення стабільності, надійності, доступності та сталості енергетичного сектору України.

Зелена хімія та технології – це напрямок, який спрямований на зменшення або усунення використання та генерації небезпечних речовин у хімічних процесах та продуктах. Це сприяє збереженню ресурсів, захисту довкілля та забезпеченню здоров'я людей.

У світі існує багато стратегій, підходів та документів, що підтримують та розвивають «зелену» хімію та технології. Одним з найважливіших є Цілі сталого розвитку (ЦСР), які були ухвалені Організацією Об'єднаних Націй у 2015 році [4] як універсальний заклик до дій щодо скорочення бідності, захисту планети та забезпечення миру та процвітання для всіх людей. ЦСР містять 17 цілей та 169 завдань, які враховують різні аспекти сталого розвитку, включаючи «зелену» хімію та технології. Наприклад, Ціль 7 передбачає забезпечення доступу до відновлюваних джерел енергії, Ціль 9 – побудову стійкої інфраструктури та сприяння інноваціям, Ціль 12 – впровадження відповідального споживання та виробництва, Ціль 13 – боротьбу зі зміною клімату, Ціль 14 – збереження морських екосистем, Ціль 15 – збереження екосистем суходолу.

Таким чином ми бачимо, що в глобальній ініціативі «Зелена» енергетика та «Зелена» хімія та технології невід'ємно пов'язані для досягнення поставлених цілей.

Іншим цікавим документом з цієї теми є доповідь Програми розвитку ООН (ПРООН) про соціальні та економічні переваги глобальної «зеленої революції» [5], яка аналізує як посилені короткострокові кліматичні зобов'язання, відомі як національно визначені внески (НВВ), так і довгострокові стратегії, в яких країни описують свої плани щодо досягнення нульового рівня викидів. У доповіді представлені підходи, що застосовуються у п'яти країнах, які ведуть процес справедливого переходу: Антигуа та Барбуда, Коста-Ріка, Індія, Сербія та Південна Африка. У доповіді також визначено п'ять ключових способів, за допомогою яких справедливий перехід може допомогти в реалізації Паризької угоди.

Незважаючи на те, що питання пов'язані з «Зеленою» енергетикою та «Зеленою» хімією та технологіями обговорюються та плануються на найвищих рівнях, а стратегії по їх впровадженню носять характер державних та міжнародних політик, на жаль в реальному житті та на виробництвах ми бачимо дуже небагато прикладів реалізації цих напрямків в синергії. Тому обговорення конкретних прикладів та ідей синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики є вкрай важливими, як для сталого розвитку економіки України так і глобального руху в цьому напрямку.

Мета роботи

Метою цієї статті є розгляд основних принципів, напрямків та прикладів синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, а також висвітлення переваг, викликів та перспектив такої синергії. Стаття складається з трьох змістовних розділів: перший розділ присвячено зеленій хімії, другий розділ – зеленій енергетиці, а третій розділ – розглянуто приклад синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості. У кінці статті наведено висновки та рекомендації щодо подальшого розвитку та впровадження синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості.

Виклад основного матеріалу та аналіз отриманих результатів

У роботі досліджено один з варіантів синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики на прикладі одночасного рішення проблеми засмічення охолоджуючого ставка електростанції водоростями і використанням цих водоростей, як альтернативної, економічно вигідної сировини для виробництва біологічно-активних добавок та барвників. Перед оглядом запропонованого синергічного рішення зупинимося на огляді принципів зеленої хімії та

зеленої енергетики.

Зелена хімія та її принципи.

Зелена хімія, або екологічна хімія, є науковим підходом, який має на меті створювати хімічні продукти і процеси, які мінімізують використання та утворення небезпечних речовин. Вона базується на принципі охорони навколишнього середовища та здоров'я людини, акцентуючи на розробці інноваційних методів, які зменшують або виключають використання та виробництво шкідливих матеріалів, речовин та продуктів. Зелена хімія прагне досягти ефективності та стійкості протягом усього життєвого циклу хімічних продуктів, враховуючи їхній вплив на економіку, суспільство та екосистеми.

Зелена хімія з'явилася у 1990-х роках як відповідь на зростаючу свідомість про негативні наслідки хімічної промисловості для довкілля та здоров'я людей. Одним із засновників цієї галузі є американський хімік Пол Анастас, який ініціював Програму досліджень запобіганню забруднення шляхом використанням альтернативних технологій під егідою Агентства з охорони навколишнього середовища США. У 1998 році він разом з Джоном Ворнером висунув 12 принципів зеленої хімії [6, 7], які стали основою для розробки та впровадження стійких хімічних продуктів і процесів.

12 принципів зеленої хімії є наступними:

1. запобігайте відходам, де це тільки можливо;
2. сприяти розвитку «атомної економії», що означає максимізувати включення всіх матеріалів, які використовуються в процесі, у кінцевий продукт;
3. синтезуйте менш небезпечні хімічні речовини;
4. розробляйте більш безпечні, не шкідливі речовини;
5. в хімічних процесах використовуйте безпечні розчинники та допоміжні речовини;
6. розробляйте енергозберігаючі хіміко-технологічні процеси;
7. використовуйте поновлювальні джерела сировини та енергії;
8. уникайте та/або зменшуйте отримання побічних речовин;
9. використовуйте каталізатори;
10. розробляти продукти, які мають мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище під час використання та утилізації;
11. розробляти та впроваджувати автоматизовані методи аналізу та контролю із метою мінімізації утворення побічних, незапланованих продуктів;
12. розробляти та впроваджувати безпечніші форми хімічних речовин, технологій та процесів для запобігання нещасних випадків та нанесення шкоди здоров'ю людини.

Ці принципи сприяють розвитку зеленої хімії як нового напрямку в науці, який відкриває нові можливості для інновацій та покращення якості життя. Зелена хімія застосовується у різних галузях

промисловості, таких як фармацевтика, сільське господарство, матеріалознавство, енергетика, косметика та інші. Зелена хімія також сприяє реалізації Цілей сталого розвитку ООН, які передбачають забезпечення екологічної, соціальної та економічної стійкості для всіх людей. Зелена хімія є не тільки науковою дисципліною, але й філософією, яка спонукає хіміків та інженерів до відповідального та етичного ставлення до хімії та її впливу на світ.

Зелена енергетика та її принципи.

Зелена енергетика – це концепція, яка спрямована на використання відновлюваних джерел енергії з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Принципи зеленої енергетики включають в себе:

1. Відновлювані джерела енергії: використання енергії, яка постійно відновлюється в природі, такі як сонячна, вітрова, гідроелектроенергія, біомаса та геотермальна енергія.

2. Ефективність: зелена енергетика сприяє підвищенню енергоефективності, зменшенню витрат та оптимізації процесів виробництва енергії.

3. Мінімальний вплив на навколишнє середовище: зелена енергетика прагне зменшити негативний вплив на природу, зменшуючи викиди парникових газів, водних та повітряних забруднень.

4. Інновації та розвиток технологій: розвиток новітніх технологій і постійна інноваційна діяльність в галузі зеленої енергетики дозволяють забезпечувати більш ефективно та стійке виробництво енергії.

5. Енергетична безпека: зелена енергетика сприяє зменшенню залежності від традиційних джерел енергії та забезпечує більшу енергетичну безпеку.

6. Сприяння сталому розвитку: зелена енергетика допомагає забезпечити потреби сучасного суспільства, не завдаючи шкоди природі та зберігаючи ресурси для майбутніх поколінь.

7. Глобальна співпраця: співпраця між країнами та міжнародні ініціативи грають ключову роль у розвитку зеленої енергетики, оскільки проблеми зміни клімату та енергетичної безпеки потребують глобальних рішень.

8. Залучення громадськості: інформування та залучення громадськості є важливим аспектом, оскільки підтримка населення є ключовою для успіху переходу до зеленої енергетики.

Ці принципи спрямовані на створення сталого та екологічно чистого енергетичного майбутнього, а також як ключовий елемент впровадження концепції розподіленої генерації [8].

Принципи та підходи зеленої хімії та зеленої енергетики сильно переплітаються між собою, що дозволяє розглядати їх синергії та доповнення одна одної для сталого розвитку людства. Синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики на прикладі одночасного рішення проблеми засмічення охолоджуючого ставка електростанції водоростями і використанням цих водоростей, як альтернативної,

економічно вигідної сировини для виробництва біологічно-активних добавок та барвників.

Заростання охолоджуючого ставка електростанції водоростями може призвести до зниження ефективності енергогенерації, оскільки водорості поглинають тепло, зменшують пропускну здатність труб та утворюють біологічні відкладення на поверхнях теплообмінників. За деякими оцінками, заростання водоростями може зменшити ефективність енергогенерації. Заростання охолоджуючого ставка електростанції водоростями також може мати негативний вплив на екологію, оскільки водорості сприяють евтрофікації водойми, збільшують ризик розвитку токсичних цвітіння та зменшують біорізноманіття. Для запобігання та контролю заростання охолоджуючого ставка електростанції водоростями можна використовувати різні методи, такі як механічне очищення, хімічна обробка, біологічна боротьба, ультразвукова обробка та інші.

Однією з розповсюджених рослин водоростей, що спричиняють таку проблему є Рдест (пістія) – це тропічна водна рослина, яка може стати інвазивною та заростати водойми в помірних та субтропічних регіонах. Рдест може пригнічувати ріст інших водних рослин, зменшувати кількість кисню в воді, перешкоджати навігації, рибальству та водопостачанню, а також створювати умови для розвитку комах-векторів хвороб [9]. Проблема заростання водойм США рдестом стала актуальною в 70-х роках минулого століття, коли рдест поширився по південним штатам, таким як Флорида, Техас, Луїзіана, Алабама, Джорджія та інші [10]. Зараз рдест вважається однією з найбільш шкідливих водних рослин у США, яка потребує ефективних методів контролю та ліквідації. Для боротьби з поширенням рдесту в США використовуються різні методи, такі як: механічне видалення рдесту за допомогою спеціальних машин, що збирають і вивозять рослини з водойми; хімічна обробка води гербіцидами, що знищують рдест, але можуть мати небажані побічні ефекти для інших організмів; біологічна боротьба з використанням природних ворогів рдесту, таких як риби, молоски, комахи та інші рослини, що конкурують з рдестом за ресурси; ультразвукова обробка води, що впливає на фотосинтез та ріст рдесту, а також на його розмноження.

Більшість із зазначених методів боротьби з цією проблемою зосереджені на знищенні водорості. Якщо ж дивитись на цю ситуацію через призму питання ресурсозбереження та використання відновлювальних ресурсів, то можна зробити висновки, що вищевикладені методи їм не відповідають. Підтвердженням цього твердження можуть слугувати дослідження, що відбуваються в Світі, серед інших можна виділити наведені наукові роботи [11, 12, 13].

Рішенням проблеми повинно бути не знищення, а використання водорості, як біологічної сировини для виробництва. Рдест (рис. 1), як біологічна сировина для виробництва цікавий і цінний

тому, що на даний момент корисно не використовується. Зважаючи на наявність великої кількості незатребуваної сировини нами було поставлено завдання розробити проект з переробки водоростей рдест і отриманням з нього продуктів: біологічно активної добавки, що містить хлорофіл (БАД «Chlorophyll») та харчового барвника E140.



Рис. 1 – Заростання річок рдестом

Хлорофіл можна розглядати як похідні протопорфірину - порфірину з двома карбоксильними заступниками, вільними або етерифікованими (рис. 2).

У вищих рослинах міститься дві форми хлорофілу - хлорофіл А і хлорофіл Б. При загальному вмісті хлорофілів 0,7-1,1 г на 1 кг зеленої маси рослин співвідношення хлорофілів А і Б зазвичай становить 3:1 (залежно від освітленості, наявності добрива і інших факторів може коливатися від 2:1 до 3,4:1, що використовується для контролю над розвитком рослин).

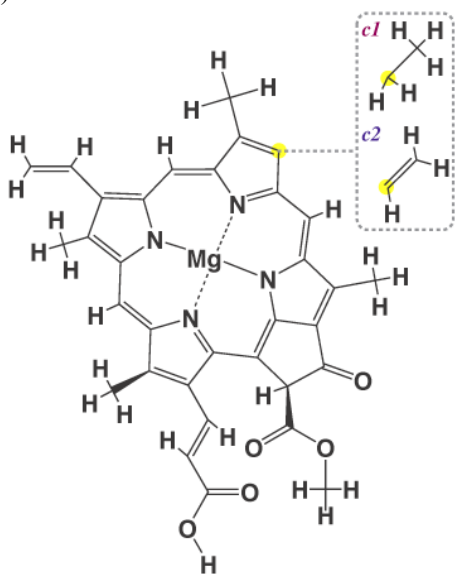


Рис. 2 – Формула хлорофілу

Завдяки своїм спектральним властивостям та природньому походженню речовина хлорофіл широко застосовується, як натуральний барвник, в тому числі він має власний шифр харчової добавки – E140. Хлорофіл А поглинає світло у фіолетовій, блакитній та червоній частинах спектру, відбиваючи в основному зелений колір, що і надає йому характерного забарвлення. Хлорофіл Б – жовтого кольору і поглинає світло переважно у синій частині спектру.

На сьогоднішній день відомо кілька способів промислового виділення хлорофілу із рослинної сировини. Найбільш поширеною сировиною для промислового отримання є люцерна (багаторічна бобова рослина), рідше – конюшина та петрушка. Недоліком відомих способів отримання хлорофілу є використання якості екстрагенту етилового спирту, який не забезпечує максимального виділення хлорофілу з прісноводної трави. Також з часом хлорофіл в етанолі утворює аломерні форми, які не є стійкими в процесі зберігання. У нашому проекті для отримання хлорофілу використовується альтернативний вид економічно вигідної сировини – водорості, які не вимагають посіву та догляду. Найважливішими перевагами даного виду сировини є те, що рдест поширений на всіх континентах крім Антарктиди, має високу швидкість росту і хорошу зимостійкість. Слід укласти, що збирання та заготівля водорості допомагають покращити екосистему водойм, а також розширити сировинну базу регіону шляхом комплексної переробки сировини у виробництві БАД та барвника.

Основним цільовим продуктом переробки водоростей є БАД «Chlorophyll», який являє собою желатинові капсули, наповнені хлорофілом і подрібненим порошком водоростей. Цей БАД має деякі важливі фармакологічні властивості:

- допомагає підвищити гемоглобін у крові;
- посилює імунну функцію організму;
- має протизапальну та антибактеріальну дію;
- запобігає росту бактерій у ранах;
- очищає кров, виводить токсини;
- підтримує здорову кишкову флору і т.д.

Слід зазначити, що продукти на основі хлорофілу популярні у світі. Аналогічний БАД випускається у деяких країнах (рис. 3). Наприклад, у США його випускають кілька великих компаній (Paradigma, NSP). У нашій країні виробництво цього продукту відсутня.

Так як в Україні виробництво подібних продуктів відсутнє, але користується популярністю в Світі, можна зробити висновок, що пропонуваний продукт БАД «Chlorophyll» затребуваний на ринку. Також паралельно з основним продуктом планується випуск барвників. Актуальність барвника полягає в тому, що він досить часто використовується в харчовій промисловості та відомий як добавка E140. В Україні він також не випускається, а імпортується з Німеччини та Китаю. Виходячи з чого можна зробити висновок, що виробництво барвника в нашому регіоні так само буде затребуваним.



Рис. 3 – БАД на основі хлорофілу в товарній формі

Технологія виділення хлорофілу, а також отримання цільових продуктів включає наступні основні стадії: заготівля водорості (сушіння, подрібнення), екстракція сумішшю гексану та етанолу, відгін розчинника та сушіння. Слід зазначити, що разом із хлорофілом у незначній мірі екстрагуються каротиноїди, що підвищує цінність нашого продукту, як БАД. Отриманий сухий порошок перемелюють та капсулюють.

Стадія заготівлі сировини відбувається у літній період – з початку червня до кінця серпня. Збирають водорість у гирлах річок, вводиомах, а також пропонується збирати в охолодних придах електростанцій. Далі її подрібнюють, сушать, відправляють на зберігання для подальшої екстракції.

Із жмиху, що залишиться після процесу екстракції запропановано виготовлення паливних пелет.

Структурна схема виробництва хлорофілу зображено на рисунку 4.

На основі блок-схеми була розроблена принципова технологічна схема виробництва хлорофілу та сировини для паливних пелет [14].

Запропонована технологія задовольняє одразу декільком принципам зеленої хімії. Серед них: третій, четвертий, п'ятий, восьмий та десятий принципи зеленої хімії.

Ключовою (лімітуючою) складовою формування собівартості запропонованих продуктів є вартість тепла необхідного для процесів екстракції, сушки та упарювання. У зв'язку з цим, виходячи з потреби мінімізації цих видатків пропонується використання тепла, яке віддається електростанцією, для підігріву води, повітря або пари, які використовуються для технологічних, промислових або побутових потреб. Тобто поєднати виробничі потреби з процесами направленними на зменшення теплових втрат електростанцій за рахунок використання рекуперації та ефективного відведення тепла (це спосіб підвищення енергоефективності та

зниження викидів парникових газів) [15]. Рекуперація – це процес, який полягає у використанні тепла, яке віддається електростанцією, для підігріву інших процесів або об'єктів. Ефективне відведення тепла – це процес, який полягає у зменшенні теплових втрат від електростанції до навколишнього середовища. Такий підхід повністю задовольняє шостому принципу зеленої хімії щодо запровадження енергозберігаючих технологій на виробництвах.



Рис. 4 – Структурна блок-схема виробництва хлорофілу та паливних пелет

Із метою відповідності першому та сьомому принципам зеленої хімії по мінімізації кількості відходів та використанню відновлювальних ресурсів пропонується створення паливних пелет зі жмиху після екстракції. Такий підхід має ряд декілька переваг, таких як наприклад:

- зниження витрат на утилізацію жмиху, який може бути шкідливим для навколишнього середовища, якщо не використовується;

- зменшення залежності від інших видів палива, таких як газ, нафта, вугілля або деревина;

- зменшення викидів парникових газів, оскільки пелети зі жмиху мають низький вміст вуглецю та використовують відновлювану біомасу.

Створення паливних пелет зі жмиху після екстракції – це процес, який полягає у перетворенні жмиху на паливні гранули, які можуть бути використані для опалення. Цей процес включає в себе такі стадії: сушіння жмиху до вологості 10-15%; розмелювання жмиху до однорідної фракції; гранулювання жмиху за допомогою преса-гранулятора, який стискає жмих під високим тиском та температурою, формуючи гранули; охолодження та упаковка пелет для зберігання та транспортування.

Таким чином, у результаті нашої роботи:

- запропоновано комплексне рішення щодо покращення екосистеми та ефективності роботи охолоджувального водоймища електростанції;

- запропоновано варіант організації ефективного маловідходного виробництва, що відповідає одночасно восьми з дванадцяти принципам зеленої хімії в синергії з принципами зеленої енергетики;

- розширено сировинну базу для виробництва БАД, харчового барвника та паливних пелет.

Висновки

У статті на прикладі запропонованого виробництва досліджено основні принципи, напрямки та приклади синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, а також оцінено переваги, виклики та перспективи такої синергії. Доведено, що синергетичний підхід до зеленої хімії та енергетики є ефективним, тому що він дозволяє досягати більшої економії ресурсів, зменшення викидів та відходів, покращення якості продуктів та збільшення конкурентоспроможності. Такий підхід також сприяє створенню інноваційних рішень, які враховують потреби сталого розвитку та кругової економіки.

Встановлено, що синергія підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості потребує подальших досліджень та розвитку, щоб вирішити деякі проблеми та виклики, такі як:

- недостатня нормативно-правова база, фінансова підтримка та стимулювання зелених ініціатив в Україні;

- низька інформованість та зацікавленість громадськості, споживачів та промисловців у зеленій хімії та енергетиці;

- обмежена доступність та якість відновлювальної сировини та енергоресурсів для зелених технологій та виробництв;

- недостатня наукова база, кадровий потенціал

та інфраструктура для проведення досліджень та впровадження синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості.

Таким чином, закликаємо до активізації наукової, освітньої, державної та громадської діяльності, спрямованої на підтримку та розвиток синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості як одного з ключових факторів сталого розвитку України.

Список літератури

1. Презентовано проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Кабінет Міністрів України (kmu.gov.ua). URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/prezentovano-proekt-konceptsiyi-zelenogo-energetichnogo-perehodu-ukrayini-do-2050-roku> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
2. Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року / Держенергоефективності України (saec.gov.ua). URL: <https://saec.gov.ua/uk/content/npdee-2030> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
3. Огляд Стратегії енергетичної безпеки України від ЄУЕА – EUEA - European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org). URL: <https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/novyny-rynku/oglyad-strategiyi-energetychnoyi-bezpeky-ukrayiny-vid-yeuea/> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
4. Цілі сталого розвитку UNDP. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
5. How Just Transition can help deliver the Paris Agreement / Climate Promise (undp.org). URL: <https://climatepromise.undp.org/research-and-reports/how-just-transition-can-help-deliver-paris-agreement> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
6. Anastas P. T., Warner J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. By permission of Oxford University Press. New York, 1998. P. 30.
7. Тихомірова Ф. А. Зелена хімія: нова хімічна філософія. *Вісник ОНУ. Хімія*. 2015. Т. 20, вип. 2 (54). С. 93–98. doi:10.18524/2304-0947.2015.2(54).50636.
8. Данильченко Д. О., Федорчук С. О., Потривай А. Е., Петров С. О., Мінакова К. О. Зелена енергетика як ключовий елемент впровадження концепції розподіленої генерації. *Електротехніка та електроенергетика*. 2023. № 4. С. 17–28. doi:10.15588/1607-6761-2023-4-2.
9. Якубенко Б. Є., Царенко П. М., Алейніков І. М., Шабарова С. І., Машковська С. П., Дядюша Л. М., Тертишний А. П. *Ботаніка з основами гідроботаніки (водні рослини України): підручник для студентів класичних та аграрних університетів*. Київ: Фітосоціоцентр, 2011. 535 с.
10. Терешко О. А., Жердецький Д. І., Коржов Є. І. Загальні аспекти впливу надлишкового розвитку гідрофітоценозів на екосистему водойми. Сучасний стан водних біоресурсів та аквакультури України і Світу. *Матеріали наук.-практ. конф. молодих вчених з міжнародною участю; зб. наук. праць (Херсон, 31 жовт. 2023 р.)*. Херсон. ХДАЕУ, 2023. 152 с.
11. Francavilla M., Intini S., Monteleone M. Designing an Integrated Technological Platform Centered on

- Microalgae to Recover Organic Waste and Obtain Multiple Bioproducts. *Papers of the 24th European Biomass Conference: Setting the Course for a Biobased Economy*. 2016. P. 294–299.
12. Lozano P., García-Verdugo E. From green to circular chemistry paved by biocatalysis. *Green Chemistry*. 2023. P. 7041–7057.
 13. Song B., Lin R. C., Lam C. H., Wu H., Tsui T. H., Yu Y. Recent advances and challenges of inter-disciplinary biomass valorization by integrating hydrothermal and biological techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2021. doi: 10.1016/j.rser.2020.110370.
 14. Папакіна О. О., Петров С. О., Кричківська Л. В. Розробка технології отримання хлорофілу і продуктів на його основі. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 44(1153). С. 56–60.
 15. Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П. Г. та ін. *Основи ефективного використання електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств: навч. посіб.* Кіровоград. КНТУ, 2015. 287 с.
 7. Tykhomirova F. A. Zelena khimiya: nova khimichna filosofiya [Green Chemistry: A New Chemical Philosophy]. *Bulletin ONU. Khimiya*, 2015, Vol. 20, Iss. 2 (54), pp. 93–98, doi:10.18524/2304-0947.2015.2(54).50636.
 8. Danylchenko D. O., Fedorchuk S. O., Potryvay A. E., Petrov S. O., Minakova K. O. Zelena enerhetyka yak klyuchovyy element vprovadzhennya kontseptsiyi rozpodilenoї heneratsiyi [Green Energy as a Key Element in Implementing the Concept of Distributed Generation]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2023, no. 4, pp. 17–28, doi: 10.15588/1607-6761-2023-4-2.
 9. Yakubenko B. Y., Tsarenko P. M., Aleynikov I. M., Shabarova S. I., Mashkovska S. P., Dyadyusha L. M., Tertyshnyy A. P. *Botanika z osnovamy hidrobotaniky (vodni roslyny Ukrainy): pidruchnyk dlya studentiv klasychnykh ta ahrarnykh universytetiv. [Botany with Basics of Hydrobotany (Aquatic Plants of Ukraine): Textbook for Students of Classical and Agricultural Universities]*. Kyiv. Fitosotsiotsentr, 2011. 535 p.
 10. Tereshko O. A., Zherdetsky D. I., Korzhov Ye. I. Zahal'ni aspekty vplyvu nadlyshkovoho rozvytku hidrofitotsenoziv na ekosystemu vodoymy [Botany with Basics of Hydrobotany (Aquatic Plants of Ukraine): Textbook for Students of Classical and Agricultural Universities]. Suchasnyy stan vodnykh bioresursiv ta akvakul'tury Ukrainy i Svit. *Materialy nauk.-prakt. konf. molodykh vchenykh z mizhnarodnoyu uchastyu; zb. nauk. prats [Current State of Water Bioresources and Aquaculture in Ukraine and the World: Proceedings of the Sci.-Practical Conf. of Young Scientists with International Participation; Collected Works]*. Kherson. KHDAEU, 2023. 152 p.

References (transliterated)

1. Prezentovano proekt Kontseptsiyi «zelenoho» enerhetychnoho perekhodu Ukrainy do 2050 roku. Kabinet Ministriv Ukrainy (kmu.gov.ua) [Presentation of the Concept of Ukraine's "Green" Energy Transition by 2050. Cabinet of Ministers of Ukraine (kmu.gov.ua)]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/prezentovano-proekt-koncepciyi-zelenogo-energetichnogo-perehodu-ukrayini-do-2050-roku> (accessed 02.02.2024).
2. Natsional'nyy plan diy z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku Derzhenerhoefektyvnosti Ukrainy (sae.gov.ua). [National Action Plan on Energy Efficiency for the Period up to 2030. State Agency on Energy Efficiency of Ukraine (sae.gov.ua)]. Available at: <https://sae.gov.ua/uk/content/npdee-2030> (accessed 02.02.2024).
3. Ohlyad Stratehiyi enerhetychnoyi bezpeky Ukrainy vid YEUEA – EUEA – European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org) [Overview of the Energy Security Strategy of Ukraine from EUEA – European-Ukrainian Energy Agency (euea-energyagency.org)]. Available at: <https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/novyny-rynku/oglyad-strategiyi-energetychnoyi-bezpeky-ukrayiny-vid-yeuea/> (accessed 02.02.2024).
4. Tsili staloho rozvytku UNDP [UNDP Sustainable Development Goals]. Available at: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> (accessed 02.02.2024).
5. How Just Transition can help deliver the Paris Agreement. Climate Promise (undp.org). Available at: <https://climatepromise.undp.org/research-and-reports/how-just-transition-can-help-deliver-paris-agreement> (accessed 02.02.2024).
6. Anastas P. T., Warner J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. By permission of Oxford University Press. New York, 1998, p. 30.
11. Francavilla M., Intini S., Monteleone M. Designing an Integrated Technological Platform Centered on Microalgae to Recover Organic Waste and Obtain Multiple Bioproducts. *Papers of the 24th European Biomass Conference: Setting the Course for a Biobased Economy*, 2016, pp. 294–299.
12. Lozano P., García-Verdugo E. From green to circular chemistry paved by biocatalysis. *Green Chemistry*, 2023, pp. 7041–7057.
13. Song B., Lin R. C., Lam C. H., Wu H., Tsui T. H., Yu Y. Recent advances and challenges of inter-disciplinary biomass valorization by integrating hydrothermal and biological techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110370.
14. Papakina O. O., Petrov S. O., Krychivska L. V. Rozrobka tekhnolohiyi otrymannya khlorofilu i produktiv na yoho osnovi. Innovatsiyni doslidzhennya u naukovykh robotakh studentiv [Development of Chlorophyll Extraction Technology and Products Based on It. Innovative Research in Student Scientific Papers]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2015, no. 44 (1153), pp. 56–60.
15. Solovey O. I., Rozen V. P., Plyeshkov P. H. ta in. *Osnovy efektyvnoho vykorystannya elektrychnoyi enerhiyi v systemakh elektrospozhyvannya promyslovykh pidpryyemstv: navch. posib. [Fundamentals of efficient electricity usage in industrial enterprise electrical consumption systems: a Study Guide]*. Kirovohrad. KNTU, 2015. 287 p.

Відомості про авторів (About authors)

Петров Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6500-5310; e-mail: serhii.petrov@khpi.edu.ua.

Petrov Serhii – Ph.D, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6500-5310; e-mail: serhii.petrov@khpi.edu.ua.

Данильченко Дмитро Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7912-1849; e-mail: dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua.

Danylchenko Dmytro – Ph.D, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Electrical Power Transmission Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7912-1849; e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua.

Куценко Сергій Анатолійович – доктор фармацевтичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0005-7194-0707; e-mail: serhii.kutsenko@khpi.edu.ua.

Kutsenko Serhii – Doctor of science, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0005-7194-0707; e-mail: serhii.kutsenko@khpi.edu.ua.

Фалалєєва Тетяна Васи́лівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0021-4917; e-mail: falaleevatatana7@gmail.com.

Falalieieva Tetiana – Ph.D, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0021-4917; e-mail: falaleevatatana7@gmail.com.

Петрова Юлія Володимирівна – Ph.D, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри ливарного виробництва; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8184-906X; e-mail: yuliia.petrova@khpi.edu.ua.

Petrova Yuliia – Ph.D, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer of the Foundry Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8184-906X; e-mail: yuliia.petrova@khpi.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua.

Minakova Kseniia – Ph.D, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Physics Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Петров С. О., Данильченко Д. О., Куценко С. А., Фалалєєва Т. В., Петрова Ю. В., Мінакова К. О. Приклад синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 11-19. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.02.

Please cite this article as:

Petrov S., Danylchenko D., Kutsenko S., Falalieieva T., Petrova Y., Minakova K. An example of the synergy of the approaches of green chemistry and green energy. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 11–19, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.02.

*Надійшла (received) 20.01.2024
Прийнята (accepted) 12.03.2024*