

ВИРОБНИЦТВО ЗЕЛЕНОГО АМІАКУ НА АВТОНОМНИХ ВІТРОВИДНЕВИХ КОМПЛЕКСАХ

Отримано 03 вер. 2024 р.; рекомендовано до публікації 16 вер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 жов. 2024 р.

Кудря С. О.¹, Яценко Л. В.², Ткаленко М. Д.³,
Шинкаренко Л. Я.⁴, Коханевич В. В.⁵

Автор для кореспонденції: Яценко Любов,
e-mail: renewable@ukr.net

У роботі представлено результати досліджень щодо можливостей отримання зеленого аміаку при експлуатації вітровидневих комплексів як одного з перспективних напрямів декарбонізації вітчизняної економіки та децентралізації енергетичної галузі. Використання зеленого водню як сировини для отримання аміаку, що може замінити природний газ, матиме додатковий позитивний вплив на довкілля і, відповідно, на рівень економічного розвитку. Представлено блок-схему енергетичного комплексу з використанням енергії вітру як первинного енергоресурсу для отримання водню та аміаку, розглянуто основні його складові. Для електролізних установок різної потужності, перспективних для задоволення локальних або регіональних вітчизняних потреб у зеленому аміаку, на основі аналітичних досліджень визначено показники необхідної ресурсної бази та отриманої продукції, а також перспективні напрями використання.

Застосування вітровидневих комплексів для виробництва аміаку в Україні має достатнє технічне та технологічне забезпечення кожного з блоків енергокомплексу, проте бракує промислового випуску сучасних електролізних установок. Високий рівень має вітчизняна інфраструктура аміаку – система виробництва, зберігання, транспортування та використання.

Представлені результати досліджень пропонуються до використання як орієнтовні вихідні дані під час розробки відповідних проєктів з урахуванням умов територіального розташування і місцевої ресурсної та енергетичної бази тощо. Експлуатація вітровидневих комплексів для виробництва аміаку дозволить ліквідувати негативні наслідки використання природного газу для отримання аміаку як в екологічній, так і в політичній сфері, а також завдяки зниженню логістичних витрат зменшити вартість аміаку, використовуваного як добриво і застосовуваного в різних технологічних агропромислових проєктах. Бібл. 29, рис. 1, табл. 1.

Ключові слова: вітроенергетика, воднева енергетика, електроліз води, зелений аміак.

¹ чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук., проф.
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0001-7022-1579>

³ канд. техн. наук, ст. наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0003-0698-5739>

⁴ мол. наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0003-2018-3329>

⁵ аспірант
<http://orcid.org/0009-0009-0461-4388>

^{1,2,3,4,5} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна.

PRODUCTION OF GREEN AMMONIA AT AUTONOMOUS PLANTS WIND WATER COMPLEXES

Received Sep. 03, 2024; accepted Sep. 16, 2024
Available online Oct. 01, 2024

Kudrya S.¹, Yatsenko L.², Tkalenko M.³,
Shynkarenko L.⁴, Kokhanevich V.⁵

Author for correspondence: Yatsenko Liubov,
e-mail: renewable@ukr.net

The work presents the results of research on the possibilities of obtaining green ammonia during the operation of wind-hydrogen complexes as one of the promising directions of decarbonization of the domestic economy and decentralization of the energy industry. The use of green hydrogen as a raw material for

¹ Corresponding member of NAS of Ukraine,
Dr. of Techn. Science, Prof.
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² Researcher
<https://orcid.org/0000-0001-7022-1579>

³ Researcher fellow
<https://orcid.org/0000-0003-0698-5739>

⁴ Junior researcher
<https://orcid.org/0000-0003-2018-3329>

⁵ Postgraduate
<https://orcid.org/0009-0009-0461-4388>

obtaining ammonia, which can replace natural gas, will have an additional positive impact on the environment and, accordingly, on the level of economic development.

1, 2, 3, 4, 5 Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A block diagram of an energy complex using wind energy as a primary energy resource for obtaining hydrogen and ammonia is presented, its main components are considered. For electrolysis plants of various capacities, which are promising for solving local or regional domestic needs for green ammonia, the indicators of the necessary resource base and the obtained products, as well as promising directions of use, have been determined.

The use of wind-hydrogen complexes for the production of ammonia in Ukraine has sufficient technical and technological support for each of the blocks of the energy complex, except for the lack of industrial production of modern electrolysis plants. The domestic ammonia infrastructure is at a high level - the system of production, storage, transportation and use.

The presented research results are proposed for use as indicative initial data in the development of relevant projects, taking into account the conditions of the territorial location and the local resource and energy base, etc. The operation of wind-hydrogen complexes for the production of ammonia will allow to eliminate the negative consequences of the use of natural gas for the production of ammonia both in the ecological and political spheres, as well as to reduce the cost of ammonia, which is used as a fertilizer and in various technological agro-industrial processes, due to the reduction of logistical costs. Bible 29, fig 1, tab. 1.

Keywords: wind power, hydrogen power, electrolysis of water, ammonia.

Вступ. У процесі виконання завдань щодо декарбонізації економіки України та децентралізації вітчизняної енергетичної галузі проводиться низка досліджень у напрямі створення ефективних проєктів вітроводневої енергетики, зокрема для отримання зеленого аміаку, одного з найважливіших продуктів сучасної хімічної промисловості, який використовують переважно для виробництва азотних добрив, вибухових речовин, азотної кислоти та багатьох інших хімічних продуктів.

Світове виробництво аміаку оцінюється в близько 200 млн т на рік, при цьому загальний обсяг світового ринку – понад 100 млрд доларів. Згідно зі сценарієм сталого розвитку Міжнародного енергетичного агентства (Sustainable Development Scenario, SDS) до 2050 року попит на аміак зросте вдвічі й більше [1].

У 2022 році світове виробництво аміаку скоротилося приблизно на 1 % – до 182,2 млн т. Основною причиною падіння споживання добрив стало зниження їх доступності. При цьому, за оцінками Rabobank, який спеціалізується на фінансуванні аграрного сектору, в 2023 році світове використання добрив зросло на 3 % після зниження на 7 % у 2022 році. За прогнозами, обсяги застосування азоту в 2024 році зростуть на 4 % [2].

Традиційна аміачна промисловість генерує понад 420 млн т вуглекислого газу щорічно. На кожну тонну виробленого аміаку припадає майже 3 т парникових газів [3]. Викиди вуглецю під час виробництва аміаку майже повністю залежать від спожитої енергії. Якщо джерелом енергії є відновлювана чи атомна генерація, викиди мінімальні. І водень, і аміак є потенційними відновлюваними джерелами палива, які відіграватимуть важливу роль, зокрема для декарбонізації галузей, які важко декарбонізувати, – наприклад, виробництво добрив, металургія, танкерні морські перевезення (суднове паливо), розробка корисних копалин, техніка (великогабаритна) кар'єрного типу) та інші [4].

Азотна група добрив є найживванішою як в Україні, так і у світі. Основною сировиною для виробництва азотних добрив на цей час є природний газ, коливання вартості якого істотно впливає на формування ціни добрив азотної групи [5].

Безводний аміак (NH_3), згідно з ДСТУ6221-90, належить до рідких азотних добрив і містить 82,5 % азоту. Під час внесення в ґрунт він перетворюється на газ і утворює гідроксид амонію (NH_4OH), іони якого поглинаються ґрунтом. Виробництво та застосування рідких азотних добрив значно дешевше, ніж твердих, – немає потреби використання додаткових технологічних процесів і, відповідно, капіталовкладень. Так, вартість одиниці азоту в рідкому аміаку приблизно в 1,5–2 рази менше, ніж в аміачній селітрі [6].

Негативні наслідки використання природного газу для отримання аміаку як в екологічній, так і в політичній сфері обумовили розвиток нового напрямку декарбонізації цієї галузі – виробництво аміаку з використанням водню, отриманого із застосуванням як первинних енергоресурсів відновлюваних джерел енергії. Це також сприятиме розвитку в Україні децентралізованої, або розподіленої, генерації, основною відмінністю якої є розподілення генерації енергії замість розподілення готової енергії, а основним принципом є близькість розташування виробничих потужностей до споживача, що передбачає велику кількість споживачів енергії різного типу та потужності [7–9]. Перспективними споживачами зеленого аміаку, що виробляється на автономних вітроводневих комплексах, є місцевий аграрний сектор, який використовує метод підвищення родючості за рахунок прямого внесення аміаку в ґрунти; молочнопереробні та молочноконсервні підприємства, що використовують аміак для знезараження та очищення сирого молока тощо. Це дасть змогу зменшити вартість аміаку для агробізнесу завдяки зниженню логістичних витрат.

Кількісний аналіз ринку зеленого аміаку ускладнений, оскільки в Україні та у світі він перебуває на стадії формування. Для внутрішнього споживання аміаку в агрогалузі орієнтовно потрібно не менше 40 000 т аміаку на рік [10].

Постановка завдання. Визначення на основі аналітичних досліджень основних вихідних даних щодо виробництва зеленого аміаку за рахунок екологічно чистого водню, отриманого електролізом води при використанні як первинної енергії місцевих вітрових енергоресурсів, сприятиме розширенню напрямів водневої енергетики та створенню і впровадженню ефективних вітроводневих комплексів для виробництва аміаку, зокрема в агропромислових підприємствах та фермерських господарствах.

Виклад основного матеріалу. Під час виробництва зеленого аміаку в автономних вітроводневих комплексах використовується технологія синтезу зеленого водню та атмосферного азоту, де ресурсною базою є водень, отриманий електролізом води з використанням електроенергії, генерованої вітроустановкою, та атмосферний азот. Технологічні й технічні аспекти всіх вищезазначених блоків достатньо вивчені й відпрацьовані в Україні. Щодо інших технічних складових, як-от підготовка води, виробничих майданчиків, ємнісного парку та будівництва блоків синтезу, є достатньо європейських виробників та інжинірингових компаній. В Україні ліцензіатом з технології синтезу аміаку є хімічна технологічна компанія ТОВ «ХТК» [10]. Щодо технічного забезпечення, то основним недоліком є відсутність вітчизняного промислового виробництва електролізерів, хоча є досить ефективні розробки, й у довоєнний час проводилась підготовка проектів з їх випуску.

У світі проводяться активні роботи щодо підвищення ефективності процесу електролізу води з метою зниження вартості зеленого водню, що, відповідно, вплине на зниження вартості зеленого аміаку, виробництво якого почали активно впроваджувати світові компанії водневої енергетики, найпоказовіші з яких наведені нижче.

Декарбонізація енергетики в Сполучених Штатах і в усьому світі спрямована на отримання зеленого водню електролізом води від електроенергії, виробленої відновлюваними джерелами енергії, насамперед сонячними та вітровими енергоустановками [11]. Американською компанією First Ammonia на 2025 рік заплановане введення в експлуатацію двох підприємств з виготовлення зеленого аміаку, один із заводів буде розміщений в Німеччині, другий – в США. У технологічному процесі застосовуватимуться твердооксидні електролізери, як первинні енергоджерела – вітрова та сонячна енергія [12].

Сучасні вдосконалені електролізери лужного типу працюють при тиску 3 МПа (30 атм) і споживають 4,3–4,6 кВт·год/нм³ водню; мембранні, з перегородкою, що проводить протони, та високотемпературні парові

електролізери споживають 3,2 кВт·год/нм³ водню. Головною проблемою під час створення вдосконалених електролізерів лужного типу, що працюють при температурах 100–120 °C і тиску 0,1–0,5 МПа, є створення нових електродних та сепараційних матеріалів [13].

Серед зарубіжних компаній, що працюють в галузі електролізу води, як-от Proton Energy Systems Inc., HSSI Electrolyzer, H₂Gen Innovation Inc. тощо, найбільший об'єм продажу мають ті, що орієнтовані на лужні електролізери великої продуктивності. Значні успіхи щодо їх створення і реалізації зараз мають фірми Norsk Hydro Electrolysers (Норвегія), Stuart Energy Systems (Бельгія), Teledyne Inc. (США). Компанія ITM Power запропонувала інновації в галузі конструювання модулів і технологій їх виготовлення, які дають змогу вирішити проблеми впровадження електролізерів з полімерною електролітною мембраною (PEM) у великому масштабі, а також знизити вартість електролізерів [14]. Розроблене нове обладнання – більш компактне та гнучке, з неперевершеним на цей час строком служби, призначене як для промисловості, так і для енергетичних ринків, здатне забезпечити значне поліпшення технічних і економічних можливостей. Комплексна система отримання електролітичного водню компактна, з високими показниками ефективності й експлуатаційною стабільністю, все обладнання в ній об'єднане в один контейнер [15].

Німецький промисловий концерн ThyssenKrupp уклав контракт з американською компанією CF Industries на проектування і постачання в США електролізера потужністю 20 МВт для виробництва зеленого водню. За допомогою нової електролізної установки завод CF Industries вироблятиме 20 тис. т зеленого аміаку за рік. З шістьма заводами з виробництва аміаку CF Industries стане найбільшим у світі комплексом з виробництва цієї сировини для хімічних добрив [16].

Останнім часом спостерігається зацікавленість інвесторів різних країн світу у створенні масштабних проектів з виробництва зеленого аміаку – компанія з розробки спеціальних проектів Helios Industry має намір інвестувати 1 млрд доларів у будівництво в Абу-Дабі нового заводу з виробництва зеленого аміаку з екологічно чистого водню потужністю 200 тис. т зеленого аміаку на рік [17]. Уряд Єгипту підписав рамкову угоду щодо заводу екологічно чистого водню та аміаку в економічній зоні Суецького каналу вартістю 6,75 млрд доларів. В остаточній угоді близько 210 000 т водню буде конвертовано приблизно в 1,2 млн т аміаку. Попередньо передбачено, що проєкт в основному експортуватиме обсяги екологічно чистого NH₃ на ринки Європи [18]. Малайзійська Petronas інвестує 1,6 млрд доларів у підприємство з виробництва зеленого аміаку в Індії, проєкт спрямований на виробництво 5 млн т зеленого аміаку щороку до 2030 року, перші поставки екологічно чистого аміаку почнуться наприкінці 2025 року. AMG Ammonia стане одним із провідних світових виробників зеленого аміаку [19]. EverWind Fuels, північноамериканський незалежний розробник зеленого водню, співпрацював із

CertifyHy™ для попередньої сертифікації екологічного виробництва аміаку EverWind як відновлюваного палива небіологічного походження (RFNBO). Проєкт перетворить сховище палива Point Tupper на завод з виробництва екологічно чистого водню та екологічно чистого аміаку [20].

Низку вітчизняних проєктів з виробництва зеленого аміаку було заплановано ще у довоєнний час. НАК «Нафтогаз України» в 2021 році планував виробляти на існуючих потужностях Одеського припортового заводу (ОПЗ) зелений аміак. Разом з німецьким газовим трейдером RWE Supply & Trading підписано меморандум про взаєморозуміння у сфері розвитку водневої енергетики. Обидві компанії домовилися проаналізувати можливість взаємовигідної співпраці щодо створення повного ланцюга вартості зеленого водню та його похідних, якот аміак, що виробляються в Україні [21]. У межах пілотного водневого проєкту «Нафтогазу України» з RWE Supply & Trading (Німеччина) заплановано виробництво зеленого водню, який далі перероблятиметься на зелений аміак з його подальшим транспортуванням морським шляхом до Німеччини. Вартість проєкту попередньо оцінюється в 500 млн євро [22].

На промисловій вітростанції в селі Довговоля Рівненської обл. у квітні 2021 року анонсовано виконання проєкту у форматі «вітер – водень – аміак». Майбутній вітропарк «Володимирець» складатиметься з 12 інноваційних вітротурбін по 6 МВт кожна, загальною потужністю 72 МВт, прогнозоване виробництво електроенергії – близько 230 ГВт·год на рік. Концепцією проєкту передбачено 100 % реалізації зеленого водню, для виробництва аміаку партнером може бути ПАТ «Рівнеазот», крім того, опрацьовуються інші

можливі варіанти реалізації водню, зокрема для газотранспортної системи України [23].

Фахівці Інституту відновлюваної енергетики, починаючи з 1980 року, проводять наукові дослідження щодо отримання зеленого водню та використання його як енергоносія та акумулювального середовища. Досліджувались різні форми зберігання і транспортування водню та визначались найприйнятніші методи акумулювання з урахуванням подальшого його використання в енергосистемах на основі відновлюваних джерел енергії: спалювання з отриманням теплової енергії, перетворення на електричну енергію в мотор-генераторах і паливних елементах, використання паливних сумішей з бензином в автотранспорті. Прикладом впровадження технологій зеленої водневої енергетики є розробка проєкту та впровадження в Фольк-ецентрі (Данія) у 1995 році першої в Європі вітроводневої станції, результати подальших випробувань якої стали реальною основою для розвитку сучасної екологічно чистої галузі водневої енергетики. Новітніми дослідженнями передбачено розробку автономних оншорних та офшорних вітроводневих комплексів. Запропоновано низку рішень для ефективного впровадження автономних вітроводневих комплексів різного складу, типу навантаження та потужності залежно від наявності енергоресурсів та потреб споживачів. Схематичне зображення вітроводневого комплексу для отримання аміаку та азотних добрив з використанням енергії вітру як первинного енергоджерела наведено на рисунку [24].

Ця система може бути використана під час створення нових проєктів різної потужності для виробництва водню, аміаку та азотних добрив, крім того, модуль «вітроустановка-електролізер» можна впроваджувати на вже існуючих виробництвах аміаку.

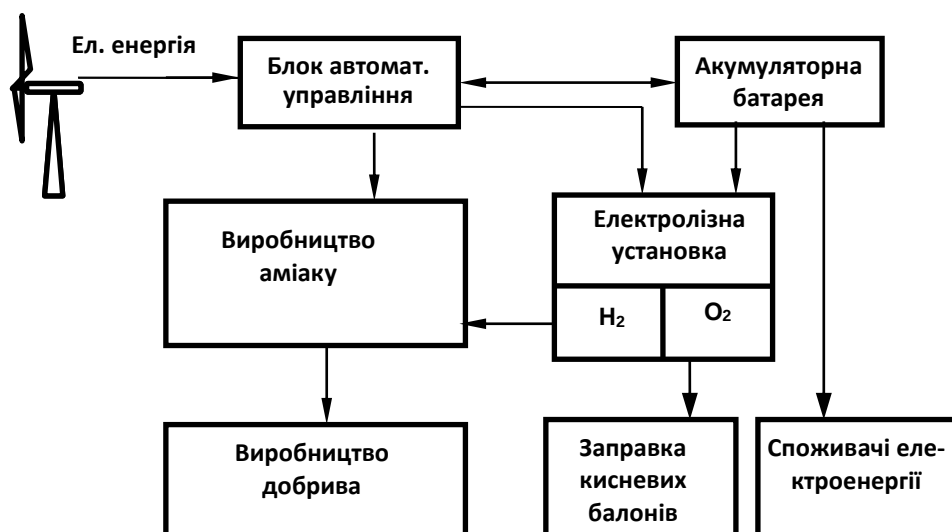


Рисунок. Вітроводневий комплекс для отримання аміаку
Figure. Wind-hydrogen complex for obtaining ammonia

Отриманий зелений аміак можна використовувати безпосередньо як добриво в агрогосподарствах, у разі потреби можливе його подальше застосування для

виробництва добрив або в інших технологічних процесах. Слід відзначити, що в процесі виробництва зеленого водню електролітичним розкладом води супутнім

продуктом є кисень високого рівня чистоти, який направлятиметься на подальше використання в різних галузях народного господарства, зокрема в медицині.

Згідно з [25] показники витрат сировини та енергоресурсів на виробництво зеленого аміаку при потужності виробництва 20 тис. т/рік (60 т/добу) такі:

- зеленого водню – 5150 нм³/год та 2100 нм³/1 т аміаку;
- азоту – 1750 нм³/год та 700 нм³/1 т аміаку;
- електроенергії – 1060 кВт·год та 424 кВт·год/1 т аміаку.

Для задоволення локальних або регіональних потреб у зеленому аміаку необхідно будувати аміачні комплекси потужністю від 20 до 50 тис. т/рік. Основними елементами таких комплексів будуть електролізерний блок потужністю від 25 до 60 МВт і блок синтезу аміаку відповідно потужністю від 20 до 50 тис. т/рік [10].

Визначено орієнтовні показники необхідної ресурсної бази та отриманої продукції при використанні в процесі експлуатації вітроводневих комплексів для отримання аміаку електролізних установок різної потужності. У таблиці наведені розрахункові дані, орієнтовані на використання 4,5 кВт·год електроенергії та 0,002 м³ прісної води для отримання 1 нм³ водню електролітичним розкладом води при ККД електролізера 0,8 та роботі протягом 8000 робочих годин за рік [26, 27]. Необхідні об'єми азоту визначені з урахуванням співвідношення: на 5150 нм³ – Н₂ 1750 нм³ азоту, а вагова кількість виробленого аміаку визначається з розрахунку: на 1 т аміаку необхідно витратити 2100 нм³ водню та 700 нм³ азоту. Потреба в електроенергії для виробництва аміаку становить 424 кВт·год на 1 т аміаку [25]. Загальна кількість електроенергії на виробництво водню і аміаку визначається електроенергією, що отримана від вітроустановки та є сумою витрат на електролітичне отримання водню і синтез аміаку.

Таблиця. Показники ресурсної бази та отриманої продукції при виробництві зеленого аміаку

Table. Indicators of the resource base and obtained products in the production of green ammonia

Потужність електролізера	Потреба в електроенергії для виробництва водню, млн кВт·год	Виробництво водню, млн нм ³	Витрати води на отримання водню, млн м ³	Витрати азоту, млн нм ³	Виробництво аміаку, т	Потреба в електроенергії для виробництва аміаку, млн кВт·год	Загальна кількість електроенергії на виробництво водню та аміаку, млн кВт·год	Необхідна потужність оншорних ВЕС, МВт	
								ККВ 0,3	ККВ 0,45
1 МВт	6,4	1,42	0,003	0,48	676,2	0,287	6,7	≈2,6	≈1,7
20 МВт	128	28,4	0,06	9,6	13 524	5,7	134	≈52	≈35
50 МВт	320	71	0,15	24	33 810	14,4	334	≈130	≈86

Оншорна ВЕС потужністю 1 МВт з коефіцієнтом корисного використання (ККВ) 0,3 при постійній роботі протягом року може виробляти близько 2,6 млн кВт·год електроенергії, в разі застосування вітроенергетичного обладнання з коефіцієнтом корисного використання 0,45 – близько 3,9 млн кВт·год. Отже, загальні енергетичні витрати для 1 МВт електролізних потужностей забезпечуються роботою оншорних ВЕС потужністю близько 2 МВт при ККВ 0,45 та 3 МВт при ККВ 0,3. В разі створення офшорних вітроводневих комплексів загальні енергетичні витрати для 1 МВт електролізних потужностей забезпечуються роботою офшорних ВЕС потужністю близько 1,5–2 МВт при ККВ 0,45–0,5.

Оскільки викиди парникових газів на 1 т аміаку, виробленого традиційною технологією, становлять майже 3 т [3], експлуатація 1 МВт електролізних потужностей для виробництва аміаку дозволяє зменшити викиди парникових газів приблизно на 2 т; 20 МВт – близько 40 тис. т, 50 МВт – близько 100 тис. т.

Витрати на виробництво зеленого аміаку залишаються непомірно високими для широкого впровадження. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії

(IRENA) оцінює витрати на виробництво однієї тонни аміаку із зеленого водню до 1400 дол, тоді як аміак, отриманий через використання природного газу, коштує до 340 дол [4].

Оскільки головною перешкодою широкомасштабного отримання зеленого аміаку є теперішня висока вартість екологічно чистого водню, 30 європейських гравців на енергетичному ринку започаткували проєкт HyDeal Ambition, який має на меті постачання зеленого водню по 1,5 євро за кілограм вже до 2030 року завдяки інноваціям, пов'язаним з його виробництвом, зберіганням та транспортуванням. Результатом може стати поява низки нових застосувань зеленого аміаку [28].

У Канаді передбачається впровадження комерційного виробництва зеленого водню та аміаку – McDermott, повністю інтегрований постачальник інженерних та будівельних рішень для енергетичної промисловості, що базується в Х'юстоні, планує побудову в центральній частині Ньюфаундленду першого в Канаді комерційного екологічного підприємства з виробництва водню та аміаку. Завод матиме сонячну фотоелектричну установку потужністю 150 МВт і розроблятиме вітрову електростанцію з 530 турбінами. Очікується можливість

генерування 165 тис. т водню та 5000 метричних тонн аміаку щодня. Впровадження проекту сприятиме досягненню цілей щодо нульового чистого викиду до 2050 року відповідно до Водневої стратегії Канади, оголошеної урядом країни 2020 року [29].

Одним із перспективних напрямів для вітчизняного агросектору є вивчення досвіду і запровадження канадської технології, що дозволяє фермерам виробляти власний зелений аміак з повітря та води, використовуючи відновлювану енергію. Система спроектована як автоматична та самоконтрольована, нею також можна керувати віддалено, і складається вона з чотирьох частин:

- генератор азоту для отримання азоту з повітря;
- електролізер води для виробництва водню (в межах пілотного проекту в Манітобі проходять оцінювання два різні типи);
- патентований конвертор аміачного синтезу, який виробляє зелений аміак з водню та азоту;
- контейнери для аміаку.
- Система забезпечує фермерів таким ключовим ресурсом, як азотні добрива; зелений аміак може мати також інші застосовування – як паливе для двигунів внутрішнього згоряння замість пропану, для систем сушіння зерна тощо. Потенційними клієнтами технології виробництва зеленого аміаку є не лише великі господарства, а й значна кількість тепличних господарств [3].

Висновки. Створення та експлуатація автономних вітроводневих комплексів є одним із перспективних шляхів децентралізації вітроелектричної галузі України та декарбонізації вітчизняної економіки. Використання зеленого водню як сировини для отримання аміаку, що замінить природний газ, матиме додатковий позитивний вплив на довкілля і, відповідно, на рівень економічного розвитку. Перспектива використання зеленого водню для отримання зеленого аміаку сприятиме також появі нових технологій, розгляд яких допоможе під час проектування та створення ефективних вітроводневих станцій. Представлені розрахункові дані, визначені на основі аналітичних досліджень, є базовими для встановлення орієнтовних показників виробництва зеленого аміаку при певній потужності електролізного обладнання. Під час розробки конкретних робочих проектів необхідно проводити подальші дослідження з урахуванням низки факторів, насамперед умов територіального розташування, місцевої ресурсної та енергетичної бази, а також детального аналізу способів визначення ефективності роботи як окремих елементів, так і енергокомплексу в цілому.

Широкое впровадження запропонованих комплексів у територіальних громадах з господарствами аграрного призначення зробить виробництво стратегічного продукту аміаку децентралізованим та підвищить гнучкість виробництва; за рахунок зниження логістичних витрат сприятиме зменшенню вартості аміаку, що застосовується як добриво та в різних технологічних

агропромислових процесах. Експлуатація вітроводневих комплексів для виробництва аміаку дозволить ліквідувати негативні наслідки використання природного газу під час виробництва аміаку як в екологічній, так і в політичній сфері й сприятиме позбавленню України та ЄС залежності від транспортування зрідженого аміаку з країни-агресора.

ПОСИЛАННЯ

1. Потенціал аміаку: не лише добриво, а й чиста енергія [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/03/2/697594/>
2. Глобальний ринок мінеральних добрив у 2024 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukragroconsult.com/news/globalnyj-rynok-mineralnyh-dobryv-u-2024-roczj/>
3. «Зелений» аміак – у кожне господарство [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ifarming.com.ua/itehnologii/biofarming/zelenyj-amiak-u-kozhne-gospodarstvo>
4. Не лише добрива. Як аміак може замінити викопне паливо [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/authors/6364f070f1544/>
5. Ціни на добрива перед посівною – чи подешевшає КАС і селітра [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kurkul.com/spetsproekty/1566-tsini-na-dobryva-pered-posivnoyu--chi-podeshevshaye-kas-i-selitra>
6. Аміак, історія назви, біологічна роль аміаку, виробники безводного аміаку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nh3.com.ua/uk/amiak-istoria-nazvi-biologicna-rol-amiaku-virobniki-bezvodnogo-amiaku>
7. Реформа "зеленої" енергетики: прийнято Закон щодо стимулювання розвитку енергоринку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://biz.ligazakon.net/news/220617_reforma-zeleno-energetiki-priynyato-zakon-shchodo-stimulyuvannya-rozvitku-energorinku
8. Закон № 9011-д підписано Президентом: які зміни чекать енергетичну систему [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukraine-oss.com/zakon-%E2%84%96-9011-d-pidpysano-prezydentom-yaki-zminy-chekayut-energetychnu-systemu/>
9. Чому в Україні слід розвивати децентралізовану енергетику вже сьогодні? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2018/06/Brief-rozpodilena-generacia-s.pdf>
10. Для чого Україні розвивати виробництва "зеленого" аміаку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://enerhodzherela.com.ua/novyny>.

11. Електролізери відіграють все більшу роль в американському водневому паливі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/water-electrolysis-role-h2-usa/8565234/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=hcMjbbhX7O5DlsU
12. First Ammonia будує два нових виробництва зеленого аміаку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://infoindustria.com.ua/first-ammonia-budu%D1%94-dva-novih-virobnictva-zelenogo-amiaku/>
13. Відновлювані джерела енергії / За ред. С. О. Кудрі. Київ: Ін-т відновлюваної енергетики НАНУ. 2020. 392 с.
14. Виробництво водню гігаватного масштабу за допомогою офшорної вітрової енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://elektrovesti.net/67292_virobnitstvo-vodnyu-gigavatnogo-masshtabu-za-dopomogoyu-ofshornoj-vitrovoi-energii
15. Obladnannia dlia pokolinnia N2: De Nora та McPhy Energy pidpysaly tekhnolohichne partnerstvo [Equipment for N2 generation De Nora and McPhy Energy have signed a technology partnership]. URL: www.denora.com, www.mcphy.com
16. У США побудують водневі потужності для найбільшого в світі виробництва аміаку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://glavcom.ua/new_energy/news/u-ssha-pobuduyut-vodnevi-potuzhnosti-dlya-naybilshogo-vsiviti-virobnictva-amiaku-753510.html
17. Абу-Дабі інвестує \$1 млрд у виробництво аміаку з зеленого водню [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://glavcom.ua/new_energy/news/abu-dabi-investuje-1-mlrd-u-virobnictvo-amiaku-z-zelenogo-vodnyu-761414.html
18. Єгипет підписав угоду з китайським розробником щодо екологічного водню та аміаку на 7 мільярдів доларів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hydrogeninsight.com/production/egypt-signs-deal-with-chinese-developer-for-7bn-green-hydrogen-and-ammonia-project/2-1-1544225>
19. Petronas інвестує 1,6 мільярда у виробництво зеленого аміаку в Індії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.investmentmonitor.ai/news/petronas-to-invest-1-6-billion-in-green-ammonia-project-india/?cf-view>
20. Перший у Канаді проєкт з виробництва зеленого водню та аміаку пройшов попередню сертифікацію [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-everwind-certifyhy/8561516/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=h5hg6n4hN85DlsU&expand_article=1
21. «Нафтогаз» хоче виробляти «зелений» аміак на потужностях ОПЗ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/naftogaz-khoche-vyrobiaty-zelenyi-amiak-na-potuzhnostiakh-opz>
22. «Нафтогаз» і RWE запускають виробництво «зеленого» аміаку за EUR 500 млн [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://thepage.ua/ua/news/naftogaz-zapustit-virobnictvo-zelenogo-amiaku-za-eur500-mln>
23. У селі на Рівненщині планують виробляти водень для «зеленого» аміаку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eco.rayon.in.ua/news/402812-u-dovgovoli-planuyut-viroblyati-voden-dlya-zelenogo-amiaku>
24. Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. Д. Використання енергії вітру для виробництва аміаку. Мат-ли XVI-ї міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність XXI століття». Київ, 28-29 травня 2015 р. С. 255–257.
25. Виробництво «зеленого» метанолу і «зеленого» аміаку з «зеленого» водню [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://saee.gov.ua/sites/default/files/RODIN_Leonid_Hydrogen_23062022.pdf
26. Петренко К. В., Іванченко І. В., Кармазін О. О. Аналіз водних ресурсів України в контексті можливості їх використання для виробництва «зеленого» водню. Відновлювана енергетика. 2021. № 2(65). С. 19–28.
27. Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. А. Опріснення морської води для отримання зеленого водню. Відновлювана енергетика. 2021. № 4. С. 6–17.
28. Зелений аміак [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://matrix-info.com/zelenyj-amiak/>
29. У Канаді стане реальністю комерційне виробництво зеленого водню та аміаку.
30. <https://www.hydrogenfuelnews.com/commercial-green-hydrogen-canada/8565406/>

REFERENCES

1. Potensial amiaku: ne lyshe dobrovo, a y chysta enerhiia [Potential of ammonia: not only fertilizer, but also clean energy]. – URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/03/2/697594/> [in Ukrainian]
2. Hlobalnyi rynek mineralnykh dobryv u 2024 rotsi [Global mineral fertilizers market in 2024]. URL: <https://ukragroconsult.com/news/globalnyj-rynok-mineralnyh-dobryv-u-2024-rocz/2/> [in Ukrainian]

3. «Zelenyi» amiak – u kozhne gospodarstvo ["Green" ammonia - in every household]. URL: <https://ifarming.com.ua/itehnologii/biofarming/zelenyj-amiak-u-kozhne-gospodarstvo> [in Ukrainian]
4. Ne lyshe dobryva. Yak amiak mozhe zaminyty vykopne palyvo [Not only fertilizers. How ammonia can replace fossil fuels]. URL: <https://www.epravda.com.ua/authors/6364f070f1544/> [in Ukrainian]
5. Tsiny na dobryva pered posivnoiu – chy podeshevshaie KAS i selitra [Fertilizer prices before sowing - will KAS and saltpetre become cheaper?]. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/1566-tsini-na-dobryva-pered-posivnoyu--chi-podeshevshaye-kas-i-selitra> [in Ukrainian]
6. Amiak, istoriia nazvy, biolohichna rol amiaku, vyrobnyky bezvodnoho amiaku [Ammonia, history of the name, biological role of ammonia, producers of anhydrous ammonia]. URL: <https://nh3.com.ua/uk/amiak-istoria-nazvi-biologicna-rol-amiaku-virobniki-bezvodnogo-amiaku> [in Ukrainian]
7. Reforma "zelenoi" enerhetyky: pryiniato Zakon shchodo stymuliuvannia rozvytku enerhorynku [Reform of "green" energy: the Law on stimulating the development of the energy market was adopted]. URL: https://biz.ligazakon.net/news/220617_reforma-zeleno-energetiki-priynyato-zakon-shchodo-stimulyuvannya-rozvitku-energorinku [in Ukrainian]
8. Zakon № 9011-d pidpysano Prezydentom: yaki zminy chekaiut enerhetychnu systemu [Law No. 9011-d signed by the President: what changes await the energy system]. URL: <https://ukraine-oss.com/zakon-%E2%84%96-9011-d-pidpysano-prezydentom-yaki-zminy-che kayut-energetychnu-systemu/> [in Ukrainian]
9. Chomu v Ukraini slid rozvyvaty detsentralizovanu enerhetyku vzhe sohodni? [Why should Ukraine develop decentralized energy already today?]. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2018/06/Brief-rozpodilena-generacia-s.pdf> [in Ukrainian]
10. Dlia choho Ukraini rozvyvaty vyrobnytstva "zelenoho" amiaku [Why should Ukraine develop "green" ammonia production?]. URL: <https://enerhodzherela.com.ua/no-vyny> [in Ukrainian]
11. Elektrolizery vidihraiut vse bilshu rol v amerykanskomu vodnevomu palyvi [Electrolyzers play an increasingly important role in American hydrogen fuel]. URL: https://www.hydrogenfuelnews.com/water-electrolysis-role-h2-usa/8565234/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=hcMjbbhX7O5DIsU [in Ukrainian]
12. First Ammonia buduie dva novykh vyrobnytstva zelenoho amiaku [First Ammonia is building two new green ammonia plants]. URL: <https://infoindustria.com.ua/first-ammonia-budu%D1%94-dva-novyh-virobnytstva-zelenogo-amiaku/> [in Ukrainian]
13. Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources]/ Za red. S. O. Kudri. Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU. 2020. 392 p. [in Ukrainian]
14. Vyrobnytstvo vodniu hihavatnoho mashtabu za dopomohoiu ofshornoj vitrovoi enerhii [Gigawatt-scale hydrogen production using offshore wind energy]. URL: https://elektrovesti.net/67292_virobnitstvo-vodnyu-gigavatnogo-mashtabu-za-dopomogoyu-ofshornoj-vitrovoi-enerгии [in Ukrainian]
15. Obladnannia dlia pokolinnia N2: De Nora ta McPhy Energy pidpysaly tekhnolohichne partnerstvo [Equipment for N2 generation De Nora and McPhy Energy have signed a technology partnership]. URL: www.denora.com, www.mcphy.com [in Ukrainian]
16. U SSHA pobuduiut vodnevi potuzhnosti dlia naibilshoho v sviti vyrobnytstva amiaku [The USA will build hydrogen facilities for the world's largest production of ammonia]. URL: https://glavcom.ua/new_energy/news/u-ssha-pobuduyut-vodnevi-potuzhnosti-dlya-naybilshogo-v-sviti-virobnictva-amiaku-753510.html [in Ukrainian]
17. Abu-Dabi investuie \$1 mlrd u vyrobnytstvo amiaku z zelenoho vodniu [Abu Dhabi invests \$1 billion in the production of ammonia from green hydrogen]. URL: https://glavcom.ua/new_energy/news/abu-dabi-investuje-1-mlrd-u-virobnictva-amiaku-z-zelenogo-vodnyu-761414.html [in Ukrainian]
18. Iehypet pidpysav uhodu z kytais'kym rozrobnykom shchodo ekolohichnoho vodniu ta amiaku na 7 miliardiv dolariv [Egypt signs \$7 billion green hydrogen and ammonia deal with Chinese developer]. URL: <https://www.hydrogeninsight.com/production/egypt-signs-deal-with-chinese-developer-for-7bn-green-hydrogen-and-ammonia-project/2-1-1544225> [in Ukrainian]
19. Petronas investuie 1,6 miliarda u vyrobnytstvo zelenoho amiaku v Indii [Petronas invests 1.6 billion in the production of green ammonia in India]. URL: <https://www.investmentmonitor.ai/news/petronas-to-invest-1-6-billion-in-green-ammonia-project-india/?cf-view> [in Ukrainian]
20. Pershyi u Kanadi proiekt z vyrobnytstva zelenoho vodniu ta amiaku proishov poperedniu sertyfikatsiiu [Canada's first green hydrogen and ammonia production project has passed preliminary certification]. URL: https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-everwind-certification/8561516/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=h5hg6n4hN85DIsU&expand_article=1 [in Ukrainian]
21. «Naftohaz» khoche vyrobliaty «zelenyi» amiak na potuzhnostiakh OPZ ["Naftogaz" wants to produce "green" ammonia at OPZ facilities]. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/naftohaz-khoche-vyrobliaty-zelenyi-amiak-na-potuzhnostiakh-opz> [in Ukrainian]
22. «Naftohaz» i RWE zapustiat vyrobnytstvo «zelenoho» amiaku za EUR 500 mln ["Naftogaz" and RWE will

- launch the production of "green" ammonia for EUR 500 million]. URL: <https://thep-age.ua/ua/news/naftogaz-zapustit-virobnictvo-zelenogo-amiaku-za-eur500-mln> [in Ukrainian]
23. U seli na Rivnenshchyni planuiut vyroblyaty voden dlia «zelenoho» amiaku [A village in the Rivne region plans to produce hydrogen for "green" ammonia]. URL: <https://eco.rayon.in.ua/news/402812-u-dovgovoli-planuyut-viroblyati-voden-dlya-zelenogo-amiaku> [in Ukrainian]
24. Kudria S. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ia., Tkalenko M. D. Vykorystannia enerhii vitru dlia vyrobnytstva amiaku [Using wind energy to produce ammonia]. Mat-ly KhVI-oi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist KhKhI stolittia». Kyiv, 28-29 may 2015 p. S. 255–257. [in Ukrainian]
25. Vyrobnytstvo «zelenoho» metanolu i «zelenoho» amiaku z «zelenoho» vodniu [Production of "green" methanol and "green" ammonia from "green" hydrogen]. URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/RO-DIN_Leonid_Hydrogen_23062022.pdf [in Ukrainian]
26. Petrenko K. V., Ivanchenko I. V., Karmazin O. O. Analiz vodnykh resursiv Ukrainy v konteksti mozhlyvosti yikh vykorystannia dlia vyrobnytstva «zelenoho» vodniu [Analysis of water resources of Ukraine in the context of the possibility of their use for the production of "green" hydrogen]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2021. №2(65). S. 19–28. [in Ukrainian].
27. Kudria S. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya., Tkalenko M. A. Oprisnennia morskoi vody dlia otrymannia zelenoho vodniu [Desalination of sea water to obtain green hydrogen]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2021. №4(67). S. 6–17. [in Ukrainian]
28. Zelenyi amiak [Green ammonia]. URL: <https://matrix-info.com/zelenyj-amiak/> [in Ukrainian]
29. U Kanadi stane realnistiu komertsiiine vyrobnytstvo zelenoho vodniu ta amiaku [Commercial production of green hydrogen and ammonia will become a reality in Canada]. URL: <https://www.hydrogenfuelnews.com/commercial-green-hydrogen-canada/8565406/> [in Ukrainian]
-