

УДК 338.620.92

DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/190-10>**Болгов В.Є.**кандидат економічних наук, доцент,
Державний торговельно-економічний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0631-302X>**Кондратюк І.В.**аспірант,
Державний торговельно-економічний університет
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2174-6298>**Bolhov Vladyslav, Kondratyuk Ivan**
State University of Trade and Economics

ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ УКРАЇНСЬКОГО АГРАРНОГО СЕКТОРУ

У даній статті зазначається важливість використання технологій чистої енергетики у вітчизняному агробізнесі, розглядаються шляхи декарбонізації тепличного господарства із застосування сучасних водневих технологій. Досліджується можливість зведення до мінімуму викидів вуглецю у атмосферу за рахунок технічного переоснащення. Наводяться переваги і недоліки застосування тих чи інших технологій, а також описуються головні цілі, що досягне підприємство за рахунок такої трансформації. Пропонуються шляхи вирішення проблеми балансування електричної енергії отриманої з відновлюваних джерел енергії. Застосування вказаних заходів дозволяє диверсифікувати напрямки діяльності вітчизняним аграрним підприємствам та адаптуватися до дії податку на викиди при перетині кордонів ЄС і підвищити власну конкурентоздатність.

Ключові слова: експорт, економічна доцільність, агросектор, водень, аміак, декарбонізація, електроенергосистема, батареї.

ECONOMIC FEASIBILITY OF DECARBONIZATION OF THE UKRAINIAN AGRICULTURAL SECTOR

In modern conditions, globalization has closely linked geopolitical and geoeconomic processes throughout the world. The war unleashed by Russia against Ukraine is reflected in global economic processes. The domestic agrar business is becoming the most important export sector of the national economy. Therefore, increasing the competitiveness of these enterprises, adaptation to the requirements of the EU market, the search for energy efficiency is an urgent problem, the solution of which will stabilize the global food market. A significant additional obstacle on the way of Ukrainian agricultural products to the European market may be the policy of the European Union regarding the "green transition", because it will be taxed when crossing the border for the carbon footprint. This article notes the importance of using clean energy technologies in domestic agribusiness, considers the ways of decarbonization of the greenhouse economy using modern hydrogen technologies. The possibility of minimizing carbon emissions into the atmosphere due to technical re-equipment is being investigated. The advantages and disadvantages of the use of certain technologies are given, and the main goals that the enterprise will achieve due to such a transformation are also described. The convenience and ease of the proposed transformations of the production process is based on the adaptation of the equipment available on the market. Ways to solve the problem of balancing the electrical energy obtained from renewable energy sources are proposed. Ways of decarbonization of the production process of agricultural products were developed for an existing enterprise, using the example of its greenhouse economy. The application of the specified measures allows domestic agricultural enterprises to diversify their activities and adapt to the effect of the emission tax when crossing EU borders and increase their own competitiveness. The implementation of these technologies is important not only for the development of agribusiness, but also for the domestic energy and chemical sectors, in addition, it improves the state of the environment and strengthens the range of domestic exports.

Keywords: export, economic feasibility, agricultural sector, hydrogen, ammonia, decarbonization, electrical energy system, batteries.

JEL classification: F14, O13, Q25, Q42

Постановка проблеми. У зв'язку з введенням в дію податку на викиди при перетині кордонів Євросоюзу, постає проблема вуглецевого сліду при виробництві української аграрної продукції, що експортується до країн ЄС. Цей факт значно ускладнює експорт продукції до ЄС. Аграрний сектор є дуже великим і багатостороннім, тому в даній статті предметом дослідження стане саме тепличне господарство, задля того щоб в максимально допустимому об'ємі дослідити і оцінити можливість використання сучасних технологій з використанням водню та аміаку для мінімізації викидів пар-

никових газів у атмосферу і тим самим «озеленити» виробництво, що дасть можливість уникнути накладення відповідних штрафів при перетині кордону з ЄС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З поглибленням процесів євроінтеграції вітчизняної економіки все гостріше постає питання, підвищення конкурентоздатності та прибутковості вітчизняних аграрних підприємств, одночасно підвищуючи їх енергоефективність. Цій темі приділили свої дослідження такі вітчизняні вчені, як: Зеленько О.О. [1], Болгов В.Є. [2], Кудря С.О. [3], Мелех Л. [4], Святненко А. [5] та

багато інших. В той же час, з метою пошуку альтернативних джерел енергоносіїв та зменшення енергоємності аграрного виробництва, приділили свої дослідження іноземні науковці: Ahlawat A. [6], Armijo J. [7], Saglayan D. [8], Hyeog Kim S. [9], Nemmour A. [10], Tanzer J. [11] та ін. Зазначені автори зробили значні теоретичні внески у дослідження адаптації українського сільгосп сектору до вимог ЄС та перспектив розвитку європейського аграрного ринку. Однак, приділено не достатньо уваги впровадженню процесів декарбонізації у вітчизняне аграрне виробництво.

Мета статті. Дослідити економічну доцільність використання сучасних технологій декарбонізації для зведення до мінімуму викидів парникових газів в тепличному господарстві.

Виклад основних результатів дослідження. Сучасна глобалізація тісно пов'язала геополітичні та геоелектронічні процеси в усьому світі. Війна, яку розв'язала росія проти України відбивається на глобальних економічних процесах. Тому, нашим аграрним товаровиробникам необхідно вирішувати поточні питання не лише виходячи з тих військових ризиків, з якими вони стикаються, а й враховувати тенденції глобальної енергетичної кризи. Саме тому, використання альтернативної енергетики в агросекторі стає все більш доцільним. Одним з таких напрямків є технології декарбонізації тепличного господарства [2]. Припускається, що сучасні технології дозволять здійснити «зелений» перехід, уникнути оподаткування на викиди при перетині кордону з ЄС та диверсифікувати власне виробництво.

Базовим для розгляду у даній статті було обрано діюче тепличне господарство підприємства «Украфлора» у Вінницькій області. Площа – 12 га.

Дане підприємство використовує вугілля та/або природний газ для генерації теплової енергії. Такий спосіб отримання енергії є ефективним і перевіреним роками експлуатації. Проте має суттєвий недолік – значні викиди парникових газів при спалюванні.

Враховуючи політику Європейського Союзу щодо «зеленого переходу» продукція, що має вуглецевий слід і вироблена не країнами-членами ЄС обладається податком при перетині кордону [5]. Підприємства, що виготовляють продукцію з вуглецевим слідом в країнах ЄС зобов'язані купувати квоти на викиди за програмою Emission Trading System (ETS) [13]. У 2023 році такі квоти сягають 100 євро за тону CO₂ і цей показник росте із року в рік.

Саме тому, в період коли СВММ (Carbon border adjustment mechanism) [11] вступив у дію, але штрафи ще не накладаються (почнуть накладатися з 1 січня 2026 року), ще діє вікно можливостей по модернізації

власного виробництва і уникнення додаткових витрат при перетині кордону ЄС.

На підприємстві, що розглядається, пропонується замінити існуючі технології опалення на вугіллі та природному газі, водневими технологіями з близькими до нуля викидами CO₂. На даний час середня річна потреба господарства в теплі становить 49 717 Гкал.

Потужність котлів обирається виходячи з даних по споживанню енергії. Так були враховані наступні показники:

- найбільша встановлена місячна потужність, що використовувалася у звітному періоді (16,37 МВт);
- коригувальний відсоток при виборі котлів газ – водень (10%);
- найближче за показником потужності доступне обладнання (2x9,25 МВт = 18,5 МВт).

Відповідно для вибору котла потрібно взяти найбільшу встановлену потужність, що використовується у певний період часу (16,37 МВт), скорегувати її на 10% (16,37 + 1,637 = 18,07 МВт) та обрати найближче за параметрами обладнання, що можуть виготовити виробники. В нашому випадку, для заміни існуючих котлів на водневі пропонується встановити 2 котли Bosch типу UT-L 46x6 загальною номінальною потужністю 18,5 МВт (кожний котел 9,25 МВт) [12].

Згідно опису від виробника, обладнання дозволяє використовувати до 100% водню в якості палива. Використання таких і подібних їм котлів на водні дозволить забезпечити тепличне господарство тепловою енергією протягом усього року. Місячні показники потужності необхідної для забезпечення тепличного господарства тепловою енергією наведені в таблиці 1.

В той же час, кліматичними умовами призводять до нерівномірного споживання енергії в тепличному господарстві, що є головним викликом.

При цьому, використання електролізних систем для генерації водню не є ефективним, якщо споживати кінцевий продукт виключно в залежності від погоди. Установка в такому разі недовантажена і відповідно коефіцієнт її корисної дії значно знижується. Саме тому, доцільною є ідея використовувати надлишковий водень для виробництва аміаку. Таким чином ми уникаємо втрат енергії та отримуємо додаткову продукцію у вигляді обезводненого аміаку.

Аміак є основним добривом для аграрної промисловості, що створює додаткові можливості для бізнесу. Так, аміак може використовуватись у самому тепличному господарстві, збільшуючи показник врожайності, або як окремий продукт для продажу на ринку.

Щорічна потреба аміаку в Україні в період до повномасштабної війни становила близько 700 000 тонн

Таблиця 1

Місячні показники потужності необхідної для забезпечення тепличного господарства тепловою енергією

Місяць	МВт встановленої потужності	Місяць	МВт встановленої потужності
січень	16,25	липень	2,50
лютий	16,37	серпень	1,95
березень	14,20	вересень	2,83
квітень	9,66	жовтень	4,29
травень	5,41	листопад	2,83
червень	2,41	Грудень (сервісне обслуговування)	1,33

Джерело: сформовано авторами

(2021 р.) [1]. При цьому, варто зазначити, що в разі забезпечення виробництва водню електроенергією від «зелених» джерел, можна отримати «зелений» аміак, який користується попитом в країнах ЄС, та має вищу ціну продажу.

Відповідно для виробництва аміаку є потреба у встановленні додаткового обладнання, такого як: 1) установка синтезу аміаку; 2) установка з розділення повітря; 3) установка демінералізації води. Зазвичай таке обладнання постачається в комплекті від компаній, що спеціалізуються на виробництві аміаку. Такі технології не є новими і не несуть в собі ніякої інноваційної. Інноваційність полягає у використанні електролізних технологій при виробництві водню [3].

Водень є ключовим елементом синтезу аміаку і зазвичай отримується шляхом парового риформінгу метану. Дана технологія так само є перевіреною часом, проте вона має суттєвий недолік – великі викиди парникових газів. Саме тому, набула розповсюдження ідея генерації водню шляхом електролізу води [7].

Завдяки спеціальній установці вода розкладається на водень та кисень. На відміну від парового риформінгу метану, в процесі електролізу води не утворюються шкідливі парникові гази, що викидаються у атмосферу. Використання електролізної установки виробництва водню дозволить «очистити» виробництво аміаку, отримавши продукт з близьким до нуля слідом CO₂.

Світові ціни на аміак, наразі в прямій залежності від ціни на природний газ. За даними S&P Global, за останні два роки спотові ціни на аміак коливаються в діапазоні 400–1600 євро. При чому, за останній рік падіння цін становив більше 70%, що наведено в таблиці 2 [13]. Однак, на початок 2024 року спостерігається стабілізація цін і тенденція до поступового зростання, що обумовлено вимогами «зеленого переходу».

При цьому продукція з мінімальними слідом CO₂ користується більшим попитом та дозволяє отримати довгострокові контракти з кращою ціною.

В свою чергу, генерація електроенергії може відбуватися за рахунок відновлюваних джерел енергії (сонце, вітер). Це дозволить отримати «зелений» водень за класифікацією EU hydrogen policy [11]. Такий продукт вважається екологічно чистим і не підпадатиме під дію податку на викиди при перетині кордону з ЄС.

Проте, варто враховувати мінливий характер генерації електроенергії з сонячних та вітроелектростанцій. Це обумовлено залежністю генеруючих потужностей від погодних умов. Відповідно постає проблема їх балансування, адже виробництво аміаку потребує постійного забезпечення електроенергією. Приблизно

30% від номінальної потужності є базовою потребою установки з виробництва аміаку, і не допустимо опуститися нижче вказаного значення.

Є велика кількість шляхів вирішення даної проблеми. Зокрема, пропонуємо такі:

- використання систем накопичення енергії (BESS – Battery Energy Storage Systems);
- підключення до електроенергетичної мережі;
- застосування гідроакмулюючих станцій малої потужності.

Розглянемо ключові переваги і недоліки кожного підходу до балансування подачі електроенергії.

Використання систем накопичення енергії (BESS – Battery Energy Storage Systems) дозволяє технічно вирішити проблему балансування електроенергії виробленої на вітрових і сонячних електростанціях. Проте дана система є дуже дорогою, що суттєво відображається на ціні кінцевого продукту. Проте, цей недолік посилюється коротким терміном експлуатації даних систем. Очікуваний термін експлуатації складає 5–15 років [11].

Тобто за період експлуатації сонячних панелей, або вітрових турбін, такі батареї мають бути замінені як мінімум один раз. Можливим рішенням може бути покриття лише базового навантаження установки з виробництва аміаку та електролізерів за рахунок батарей. Проте таке рішення потребує глибшого вивчення і техніко-економічного аналізу.

Підключення до електроенергетичної мережі також дозволяє технічно вирішити проблему балансування електроенергії виробленої на вітрових і сонячних електростанціях. Але такий спосіб має свої недоліки. Головний з яких це використання електроенергії зі значним слідом CO₂. Більш як 30% електроенергії в українській мережі генерувалося на теплових електростанціях [4]. Відповідно, така електроенергія не є «чистою» і однозначно підпадає під СВМ. Шляхом вирішення цієї проблеми може бути Угода про закупівлю електроенергії (Power Purchase Agreement – PPA) [5].

Робота за договором PPA дозволить реалізувати наступний механізм: «Зелена» енергія купується в об'ємі, що споживає тепличне господарство на власні потреби. Таким чином, документально, електроенергія є відновлюваною і не підпадає під дію СВМ. В той же час, фізично, підприємство отримує енергію з мережі, що дозволяє отримувати збалансоване енергопостачання на об'єкт. У такому випадку проблема балансування фактично перекладається на оператора електроенергосистеми, як це і відбувається зараз. Для реалізації такого сценарію, необхідне врегулювання бюрократичних питань, таких як: сертифікат походження електро-

Таблиця 2

Світові спотові ціни на аміак за 2-ий квартал 2022 та 2-ий квартал 2023 року (дол. США)

Регіон	Рік		Відхилення, %
	2022	2023	
США	1277,34	365,25	-71
Західна Європа	1312,58	381,08	-71
Східна Азія	1126,64	326,50	-71
Чорне море	1262,08	293,00	-77
Близький Схід	1108,44	251,58	-77

Джерело: [13]

енергії, сертифікат «зеленого» виробництва водню, сертифікат «зеленого» виробництва аміаку і т. ін.

Гідроакумуючі станції малої потужності дозволяють частково вирішити проблему балансування електроенергії виробленої на вітрових і сонячних електростанціях з технічної точки зору. Малі ГЕС обмежені у своїй потужності і в проєкті з суттєвою встановленою потужністю не зможуть збалансувати усю генеровану потужність. Проте, така гідроакумуюча станція, здатна збалансувати достатню кількість електроенергії для базового навантаження установок з виробництва водню та аміаку. Суттєвою перевагою цих агрегатів є можливість споживання надлишків на власні потреби, що значно збільшує її балансуєчі можливості. Однак, мала потужність дає можливість використати такий сценарій тільки на об'єктах малої потужності, а мож-

ливість встановлення напряму залежить від географічного розміщення.

Висновки. Розглянуті шляхи декарбонізації аграрного господарства дозволяють отримати значне зменшення викидів парникових газів, що є важливим внеском у боротьбі за екологію, а також, з комерційної точки зору, дозволяє диверсифіковану бізнес-модель тепличного господарства та отримати два різногалузеві кінцеві продукти, що мають власний ринок і власного споживача. Даний підхід потребує подальшої оцінки в рамках техніко-економічного обґрунтування. В подальшому дане дослідження може використовуватись на практиці для модернізації і декарбонізації виробництва. Додатковим фактором є незалежність від волатильної ціни на природний газ і високий рівень автономізації підприємства.

Список використаних джерел:

1. Зеленько О.О., Гуцан Т.Г., Осьмірко І.В. Воднева енергетика та перспективи її розвитку в економіці України. *Бізнес Інформ*. 2022. № 8. С. 20–26.
2. Bolgov V., Galytskyi I. Economic aspect of innovative activity in the agricultural sector of Ukraine: problems and perspectives. *Економіка і організація управління*. 2016. № 3 (23). С. 134–140.
3. Кудря С.О., Рєпкін О.О., Рубаненко О.О., Яценко Л.В. Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України. *Енергетика*. 2022. № 1. С. 5–16.
4. Мелех Л., Нагірняк О. Правове регулювання альтернативної енергетики в Україні. *Вісник «Львівська Політехніка»*. 2021. № 2. С. 159–166.
5. Святненко А. Отримати свою частину «зеленого» пирога. *Дзеркало тижня*. URL: http://gazeta.dt.ua/ECONOMICS/otrimati_svoyu_chastinu_zelenogo_piroga.html (дата звернення: 16.02.2024).
6. Ahlawat A., Das D. Optimal sizing and scheduling of battery energy storage system with solar and wind DG under seasonal load variations considering uncertainties. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109377>
7. Armijo J., Philibert C. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. No. 45 (3). P. 1541–1558.
8. Caglayan D., Heinrichs H. Robust design of a future 100% renewable european energy supply system with hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. No. 46 (57). P. 376–390.
9. Hyeog Kim S., Shin Y. Optimize the operating range for improving the cycle life of battery energy storage systems under uncertainty by managing the depth of discharge. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 73. P. 109–144.
10. Nemmour A., Inayat A., Janajreh I., Ghenai C. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48 (75). P. 11–33.
11. Tanzer J., Hermann I. Chapter 21-Action toward carbon neutrality – essential elements of the Green Deal. *Sustainable and Circular Management of Resources and Waste Towards a Green Deal*. 2023. P. 285–296.
12. Bosch. Unimat heating boiler UT-L. URL: <https://www.bosch-industrial.com/global/en/ocs/commercial-industrial/unimat-heating-boiler-ut-l-669463-p> (дата звернення: 18.02.2024).
13. Santiago Canel Soria Analysis: Global ammonia prices fall 50% on year, sparking concerns over future low-carbon market. 2023. URL: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/081523-global-ammonia-prices-fall-50-on-year-sparking-concerns-over-future-low-carbon-ammonia-market> (дата звернення: 21.02.2024).

References:

1. Zelen'ko O. O., Hutsan T. H., Os'mirko I. V. (2022) Vodneva enerhetyka ta perspektyvy yiyi rozvytku v ekonomitsi Ukrayiny [Hydrogen energy and prospects for its development in the economy of Ukraine]. *Biznes Inform*, no. 8, pp. 20–26.
2. Bolgov V., Galytskyi I. (2016) Economic aspect of innovative activity in the agricultural sector of Ukraine: problems and perspectives. *Ekonomika i orhanizatsiya upravlinnya*, no. 3 (23), pp. 134–140.
3. Kudrya S. O., Ryepkin O. O., Rubanenko O. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya. (2022) Etapy rozvytku zelenoyi vodnevoyi enerhetyky Ukrayiny [Stages of development of green hydrogen energy in Ukraine]. *Enerhetyka*, no. 1, pp. 5–16.
4. Melekh L., Nahirnyak O. (2021) Pravove rehulyuvannya al'ternatyvnoyi enerhetyky v Ukrayini [Legal regulation of alternative energy in Ukraine]. *Visisnyk «L'vivs'ka Politekhnika»*, no. 2, pp. 159–166.
5. Svyatnenko A. Otrymaty svoyu chastynu «zelenoho» pyroha [Get your share of the "green" pie]. *Dzerkalo tyzhnya. veb-sayt* URL: http://gazeta.dt.ua/ECONOMICS/otrimati_svoyu_chastinu_zelenogo_piroga.html (accessed February 16, 2024).
6. Ahlawat A., Das D. (2023) Optimal sizing and scheduling of battery energy storage system with solar and wind DG under seasonal load variations considering uncertainties. *Journal of Energy Storage*, vol. 74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109377>
7. Armijo J., Philibert C. (2020) Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 45 (3), pp. 1541–1558.
8. Caglayan D., Heinrichs H. (2021) Robust design of a future 100% renewable european energy supply system with hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 46 (57), pp. 376–390
9. Hyeog Kim S., Shin Y. (2023) Optimize the operating range for improving the cycle life of battery energy storage systems under uncertainty by managing the depth of discharge. *Journal of Energy Storage*, vol. 73, pp. 109–144.
10. Hyeog Kim S., Shin Y. (2023) Optimize the operating range for improving the cycle life of battery energy storage systems under uncertainty by managing the depth of discharge. *Journal of Energy Storage*, vol. 73, pp. 109–144.

11. Tanzer J., Hermann L. (2023) Chapter 21-Action toward carbon neutrality – essential elements of the Green Deal. Sustainable and Circular Management of Resources and Waste Towards a Green Deal. P. 285–296.

12. Bosch. Unimat heating boiler UT-L. Available at: <https://www.bosch-industrial.com/global/en/ocs/commercial-industrial/unimat-heating-boiler-ut-l-669463-p> (accessed February 18, 2024).

13. Santiago Canel Soria (2023) Analysis: Global ammonia prices fall 50% on year, sparking concerns over future low-carbon market. Available at: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/081523-global-ammonia-prices-fall-50-on-year-sparking-concerns-over-future-low-carbon-ammonia-market> (accessed February 21, 2024).