

УДК 504.1:[633.1:631.563.2

DOI

Ольга КАРАЇМ

кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-1722-4110**Лариса ЧЕРЧИК**

доктор економічних наук, професор, професор кафедри менеджменту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-3901-216X**Володимир КАРАЇМ**

аспірант, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0003-4053-8019

Бібліографічний опис статті: Караїм, О., Черчик, Л., Караїм, В. (2025). Роль модернізації зерносушильних комплексів у декарбонізації агросфери. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 41–50, doi:

РОЛЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗЕРНОСУШИЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ АГРОСФЕРИ

Метою статті є аналіз техноекоекологічних аспектів функціонування зерносушильних комплексів в агросфері в контексті формування вуглецевого сліду та шляхів зниження викидів в атмосферне повітря як складової переходу до низьковуглецевої економіки.

Методи. У дослідженні застосовано міждисциплінарний оглядовий підхід із використанням аналітичних матеріалів наукових публікацій із баз Scopus і Web of Science, методичних рекомендацій, принципів оцінки життєвого циклу та енергетичного аналізу. Проведено порівняння традиційних та альтернативних технологій сушіння зерна з урахуванням енергоспоживання, рівня викидів та потенціалу декарбонізації.

За результатами дослідження підтверджено, що процес сушіння зерна є одним із найбільш енергоємних етапів післязбиральної обробки зернових культур, зумовлюючи значне споживання викопного палива та формування відповідного вуглецевого сліду, що супроводжується значними обсягами CO₂, CO та твердих частинок PM₁₀ і PM_{2,5}. Установлено, що переважна частина традиційних зерносушильних комплексів не має ефективних систем очищення викидних газів і характеризується надмірним енергоспоживанням, що суперечить цілям декарбонізації. Обґрунтовано перспективність впровадження альтернативних енергетичних рішень – біомаси, теплових насосів, сонячної енергії – а також сучасних технологій фільтрації та каталітичного допалювання газів. Зазначено важливість оцінки життєвого циклу як інструменту виявлення «вуглецево вразливих» етапів та формування стратегій переходу до низьковуглецевої економіки в агросфері.

Висновки. Ефективне зменшення впливу сушильних процесів на довкілля є важливою умовою екологізації агропромислового виробництва. Впровадження енергоощадних та низьковуглецевих технологій, зокрема через модернізацію сушильного обладнання й перехід на відновлювані джерела енергії, є стратегічно важливим для формування сталого та кліматично нейтрального сільського господарства.

Ключові слова: зерносушильні комплекси, викиди, вуглецевий слід, сталий розвиток, низьковуглецева економіка, декарбонізація, аграрне виробництво, агросфера.

Olha KARAIM

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-1722-4110

Larysa CHERCHYK

Doctor of Economics Sciences, Professor, Professor of Department of Management, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-3901-216X

Volodymyr KARAIM

Post-graduate Student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-4053-8019

Bibliographic description of the article: Karaim, O., Cherchyk, L., Karaim, V. (2025). Rol modernizatsii zernosushylnykh kompleksiv u dekarbonizatsii ahrosfery [The role of grain dryer modernization in the decarbonization of the agricultural domain]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 41–50 doi:

THE ROLE OF GRAIN DRYER MODERNIZATION IN THE DECARBONIZATION OF THE AGRICULTURAL DOMAIN

Objective. The aim of this article is to analyze the techno-environmental aspects of grain drying complexes functioning in the agro-industrial sector in the context of carbon footprint formation and the ways to reduce atmospheric emissions as a component of the transition to a low-carbon economy.

Methods. The study employs an interdisciplinary review approach based on the analysis of scientific publications from the Scopus and Web of Science databases, methodological guidelines, principles of life cycle assessment, and energy analysis. A comparative evaluation of conventional and alternative grain drying technologies was conducted, taking into account energy consumption, emission levels, and decarbonization potential.

Results. Based on the results of the study, it has been confirmed that grain drying is one of the most energy-intensive stages of post-harvest processing of cereals, leading to significant consumption of fossil fuels and the associated formation of a carbon footprint, accompanied by substantial emissions of CO₂, CO, and particulate matter PM₁₀ and PM_{2.5}. It has been established that the majority of conventional grain drying complexes lack efficient flue gas cleaning systems and are characterized by excessive energy consumption, which contradicts the objectives of decarbonization. The implementation of alternative energy solutions – such as biomass, heat pumps, and solar energy – as well as advanced filtration technologies and catalytic afterburning of exhaust gases, has been substantiated as a promising direction. The importance of life cycle assessment is emphasized as a tool for identifying "carbon-vulnerable" stages and developing strategies for transitioning to a low-carbon economy in the agricultural domain.

Conclusions. Reducing the environmental impact of drying processes is crucial for the ecological modernization of agro-industrial production. The implementation of energy-efficient and low-carbon technologies – particularly through the modernization of drying equipment and the shift to renewable energy sources – is of strategic importance for the development of sustainable and climate-neutral agriculture.

Key words: grain drying complexes, emissions, carbon footprint, sustainable development, low-carbon economy, decarbonization, agricultural production, agricultural domain.

Актуальність проблеми. Зерносушильні комплекси є важливим елементом агропромислової інфраструктури, однак їх експлуатація супроводжується викидами в атмосферу речовин, що мають вуглецевий слід. Під час сушіння зерна, особливо за використанням традиційних джерел енергії, відбувається інтенсивне утворення вуглецевмісних газів – передусім оксиду вуглецю

(CO) та діоксиду вуглецю (CO₂), які є основними компонентами парникового ефекту. Ці викиди не лише погіршують якість повітря в зоні розміщення сушильних установок, але й сприяють глобальним кліматичним змінам через підвищення концентрації парникових газів в атмосфері.

У контексті переходу агросфери до принципів низьковуглецевої економіки особливої

актуальності набуває питання екологічної модернізації сушильного обладнання. Проведення ґрунтовної оцінки впливу зерносушильних комплексів на якість атмосферного повітря дозволяє не лише окреслити екологічні ризики, але й визначити шляхи технологічного оновлення, спрямованого на зменшення викидів та підвищення енергоефективності. Такі заходи є важливими передумовами декарбонізації аграрного виробництва, підвищення його екологічної безпеки та адаптації до викликів сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості активного вентилявання та сушіння зерна висвітлено в роботі (Гапонюк, 2014). Екологічні аспекти функціонування зерносушильного комплексу представлено (Караїм, 2025). Практичні результати сушіння зернових генераторним газом подані в праці (Омаров, 2023). У дослідженні (Паламарчук, 2016) обґрунтовано схеми віброозонуючої сушарки для післязбиральної обробки зерна. Сучасні системи автоматизації обробки зерна описано (Піскарьов, 2023). Комплексну модель енерговитрат, екологічного впливу та економічної ефективності зерноочисних комплексів висвітлено (Ashkan Nabavi-Pelesaraei, 2019). Перспективи використання сонячних сушарок для сільськогосподарської продукції розкрито (Fudholi, 2010). Узагальнений енергетичний аналіз та екологічну стійкість промислового сушіння зерна розглянуто (Hasan Tarek Mondal, 2024). Ключові аспекти оптимізації процесу сушіння у шахтній зерносушарці періодичної дії досліджено (Heikki, 2014). Проблеми поліпшення технологій сушіння: ефективні рішення для чистішого виробництва з вищою енергоефективністю та зниженими викидами показує розвідка (Chojnaska, 2021). Оцінку життєвого циклу зерна, зокрема аналіз викидів парникових газів за методом «cradle-to-gate» (Hariz Abdul Rahman, 2019). Техно-еколого-економічні дослідження експериментальної та теоретичної оцінки сонячної теплової помпової системи для внутрішньобункерного сушіння зерна здійснено (Xinzhuang Gu, 2022).

Метою роботи є дослідження особливостей викидів парникових газів та інших забруднювачів атмосферного повітря, що супроводжують функціонування зерносушильних комплексів, з акцентом на їх вуглецевий слід, а також

обґрунтування напрямів переходу аграрного сектору до низьковуглецевої економіки шляхом впровадження енергоефективних та екологічно безпечних технологій сушіння зерна.

Методологія. У дослідженні використано міждисциплінарний аналітичний підхід, що включає: огляд наукової літератури з баз даних Scopus, Web of Science та інших академічних джерел з питань викидів сушильних комплексів, енергоспоживання та декарбонізації агросектору; аналіз нормативних документів, щодо методів розрахунку викидів парникових газів; оцінку життєвого циклу як концептуальну основу для розгляду впливу процесу сушіння на навколишнє середовище; порівняльний аналіз технологій сушіння з традиційними й альтернативними джерелами енергії, включаючи теплові насоси, сонячні системи та біомасу; структурно-функціональний аналіз технічних рішень щодо зниження викидів і впровадження фільтраційних та каталітичних систем очищення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Продукції зернового сектору належить стратегічна роль у структурі агропродовольчої торгівлі як на національному, так і на міжнародному рівнях. Проте в останні роки в Україні простежується зниження показників вирощування та переробки зернових культур, що супроводжується зростанням собівартості продукції на їх основі. Така ситуація є наслідком низки причин, серед яких слід виокремити надмірне споживання енергії у виробничих процесах і втрати якості зерна на окремих етапах технологічного ланцюга, особливо під час сушіння (Омаров, 2023).

Зерносушильні комплекси (ЗСК) є ключовим елементом післязбиральної інфраструктури аграрного сектору, виконуючи функцію зниження вологості зерна до нормативних показників, що забезпечує його довготривале зберігання та подальше комерційне використання. Водночас експлуатація таких установок супроводжується істотним техногенним навантаженням на довкілля. Серед екологічних наслідків функціонування ЗСК фіксуються підвищені обсяги атмосферних викидів, інтенсивне споживання енергії, генерація шуму, локальні теплові викиди, а також погіршення якості повітря в межах виробничих територій і прилеглих зон.

Оскільки сушіння зерна є критично важливим для багатьох галузей харчової та переробної промисловості, було створено широкий спектр типів сушильних апаратів із різною конструктивною й енергетичною структурою. Основним принципом роботи таких систем є перенесення енергії, необхідної для фазового переходу вологи з рідкого в пароподібний стан. Відповідно до механізму теплопередачі сушарки класифікують на конвективні, контактні та установки, що застосовують енергетичні поля. У переважній більшості ці апарати здатні функціонувати як у безперервному, так і в періодичному режимі (Chojnaska, 2021).

Одним із ключових техноекологічних чинників, що характеризують функціонування зерносушильних комплексів, є значна енергоємність процесу зневоднення зерна. Як правило, для забезпечення термічної енергії використовуються викопні види палива – зокрема природний газ, дизельне або тверде біомасове паливо. Для сушарок середнього рівня продуктивності обсяги споживаного природного газу впродовж одного сезону можуть досягати 50–70 тис. м³. Варто зазначити, що згорання одного кубічного метра природного газу супроводжується утворенням приблизно 1,9 кг вуглекислого газу (CO₂), що суттєво підвищує вуглецевий слід аграрного виробництва (IPCC, 2023).

Енергетична ефективність залишається одним із ключових чинників, що визначають екологічну та економічну доцільність впровадження технологічних рішень у промисловості. Згідно з прогнозами, до 2030 року глобальне споживання енергоресурсів зросте приблизно на 40%, що посилює необхідність раціонального використання енергії в енергомістких секторах, зокрема в агропереробній галузі. У цьому контексті особливої актуальності набуває модернізація енергозатратних технологій, серед яких сушіння зерна посідає провідне місце в ланцюгу післязбиральної обробки сільськогосподарської продукції.

Свіжозібране зерно характеризується надмірною вологістю (у межах 33–45% за сухою масою), що створює сприятливі умови для розвитку мікробіологічного псування та втрати товарних якостей. З метою забезпечення тривалого зберігання продукції вологість необхідно знизити до безпечного рівня, що реалізується шляхом енергоємного процесу термічного

сушіння. Сушіння передбачає активне споживання теплової енергії для створення вологісно-температурного градієнта, необхідного для інтенсивного випаровування вологи із зернової маси (Mondal, 2024).

У глобальному масштабі понад 85 % промислових сушильних установок функціонують на основі гарячого повітря, яке генерується шляхом спалювання викопного палива (Samadi, 2014, Czajkowska, 2018). Проте високе енергоспоживання сушильних систем на основі викопного палива обумовлює значний обсяг викидів карбоновмісних парникових газів. Враховуючи цілі сталого розвитку та імперативи Європейського зеленого курсу, зменшення енергетичної залежності технології сушіння є важливим кроком на шляху до декарбонізації аграрного сектору та інтеграції принципів низьковуглецевої економіки.

Сушіння зернових культур є одним із найбільш енергомістких процесів серед технологічних операцій агропродовольчого виробництва, суттєво перевищуючи за рівнем енергоспоживання обробку інших видів сільськогосподарської сировини. Високі витрати енергії в цій сфері зумовлюють необхідність оптимізації функціонування ЗСК, оскільки саме ефективність управління їх роботою визначає як економічні показники виробництва, так і його екологічний слід.

В умовах поступового зростання енергетичних тарифів і потреби у зниженні вуглецевої інтенсивності виробництва, промислові підприємства дедалі активніше інтегрують інноваційні енергоефективні технології. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є впровадження гібридних сушильних систем, що поєднують традиційне сушіння з альтернативними фізичними методами – зокрема ультразвуковою обробкою, мікрохвильовим та інфрачервоним випромінюванням. Такі технології дозволяють істотно скоротити енергетичні втрати та відповідно – зменшити вуглецевий слід продукції. Таким чином, розвиток енергоощадних технологій сушіння є не лише економічно доцільним, а й критично важливим для досягнення цілей декарбонізації агропромислового комплексу, сприяючи формуванню основ низьковуглецевої економіки (Mondal, 2024).

Актуальні наукові дослідження підтверджують високий потенціал використання

у технологічних процесах зернопереробки відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси та теплових насосів. Особливо вагомими в цьому контексті є напрацювання китайських дослідників, що мають глобальну релевантність з огляду на лідерські позиції Китаю у світовому виробництві зернових культур (669,5 млрд кг у 2020 р., з яких 92% припадає на рис, пшеницю та кукурудзу) (Xinzhuang, 2022).

З метою підвищення енергоефективності та подолання проблем нерівномірного сушіння зерна з надлишковою вологістю у масивних насипах, було розроблено інноваційну сушильну систему, що поєднує принципи теплового насоса із залученням сонячної енергії (SAHP) для функціонування у зернових бункерах. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень продемонстрували досягнення коефіцієнта продуктивності теплового насоса на рівні 5,03, а тепла ефективність сонячного колектора становила 63%. У типових умовах зимового періоду середня тепла потужність системи сягала 130,2 кВт. Важливим є те, що за 42 години роботи система забезпечила зниження вологості партії зерна масою 3760 тонн із 12,9% до 12,5%, при цьому питома вологовіддача досягла 1,934 кг/кВт·год, а ексергетичний ККД – 40,27%. Водночас витрати на сушіння за допомогою SAHP були суттєво нижчими порівняно з традиційними сушарками – 1,43 дол./т проти 5,57 дол./т. Крім того, добова продуктивність сушіння зросла вдвічі (з 166 до 334 тонн) (Xinzhuang, 2022).

Отримані результати не лише засвідчують техніко-економічну доцільність впровадження подібних рішень, але й вказують на їх стратегічне значення у контексті декарбонізації агропромислового виробництва, скорочення вуглецевого сліду зернової продукції та поступового переходу до низьковуглецевої економіки. З огляду на це, подальше вдосконалення технології SAHP є перспективним напрямом наукових розвідок у сфері сталого енергоменеджменту в аграрному секторі.

Окрім високої енергоемності, функціонування зерносушильних комплексів супроводжується інтенсивними викидами широкого спектра забруднювальних речовин, що формують суттєвий техногенний вплив на довкілля та здоров'я працівників. Основними забруднювачами атмосфери є вуглекислий газ (CO₂), тверді

суспендовані частинки фракцій PM₁₀ і PM_{2.5}, леткі органічні сполуки (ЛОС) та інші речовини антропогенного походження. Зокрема, пилові викиди досягають пікових значень під час завантаження вологого зерна до бункерів, безпосереднього процесу сушіння та транспортування продукції механізованими системами. Встановлено, що середня концентрація пилу в повітрі робочої зони в періоди максимального навантаження може перевищувати гранично допустимі нормативи у 3–5 разів, що є критичним показником ризику для об'єктів довкілля та людини (Chojnacka, 2021).

Особливе занепокоєння викликає вплив дрібнодисперсного пилу, здатного проникати в глибокі відділи дихальних шляхів людини, провокуючи розвиток алергічних реакцій, хронічних респіраторних захворювань, а в окремих випадках – посилюючи ризик серцево-судинних патологій. Таким чином, пилові викиди зерносушильного обладнання мають не лише екологічне, а й суттєве соціогігієнічне значення.

Крім того, зерносушильна інфраструктура є джерелом інтенсивного шумового навантаження, що формується внаслідок функціонування вентиляторів, транспортерів, сепараторів та іншого агрегатного устаткування. Систематичний вплив акустичних коливань високої інтенсивності може зумовити розвиток слухових дисфункцій, психоемоційного напруження, головного болю, а також підвищеного ризику розвитку професійних захворювань працівників об'єктів агропромислового сектору (Спірін, 2023).

Накопичення вуглецевого сліду внаслідок викидів CO₂, а також поширення неорганічних та органічних аерозолів, сприяє екологічній деградації локальних атмосферних систем, що суперечить принципам сталого природокористування. У контексті переходу до низьковуглецевої економіки, актуалізується потреба в розробці комплексних стратегій декарбонізації агропромислових процесів, що охоплюють не лише зменшення споживання традиційних видів палива, а й інженерне переосмислення систем аспірації, шумозахисту та моніторингу якості повітря в межах промислових об'єктів.

У контексті переходу до низьковуглецевої економіки актуальним є впровадження технологічних рішень, спрямованих на зменшення викидів і декарбонізацію сушильних процесів.

Зокрема, застосування електростатичних фільтрів дозволяє ефективно видаляти дрібнодисперсні частинки з потоку відпрацьованих газів, тоді як каталітичні системи сушіння забезпечують глибоке очищення повітряного середовища за рахунок розкладання шкідливих домішок. Ці підходи створюють підґрунтя для зменшення екологічних ризиків та інтеграції зернопереробної галузі у стратегії кліматичної нейтральності.

Також, в умовах сучасних екологічних викликів зростає значущість використання інструментів кількісної оцінки впливу агропромисловості на навколишнє середовище. Одним із провідних підходів у цьому напрямі є методика оцінки життєвого циклу продукції (LCA – Life Cycle Assessment), яка дозволяє комплексно аналізувати екологічні наслідки на всіх стадіях виробничого ланцюга – від вирощування сільськогосподарських культур до отримання готового продукту. Впровадження LCA сприяє виявленню ключових джерел забруднення, включно з викидами парникових газів, деградацією ґрунтів, забрудненням водних об'єктів, а також іншими формами антропогенного навантаження (Rahman, 2019).

Процес сушіння зерна в рамках LCA-моделі виявляється одним із найважливіших етапів, який суттєво формує загальний вуглецевий слід продукції через високе енергоспоживання та інтенсивне використання викопного палива. Зокрема, сушіння може бути пов'язане з потенціалом до спричинення кислотних дощів (acidification) та евтрофікації водойм унаслідок супутніх викидів. У цьому контексті декарбонізація сушильних процесів стає критичним напрямом для зниження екологічного тиску та досягнення кліматичної нейтральності агропродовольчого сектору (Nabavi-Pelesaraei, 2019).

Потенційні стратегії зменшення впливу включають поступовий перехід на відновлювані джерела енергії (наприклад, біомасу, сонячну або геотермальну енергію), впровадження енергоефективного обладнання, а також оптимізацію логістики сушіння. Разом із тим, наукові розвідки свідчать про недостатнє висвітлення LCA-досліджень, присвячених зерносушінню, що окреслює наукову лауну та визначає перспективні напрями подальших міждисциплінарних досліджень у межах переходу до низьковуглецевої економіки.

У контексті екологічної безпеки сушильних процесів особливе значення має ефективне видалення твердих частинок із викидних газів, що утворюються в результаті спалювання викопного палива в зерносушильному обладнанні. Найбільшу небезпеку становлять дисперсні фракції пилу – PM_{10} та $PM_{2,5}$, які здатні проникати у глибокі відділи дихальної системи, несучи на своїй поверхні токсичні сполуки, зокрема важкі метали, алергени, поліциклічні ароматичні вуглеводні та діоксини (Styszko, 2017). Саме ці компоненти становлять реальну загрозу не лише для здоров'я працівників агропідприємств, але й для довкілля загалом, спричиняючи вторинне забруднення ґрунтів і водних ресурсів.

Зменшення викидів твердих частинок є невід'ємною складовою політики декарбонізації, оскільки забезпечує зниження сумарного екологічного навантаження на атмосферне повітря, що особливо актуально в умовах переходу до низьковуглецевої моделі господарювання. З цією метою у виробничу практику впроваджуються сучасні технології газоочищення, серед яких – сухі та вологі механічні системи, електростатичні фільтри, волокнисті мішкові й кишенькові фільтри, а також циклонні апарати різних типів. Принцип дії більшості з них ґрунтується на застосуванні гравітаційних, інерційних, відцентрових та електростатичних сил, а також процесів коагуляції частинок і фільтрації за розміром (Chojnacka, 2021).

Усунення високодисперсного пилу в комбінації з модернізацією теплогенерувального обладнання, зокрема шляхом заміни традиційних камерних печей на вискоефективні циклонні системи, дозволяє не лише мінімізувати вплив на якість повітря, а й скоротити вуглецевий слід виробництва. Таким чином, підвищення ефективності систем пиловловлювання виступає одним з пріоритетних напрямів екологічної модернізації сушильних комплексів, що відповідає загальносвітовим цілям сталого розвитку та кліматичної нейтральності.

У межах технологій зменшення шкідливих викидів у зерносушильних системах ключову роль відіграють мокрі пиловловлювачі, які реалізують процес видалення твердих частинок через їх змочування водою. У таких системах рідина подається на внутрішні поверхні апарата або розпилюється у вигляді аерозолі,

сприяючи ефективному осадженню пилу з газового потоку. До найбільш поширених типів пиловловлювальних пристроїв вологого типу належать барботажні скрубери, апарати з незаповненим чи твердонаповненим об'ємом, псевдозрідженим шаром та вентурійні системи (Chen, 2020). Їх застосування є важливим кроком на шляху до зменшення техногенного навантаження на атмосферне повітря в агропромисловому секторі.

Разом із системами пилогазоочищення все більшу актуальність у контексті низьковуглецевого переходу набувають каталітичні технології, що базуються на процесах термоокислення забруднювальних компонентів димових газів. Під час спалювання традиційних (природний газ, нафта) або альтернативних (біомаса, пелети) джерел енергії утворюються значні обсяги димових газів, які містять оксиди вуглецю (CO, CO₂), а також леткі органічні сполуки (ЛОС), що формують комплексну картину антропогенного забруднення (Chojnacka, 2021).

У промислових зерносушильних комплексах високої потужності, що характеризуються інтенсивним споживанням теплової енергії, перспективним напрямом зниження вуглецевого сліду є впровадження каталітичних систем доочищення газів. Застосування каталізаторів дозволяє здійснювати допалювання залишкових шкідливих компонентів димових викидів, значно знижуючи рівень викидів парникових газів і супутніх поллютантів. Додатково, каталітичні реакції можуть супроводжуватися частковим рекупераційним ефектом, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи та сприяє декарбонізації сушильних технологій у межах стратегії сталого розвитку (Sinha Majumdar, 2017).

Таким чином, сучасна практика сушіння потребує переосмислення з огляду на енергетичну ефективність та вплив на довкілля. Серед перспективних технологічних рішень – впровадження теплообмінників, які дозволяють повторно використовувати відведене тепло, зменшуючи витрати енергії. Одним із ефективних підходів до зниження вуглецевого сліду є перехід від викопного палива (зокрема природного газу) до відновлюваних джерел енергії, таких як біомасові відходи. Це не лише знижує експлуатаційні витрати, але й мінімізує обсяги викидів парникових і токсичних речовин у повітря робочої зони.

Особливу увагу в контексті екологізації сушильних процесів приділяють застосуванню каталітичних систем очищення димових газів. Каталізатори, виготовлені на основі благородних металів або металевих оксидів, забезпечують високий рівень нейтралізації шкідливих компонентів, летких органічних сполук та продуктів неповного згоряння. Очищення димових газів сприяє не лише поліпшенню якості повітря, а й підвищенню загальної енергоефективності систем, що важливо для досягнення цілей кліматичної нейтральності та переходу до низьковуглецевої економіки. У цьому контексті впровадження інноваційних сушильних технологій розглядається як один із важливих напрямів декарбонізації агропромислового виробництва (Chojnacka, 2021).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження засвідчило, що зерносушильні комплекси є важливим елементом агропромислового виробництва, однак їх функціонування супроводжується значним енергоспоживанням і викидами вуглецевмісних сполук, зокрема CO₂ та CO, твердих частинок PM₁₀ і PM_{2,5}, а також летких органічних сполук. Спалювання викопного палива, що є основним джерелом теплової енергії для сушіння, чинить як локальний, так і глобальний негативний вплив на довкілля, сприяючи забрудненню атмосферного повітря й посиленню кліматичних змін.

Запровадження технологій зменшення вуглецевого сліду, зокрема систем теплоутилізації, каталізаторів очищення димових газів та альтернативних джерел енергії (біомаса, теплові насоси, сонячна енергія), дозволяє суттєво знизити негативний техногенний вплив сушильних процесів. Крім того, застосування оцінки життєвого циклу як інструменту екологічного аналізу дає змогу ідентифікувати найбільш критичні етапи сушіння щодо викидів парникових газів та розробити ефективні стратегії їхньої мінімізації.

Разом із тим, виявлено наукову лакуну щодо системної оцінки вуглецевого сліду зерносушильних установок в умовах України, а також обмежену кількість досліджень, присвячених порівняльному аналізу ефективності традиційних і низьковуглецевих сушильних технологій.

Перспективи подальших досліджень полягають у: проведенні поглибленої кількісної

оцінки викидів парникових газів на різних етапах сушіння з урахуванням типів обладнання й виду палива; дослідженні можливостей інтеграції відновлюваних джерел енергії у структуру зерносушильних систем; моделюванні сценаріїв переходу до низьковуглецевих технологій у контексті декарбонізації агросфери;

оцінці економічної доцільності впровадження новітніх екотехнологій у виробничий цикл підприємств зернопереробної галузі.

Заповнення вказаних наукових прогалин сприятиме розвитку екологічно орієнтованого аграрного виробництва та досягненню цілей сталого розвитку в агросфері.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Активне вентилявання та сушіння зерна : навч. посіб. / О. І. Гапонюк, М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич, І. І. Гапонюк. Одеса : БМВ, 2014. 326 с.
2. Гаврисюк О. І., Караїм О. А. Екологічні аспекти функціонування зерносушильного комплексу. *Сучасна наука та освіта Волині* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (22 травня 2025 року). Луцьк. 2025.
3. Омаров І. С., Цивенкова Н. М. Практичні результати сушіння зернових генераторним газом. Аграрна енергетика в ХХІ сторіччі: досягнення і перспективи розвитку : матеріали ІІ Міжн. наук.-практ. конф. (14 грудня 2023 року). Білоцерківський НАУ. 2023. С. 104–110. URL: https://science.btsau.edu.ua/sites/default/files/tezy/tezy_agr_ener_xxi_14.12.2023.pdf#page=104
4. Паламарчук І. П., Цуркан О. В., Присяжнюк Д. В., Полевода Ю. А. Обґрунтування схеми віброозонуючої сушарки для післязбиральної обробки зерна. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. № 22. 2016. С. 151–156.
5. Піскарьов О. М., Мусієнко Д. В. Сучасні системи автоматизації обробки зерна. Матеріали ХІХ міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія в ХХІ столітті». 2023 р. С. 219.
6. Ashkan Nabavi-Pelesaraei, Shahin Rafiee, Seyed Saeid Mohtasebi, Homa Hosseinzadeh-Bandbafha, Kwok-wing Chau. Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. Volume 217. 2019. P. 742–756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.228>
7. Chen Z., Zhao S., Rao Z., Zhang R. Experimental Study on Low-resistance Venturi Water Film Cyclone with Vibrating String Grid. *Jordan Journal of Civil Engineering*. № 14(3). 2020. P. 295. URL: <https://jjce.just.edu.jo/Download.ashx?f=TsZShoU806bfrho36mu6ECzqgkLV3RfyoNH6e6Z1Ok8%3D>
8. Czajkowska A. Installations for cleaning exhaust fumes from dust–gas pollutants. *Environmental Protection and Natural Resources*. № 29(4), 2018. P. 26–32. DOI: <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0019>
9. Fudholi A., Sopian K., Ruslan M. H., Alghoul M. A., Sulaiman M. Y., Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14. Issue 1. 2010. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>
10. Gopan A., Verma P., Yang Z., Axelbaum R. L. Quantitative analysis of the impact of flue gas recirculation on the efficiency of oxy-coal power plants. *Int. J. Greenh. Gas Control*. № 95. 2020. 102936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102936>
11. Hasan Tarek Mondal, Sazzat Hossain Sarker. Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 199. July 2024. 114442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114442>
12. Heikki T. Jokiniemi, Jukka M. Ahokas, Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. *Biosystems Engineering*. Volume 121. 2014. P. 209–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002>
13. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. 2023. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
14. Jabłońska M., Palkovits R. It is no laughing matter: nitrous oxide formation in diesel engines and advances in its abatement over rhodium-based catalysts. *Catal. Sci. Technol.* № 6. 2016. P. 7671–7687. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6cy01126h>
15. Katarzyna Chojnacka, Katarzyna Mikula, Grzegorz Izydorczyk, Dawid Skrzypczak, Anna Witek-Krowiak, Konstantinos Moustakas, Wojciech Ludwig, Marek Kułczyński, Improvements in drying technologies – Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. *Journal of Cleaner Production*. Volume 320. 2021. 128706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128706>
16. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification. *Engineering*. № 4. 2018. P. 416–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.009>
17. Mohammad Hariz Abdul Rahman, Sau Soon Chen, Putri Razreena Abdul Razak, Nurul Ain Abu Bakar, Mohammad Shahid Shahrin, Norziana Zin Zawawi, Azzami Adam Muhamad Mujaib, Fazlyzan Abdullah, Fauzi Jumat, Rahiniza

Kamaruzaman, Shamsul Amri Saidon, Shaidatul Azdawiyah Abdul Talib. Life cycle assessment in conventional rice farming system: Estimation of greenhouse gas emissions using cradle-to-gate approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 212. 2019. P. 1526–1535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.062>

18. Seyed Hashem Samadi, Barat Ghobadian, Gholamhassan Najafi, Ali Motevali. Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. Volume 13, Issue 2. 2014. P. 174–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.09.001>

19. Sinha Majumdar S., Celik, G., Alexander A. M., Gawade P., Ozkan U. S. In-situ incorporation of binder during sol-gel preparation of Pd-based sulfated zirconia for reduction of nitrogen oxides under lean-burn conditions: effect on activity and wash-coating characteristics. *Appl. Catal. B Environ.* № 202. 2017. P. 134–146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.062>

20. Styszko, K., Samek, L., Szramowiat, K. et al. Oxidative potential of PM10 and PM2.5 collected at high air pollution site related to chemical composition: Krakow case study. *Air Qual Atmos Health* 10. 2017. P. 1123–1137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0499-3>

21. Xinzhuang Gu, Jianguo Dai, Haifeng Li, Yanjun Dai, Experimental and theoretical assessment of a solar assisted heat pump system for in-bin grain drying: A comprehensive case study. *Renewable Energy*. Volume 181. 2022. P. 426–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.049>

REFERENCES:

1. Haponiuk, O. I., Ostapchuk, M. V., Stankevych, H. M., & Haponiuk, I. I. (2014). Aktyvneventyliuvannia ta sushinnia zerna: navchalnyi posibnyk [Active ventilation and grain drying: A textbook]. Odesa: VMV. 326 p. [in Ukrainian].

2. Havrysiuk, O. I., & Karaim, O. A. (2025). Ekologichni aspekty funktsionuvannia zernosushylnoho kompleksu [Ecological aspects of the functioning of a grain drying complex]. *Suchasna nauka ta osvita Volyni: Materialy Vseukrainskoi nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh* (22 travnia 2025 roku). Lutsk. [in Ukrainian].

3. Omarov, I. S., & Tsyvenkova, N. M. (2023). Praktychni rezultaty sushinnia zerna henaratornym hazom [Practical results of grain drying using generator gas]. *Ahrarna enerhetyka v XXI storichchi: dosiahnennia i perspektivy rozvytku: Materialy II Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* (14 hrudnia 2023 roku). Bilotserkivskyi NAU, 104–110. URL: https://science.btsau.edu.ua/sites/default/files/tezy/tezy_agr_ener_xxi_14.12.2023.pdf#page=104 [in Ukrainian].

4. Palamarchuk, I. P., Tsurkan, O. V., Prysiachniuk, D. V., & Polevoda, Yu. A. (2016). Obhruntuvannia skhemy vibroozonuiuchoi susharki dlia pisliabzbyranoi obrobky zerna [Justification of the vibro-ozonizing dryer scheme for post-harvest grain processing]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii*, (22), 151–156. [in Ukrainian].

5. Piskariov, O. M., & Musiienko, D. V. (2023). Suchasni systemy avtomatyzatsii obrobky zerna [Modern systems of grain processing automation]. *Materialy XIX Mizhnarodnoho forumu molodi "Molod i industriia v XXI stolitti"*, 219. [in Ukrainian].

6. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K.-W. (2019). Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 217, 742–756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.228>

7. Chen, Z., Zhao, S., Rao, Z., & Zhang, R. (2020). Experimental study on low-resistance Venturi water film cyclone with vibrating string grid. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 14(3), 295. Retrieved from <https://jjce.just.edu.jo/Download.ashx?f=TsZShoU806bfrho36mu6ECzqgkLV3RfyoNH6e6Z1Ok8%3D>

8. Czajkowska, A. (2018). Installations for cleaning exhaust fumes from dust–gas pollutants. *Environmental Protection and Natural Resources*, 29(4), 26–32. <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0019>

9. Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>

10. Gopan, A., Verma, P., Yang, Z., & Axelbaum, R. L. (2020). Quantitative analysis of the impact of flue gas recirculation on the efficiency of oxy-coal power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 95, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102936>

11. Mondal, H. T., & Sarker, S. H. (2024). Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114442>

12. Jokiniemi, H. T., & Ahokas, J. M. (2014). Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. *Biosystems Engineering*, 121, 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002>

13. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 – Energy. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

14. Jabłońska, M., & Palkovits, R. (2016). It is no laughing matter: Nitrous oxide formation in diesel engines and advances in its abatement over rhodium-based catalysts. *Catalysis Science & Technology*, 6, 7671–7687. <https://doi.org/10.1039/c6cy01126h>

15. Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Ludwig, W., & Kułczyński, M. (2021). Improvements in drying technologies – Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128706>
16. Liu, J., Zhu, F., & Ma, X. (2018). Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification. *Engineering*, 4, 416–420. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.009>
17. Abdul Rahman, M. H., Chen, S. S., Abdul Razak, P. R., Abu Bakar, N. A., Shahrin, M. S., Zawawi, N. Z., Mujab, A. A. M., Abdullah, F., Jumat, F., Kamaruzaman, R., Saidon, S. A., & Abdul Talib, S. A. (2019). Life cycle assessment in conventional rice farming system: Estimation of greenhouse gas emissions using cradle-to-gate approach. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1526–1535. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.062>
18. Samadi, S. H., Ghobadian, B., Najafi, G., & Motevali, A. (2014). Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.09.001>
19. Majumdar, S. S., Celik, G., Alexander, A. M., Gawade, P., & Ozkan, U. S. (2017). In-situ incorporation of binder during sol-gel preparation of Pd-based sulfated zirconia for reduction of nitrogen oxides under lean-burn conditions: Effect on activity and wash-coating characteristics. *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.062>
20. Styszko, K., Samek, L., Szramowiat, K., et al. (2017). Oxidative potential of PM10 and PM2.5 collected at high air pollution site related to chemical composition: Krakow case study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 1123–1137. <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0499-3>
21. Gu, X., Dai, J., Li, H., & Dai, Y. (2022). Experimental and theoretical assessment of a solar assisted heat pump system for in-bin grain drying: A comprehensive case study. *Renewable Energy*, 181, 426–444. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.049>

Стаття надійшла: 02.08.2025

Прийнято: 18.08.2025

Опубліковано: