

# ЕКОЛОГІЧНІ, ЕКОНОМІЧНІ ТА ПРАВОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2022, 1-2(68-69): 127–138  
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.127>

УДК 620.9:661.53:662.769 Ігор Вольчин<sup>1</sup>, д.т.н., ст.наук.співр., <https://orcid.org/0000-0002-5388-4984>

Владислав Ращепкін<sup>1\*</sup>, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0002-8031-563X>

Данило Череватський<sup>2</sup>, д.е.н., ст.наук.співр., <https://orcid.org/0000-0003-4038-6393>;

<sup>1</sup> Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, вул. Андріївська, 19, м. Київ, Україна  
e-mail: [ceti@i.kiev.ua](mailto:ceti@i.kiev.ua)

<sup>2</sup> Інститут економіки промисловості НАН України, 03057, Київ, вул. Марії Капніст, 2

\* Автор-кореспондент: [slava003@ukr.net](mailto:slava003@ukr.net)

## ВИРОБНИЦТВО ЗЕЛЕНОГО АМОНІАКУ ДЛЯ ЗЕЛЕНОГО ВИБОРУ УКРАЇНИ

**Анотація.** Зелений енергетичний перехід України до 2050 р. передбачає низку енергетичних трансформацій в економіці, включаючи декарбонізацію, відмову від викопного палива та подальший розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Для тривалого зберігання енергії, виробленої ВДЕ, найбільш придатними є хімічні системи з конверсією електрики в хімічну енергію палив, таких як водень і амоніак, при спалюванні яких не утворюються викиди оксиду і діоксиду вуглецю, діоксиду сірки та пилу. Потужності виробництва амоніаку за традиційною технологією є великими споживачами викопного палива і електроенергії та емітентами сотень мільйонів тон діоксиду вуглецю. Екологічною альтернативою є синтез зеленого амоніаку на базі електролізного виробництва водню за рахунок електроенергії ВДЕ. Але це потребує великої кількості електроенергії. В умовах України при річному попиті на виробництво 5 млн т безвуглецевого амоніаку потрібно споживати 55 млрд кВт·год електроенергії. Для отримання зеленого амоніаку в Україні необхідно різко збільшити потужності АЕС та ВДЕ та відмовитися від використання вугільних електростанцій. Децентралізоване виробництво зеленого амоніаку може стати ефективним регулятором потужності в енергосистемі без обмежень на роботу АЕС та ВДЕ. Початок цього виробництва настане після відпрацювання технологій синтезу зеленого амоніаку та закінчення дії преференцій ВДЕ на енергоринку України.

**Ключові слова:** амоніак, діоксид вуглецю, викиди, електроенергія, ВДЕ, споживач-регулятор.

### 1. Вступ

Протидія глобальним змінам клімату та захист довкілля стають одним з головних пріоритетів у світовій політиці, що підтверджено рішеннями римського саміту G20[1] та 26-ї Конференції Сторін РК ООН про зміну клімату COP26 (Глазго, Велика Британія) [2], які відбулися восени 2021 р. Конференція COP26 задекларувала закінчення «вугільної» ери в економіці протягом найближчого часу. Усі країни-учасники висловили свої прагнення скоротити антропогенні викиди парникових газів, насамперед, вуглекислого газу.

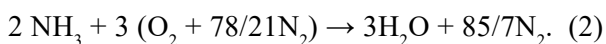
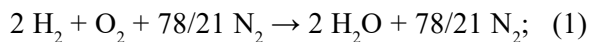
В Україні в 2020 р. було представлено проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 р. [3], формування якої зумовлено істотною трансформацією підходів до розвитку енергетики в світі у контексті її екологізації та декарбонізації з особливою увагою до про-

blem боротьби зі зміною клімату та досягнення глобальних Цілей сталого розвитку, прийнятих на саміті Генеральної Асамблеї ООН у вересні 2016 р. Стратегія Європейського Зеленого Курсу (European Green Deal) 2019 р. [4, 5] спрямована на істотне прискорення енергетичних трансформацій в країнах ЄС, що відобразатиметься на усіх сферах економіки, а також на співпраці з іншими країнами Європи та світу. Ці трансформації стануть одночасно великим викликом та можливістю для України як держави, що має надзвичайно амбітну Угоду про асоціацію з ЄС і є стороною Договору про заснування Енергетичного Співтовариства. Визначальною метою Концепції є зменшення обсягу викидів парникових газів таким чином, щоб у соціально прийнятний та економічно ефективний спосіб забезпечити перехід до кліматично нейтральної економіки України у 2070 р. На зміну видобутку викопних енергоресурсів має постати виробництво енер-

© І. ВОЛЬЧИН, В. РАЩЕПКІН, Д. ЧЕРЕВАТСЬКИЙ, 2022

гії з відновлюваних джерел. Але постає питання зберігання електроенергії, отриманої вітровими та сонячними (фотовольтаїчними) електростанціями.

На рис. 1 представлено графічне порівняння основних технологій зберігання електричної енергії в залежності від затребуваної потужності та часу зберігання [6]. Системи виробництва з електрики хімічних речовин як палива можуть забезпечити широкий спектр екологічно придатних потужностей (від сотень кіловат до гігават) і найбільш тривалі терміни зберігання енергії (протягом тижнів і місяців) в порівнянні з механічними, тепломеханічними, електрохімічними та електричними системами зберігання енергії. Перш за все, мова йде про водень та амоніак, які не містять у своєму складі вуглець. При спалюванні водню  $H_2$  та амоніаку  $NH_3$  у повітрі основними продуктами є водяна пара та азот, які утворюються в газофазних реакціях:



Тому при спалюванні  $H_2$  та  $NH_3$  відсутні викиди пилу, діоксиду сірки  $SO_2$  і оксиду вуглецю  $CO$  як забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю  $CO_2$  як парникового газу.

Амоніак містить 17,6% водню і має низьке значення масової нижчої теплоти згоряння 18,8 МДж/кг порівняно з воднем (120 МДж/кг) [7]. Але амоніак має беззаперечні переваги перед воднем щодо затрат на його зберігання та транспортування [6–12]. У 2020 р. світове виробництво амоніаку становило 144 млн т. Найбільшими виробниками амоніаку були Китай (48,0 млн т), Індія (12,0 млн т), Росія (10,3 млн т) і США (9,2 млн т) [13]. В Україні виробництво  $NH_3$  у 2020 р. становило близько 5 млн т.

Якщо зараз у світі 75% амоніаку застосовується для виробництва азотних добрив [6], то в майбутньому саме паливне призначення  $NH_3$  має змінити попит на цю хімічну речовину. Зростання виробітку амоніаку (рис. 2) за рахунок енергетичного використання як безвуглецевого палива та носія водню матиме експоненціальний характер [14].

Амоніак як паливо для енергетики не створює екологічних та кліматичних проблем, але ці проблеми виникають на стадії його виробництва. Складність цих проблем характеризує умовний колір продукту (від менш до більш безпечного) [8]: «сірим» прийнято називати амоніак за традиційною каталітичною технологією Габера-Боша, при виробництві якого застосовують водень, отриманий з природного газу чи вугілля; «си-

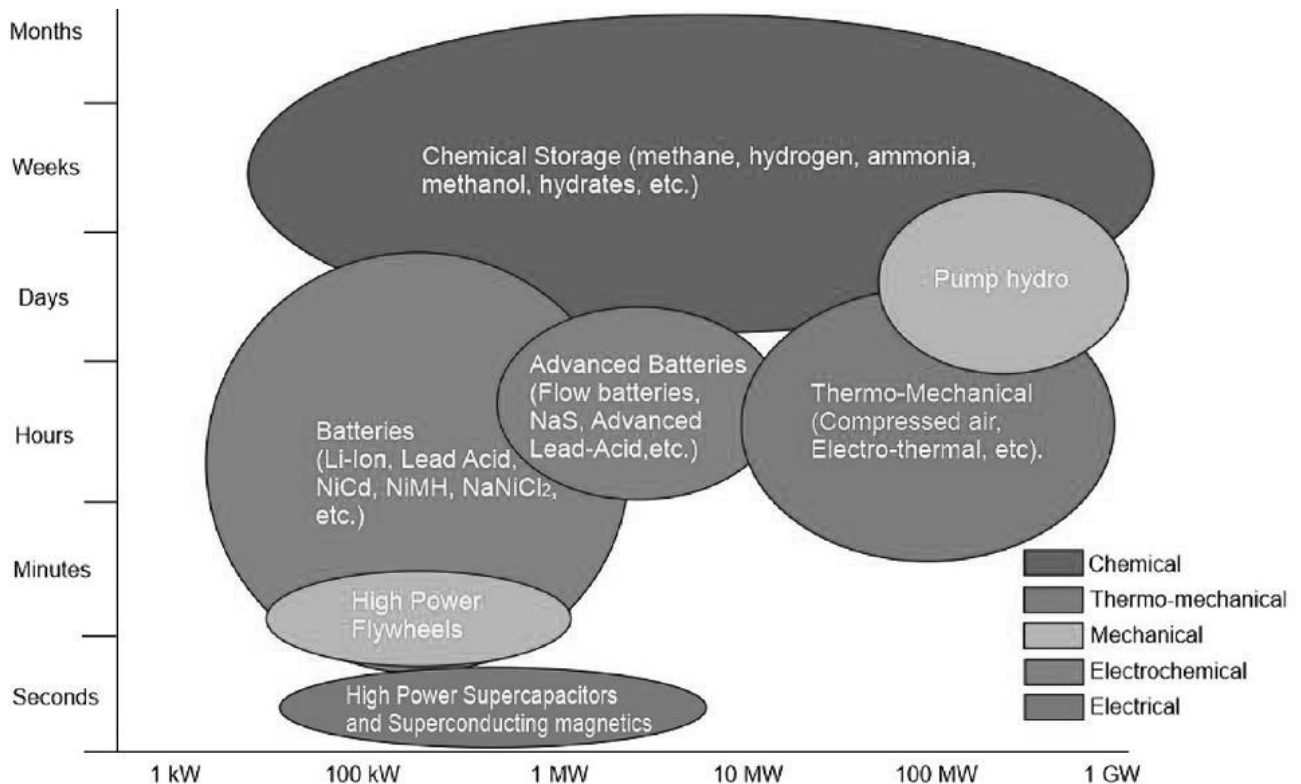


Рис. 1. Порівняння різних технологій зберігання енергії [6]

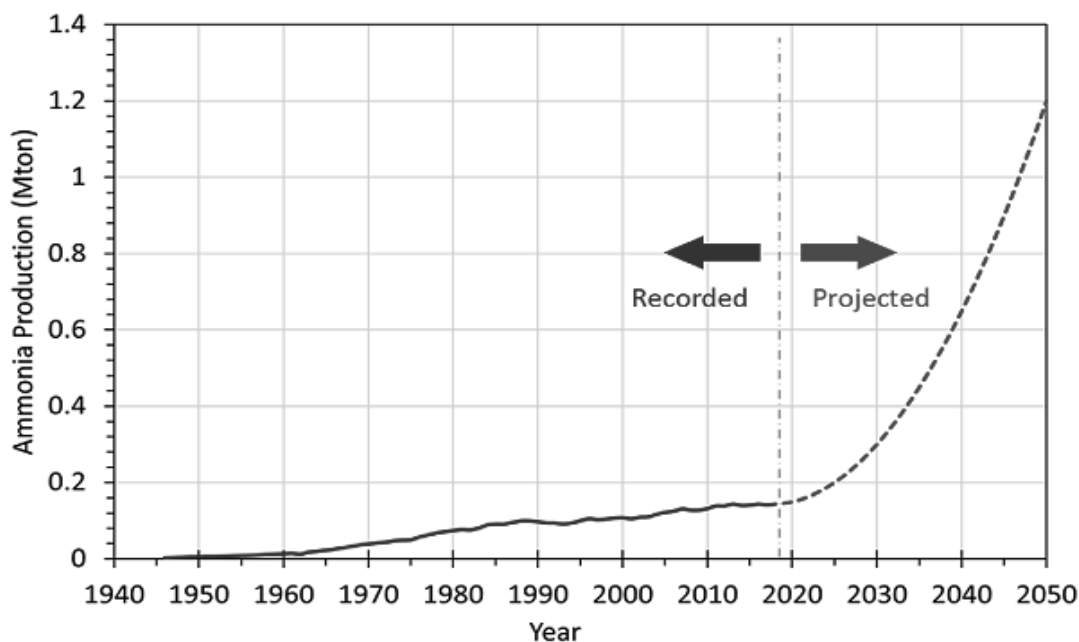


Рис. 2. Факт та прогноз світового виробітку амоніаку [13]

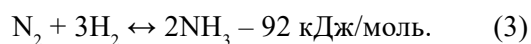
ній» – це звичайний амоніак, при виробництві якого утворений  $\text{CO}_2$  уловлюється, утилізується та складається; «зелений» – це амоніак, що виготовляється з використанням водню, який утворюється в процесі електролізу води при використанні енергії сонячних та вітрових електростанцій, «жовтий» – амоніак, що виготовляється за участю водню, який отримують електролізом води при використанні енергії атомних електростанцій.

Основні зусилля науковців в останні роки приділено переважно питанням отримання зеленого амоніаку та його використання в енергетиці як палива чи носія водню [6–8, 12–18]. Проте проблеми енергетичної та техніко-економічної доцільності його застосування поки що не привертали до себе належної уваги.

Це дослідження присвячено особливостям виробництва зеленого амоніаку для України з метою визначення найбільш раціональних шляхів подальшого розвитку.

## 2. Основна частина

Традиційний процес Габера-Боша отримання амоніаку відбувається при високій температурі (450–600 °C) і під тиском (10 МПа–25 МПа) в присутності заліза як каталізатора згідно хімічної реакції [13]:



Джерелом  $\text{N}_2$  при використанні методу Габера-Боша є азот повітря, а джерелом водню – вуглеводневе паливо, насамперед природний

газ або вугілля. У такому процесі при паровому риформінгу відбувається конверсія вуглеводневих сполук палива в водень з виділенням значної кількості  $\text{CO}_2$ . Хоча реакція (3) є екзотермічною, але для забезпечення умов проведення високотемпературного синтезу амоніаку під тиском витрачаються значні кількості теплової та електричної енергії. У США в 2010 р. на виробництво 1 т  $\text{NH}_3$  було витрачено в середньому 4700 кВтгод теплової енергії, 415 кВт·год електроенергії та 6300 кВт·год теплової енергії, запасеної у використаному  $\text{CH}_4$  [19].

У табл. 1 наведено регіональні значення споживання енергії та викидів  $\text{CO}_2$  при виробництві  $\text{NH}_3$ . Великі значення питомого споживання енергії та питомих викидів діоксиду вуглецю в Китаї та Індії пояснюються переважним використанням вугілля як сировини для виробництва водню.

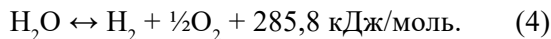
Таблиця 1. Споживання енергії та викиди діоксиду вуглецю при виробництві амоніаку [13]

Регіон	Споживання енергії, МДж/т $\text{NH}_3$	Викиди діоксиду вуглецю, т $\text{CO}_2$ екв/т $\text{NH}_3$
Західна Європа	41,6	2,34
Північна Америка	45,5	2,55
Росія і Центральна Європа	58,9	3,31
Китай та Індія	64,3	5,21
Інші країни	43,7	2,45
Середньосвітове	52,8	3,45

Загальносвітові викиди вуглекислого газу від виробництва амоніаку в 2020 р. становили майже 500 млн т CO<sub>2</sub>, а споживання електроенергії для цього було близько 60 млрд кВт·год. В Україні при річному виробництві 5 млн т амоніаку у 2020 р. було спожито 2,08 млрд кВт·год електроенергії та утворилося 16,6 млн т діоксиду вуглецю.

Взагалі, переважна частина електроенергії в світі виробляється на теплових електростанціях шляхом спалювання викопного палива, при спалюванні якого утворюється мільйони тон забруднюючих речовин та сотні мільйонів тон діоксиду вуглецю. Використання цього джерела електроенергії робить виробництво амоніаку «сірим».

Екологічно полярним виробництву «сірого» NH<sub>3</sub> є «зелений» амоніак [8], що використовує електроенергію від відновлювальних джерел енергії. Джерелом водню є вода, при електролізі якої утворюються водень та кисень за ендотермічною реакцією розкладання:



Мінімальні питомі витрати енергії на отримання водню з води  $b_{\text{H}_2}$  за реакцією (4) становлять 39,69 кВт·год/кг H<sub>2</sub> або 142,9 МДж/кг H<sub>2</sub>. Нижча масова теплота згоряння водню становить  $Q_{\text{H}_2} = 120$  МДж/кг, і максимально можливий коефіцієнт конверсії електричної енергії в хімічну енергію водню становить

$$k_{\text{H}_2} = Q_{\text{H}_2}/b_{\text{H}_2} = 120/142,9 \times 100\% = 84,0\%. \quad (5)$$

При реальних значеннях питомих витрат енергії на отримання водню шляхом електролізу з води близько 50 кВт·год/кг H<sub>2</sub> [20] коефіцієнт конверсії електричної енергії в хімічну енергію водню становитиме 66,66%.

Питомі витрати електроенергії на отримання азоту шляхом розділення повітря становлять  $b_{\text{N}_2} = 0,375$  кВт·год/кг [21, 22]. Тоді мінімальні питомі витрати електроенергії на «зелений» амоніак  $b_{\text{NH}_3}$  можна оцінити за такою формулою:

$$b_{\text{NH}_3} = b_{\text{N}_2} \times (14/17) + b_{\text{H}_2} \times (3/17); \quad (6)$$

$$b_{\text{NH}_3} = 0,375 \times (14/17) + 39,70 \times (3/17) = 7,31 \text{ кВт·год/кг.}$$

Максимально можливий коефіцієнт конверсії електричної енергії в хімічну енергію амоніаку  $k_{\text{NH}_3}$  при питомій витраті електроенергії на «зелений» амоніак  $b_{\text{NH}_3} = 7,31$  кВт·год/кг або 26,31 МДж/кг становитиме

$$k_{\text{NH}_3} = Q_{\text{NH}_3}/b_{\text{NH}_3} = 18,8/26,31 \times 100\% = 71,14\%. \quad (7)$$

Значення реальних питомих витрат електроенергії на утворення амоніаку залежить від технології виробництва. При застосуванні удосконале-

ного «зеленого» процесу Габера-Боша з використанням «зеленого» водню з питомими витратами електроенергії 50кВтгод/кг H<sub>2</sub> мінімальні питомі витрати на утворення амоніаку становитимуть не 9,13 кВт·год/кг NH<sub>3</sub>, а 9,55 кВт·год/кг NH<sub>3</sub> за рахунок витрат електроенергії на технологічний процес [22].

На сьогодні питомі витрати електроенергії при застосуванні «зеленого» варіанту технології Габера-Боша з використанням електролізу води оцінюються на рівні 11 кВт·год/кг амоніаку [22], а коефіцієнт конверсії електроенергії в хімічну енергію амоніаку становить 47,5%. Очікується, що при промислового впровадженні технологій електрохімічного синтезу амоніаку питомі витрати електроенергії становитимуть близько 8 кВтгод/кг NH<sub>3</sub> [20] з коефіцієнтом конверсії електроенергії в хімічну енергію NH<sub>3</sub> 65,3%.

Отримання зеленого амоніаку відповідає меті зеленого енергетичного переходу України, але вимагатиме споживання великої кількості електроенергії. Для виробництва 5 млн т амоніаку (рівень 2020 р. для України) потрібно витратити 55 млрд кВт·год або 151 млн кВт·год за добу з середньозваженою спожитою потужністю 6,28 ГВт.

У табл. 2 представлено дані про виробництво електроенергії в ОЕС України за 2016–2020 рр. [23]. Для річного виробництва 60,5 млрд кВт·год електроенергії, необхідної для виробництва 5 млн т безвуглецевого «зеленого» амоніаку, необхідно залучати 41,22% усієї виробленої електроенергії в Україні в 2020 р. або 65,38% електроенергії всієї безвуглецевої енергетики України, яка включає атомні електростанції (АЕС), відновлювальні джерела енергії (ВДЕ), до яких відносять сонячні електростанції (СЕС), вітрові електростанції (ВЕС), електростанції на біопаливі (БіоЕС), а також гідравлічні та гідроаккумулятивні електростанції (ГЕС і ГАЕС).

Наразі для виробництва «сірого» амоніаку в Україні використовується 1,56% загального обсягу виробленої електроенергії. Якщо перейти на безвуглецеве виробництво амоніаку, то для отримання за рік теперішніх 5 млн т NH<sub>3</sub> з урахуванням витрат електроенергії електростанцій (в середньому 10 %) необхідна середньозважена потужність електростанцій становитиме 6,91 ГВт, а для виробництва «сірого» амоніаку за традиційною технологією була потрібна середньозважена потужність електростанцій 0,26 ГВт. Потреба в додатковій потужності генерації електроенергії для виробництва «зеленого» амоніаку становить 6,65 ГВт. Тому потрібне введення нових генеруючих безвуглецевих потужностей.

За даними НЕК «Укренерго», у 2021 р. затребувана потужність в ОЕС України в день зи-

**Таблиця 2.** Динаміка виробництва та імпорту електроенергії в Україні [23]

Річний обсяг, млн кВт·год	2016	2017	2018	2019	2020
АЕС	80950,0	85576,2	84398,1	83002,7	76202,5
ТЕС генеруючих компаній (ГК)	49902,3	44960,2	47792,0	44915,1	39562,6
ТЕЦ, когенераційні установки, блок-станції	13286,1	12414,7	12519,6	12638,5	14643,3
ГЕС та ГАЕС (з вирахуванням споживання ГАЕС у насосному режимі)	7218,8	8400,2	9862,3	6033,8	5466,1
Відновлювані джерела (ВЕС, СЕС, інші)	1560,0	1896,3	2632,4	5542,2	10862,1
Імпорт	0,0	0,0	0,0	2698,5	2284,9
Всього	152917,2	153247,6	157204,4	154830,8	149021,5

мового сонцестояння (максимум споживання) змінювалася в межах з 18 до 24 ГВт, при цьому потужність атомних електростанцій (АЕС) становила 12,8 ГВт, загальна потужність вугільних теплоелектростанцій генеруючих компаній (ТЕС ГК) змінювалася в межах 2,65–5,74 ГВт, а потужність ВДЕ була в діапазоні 0,248–1,048 ГВт. Під час літнього сонцестояння 24.06.2021 р. загальна потужність в ОЕС України змінювалася з 13 до 17 ГВт, при цьому потужність атомних електростанцій АЕС становила 8,5 ГВт, загальна потужність ТЕС ГК компаній змінювалася в межах 2,65–5,07 ГВт, а потужність ВДЕ лежала в діапазоні 0,096–3,430 ГВт. Отже, в ОЕС України затребувана потужність ТЕС ГК була в діапазоні від 2,65 до 5,74 ГВт. Таким чином потреба в «зелених» потужностях енергетики для генерації зеленого амоніаку перевищуватиме максимально затребувану в ОЕС України потужність вугільних ТЕС ГК – 5,74 ГВт.

Середньозважена потужність ТЕС ГК в 2020 р. становила 4,52 ГВт. У тому ж 2020 р. вугільні ТЕС ГК виробили 39,6 млрд кВт·год електроенергії з питомими витратами умовного палива на рівні 407 г/кВт·год відпущеної електроенергії [23] (або 364 г/кВт·год виробленої електроенергії), оціночне споживання на них вугілля становило 14,26 млн т умовного палива або 19,01 млн т вугілля з теплою згоряння 5250

ккал/кг (21,98 МДж/кг). Питомі викиди діоксиду вуглецю при спалюванні вугілля в котлах становили 1050–1150 г/кВт·год відпущеної електроенергії [24], тому оцінка валових викидів вуглекислого газу від ТЕС ГК має значення 39,6 млн т.

Зелений енергетичний перехід України передбачає відмову від використання вугільних ТЕС. Закриття ТЕС ГК дозволить повністю позбутися викидів забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю, що утворюються при спалюванні вугілля, а саме в 2020 році – 161,2 тис. т золи, 581,1 тис. т діоксиду сірки, 86,0 тис. т оксидів азоту, 6,0 тис. т оксиду вуглецю та 39,6 млн т вуглекислого газу.

Здійснення одночасно переходу на виробництво зеленого амоніаку та відмови від генерації електроенергії вугільними теплоелектростанціями дозволить скоротити викиди вуглекислого газу на 57,2 млн т CO<sub>2</sub>. Але для цього потрібно корінним чином змінити структуру генеруючих потужностей ОЕС України. При переході на виробництво «зеленого» амоніаку необхідно змінити діапазони наявних потужностей в ОЕС України: при літньому сонцестоянні до 20–24 ГВт, а при зимовому сонцестоянні – до 25–31 ГВт.

За даними НЕК «Укренерго» встановлена електрична потужність ОЕС України на 01.12.2021 становила 56098 МВт. У табл. 3 приведено розподіл потужностей по енергоресурсах,

**Таблиця 3.** Встановлена електрична потужність ОЕС України

Тип електростанції	Встановлена потужність, МВт			
	на 31.12.2011	на 31.12.2016	на 01.12.2021	прогноз на 31.12.2034
АЕС	13835,0	13835,0	13835,0	26800
ТЕС ГК	27272,0	24565,0	21842,0	0
ТЕЦ	6429,8	5946,8	6118,7	4900
ГЕС	4603,5	4711,0	4829,3	4800
ГАЕС	861,5	1509,5	1487,8	1500
СЕС	187,5	458,0	6226,2	12000
ВЕС	121,3	300,4	1529,0	5500
Станції на біопаливі	0,0	62,6	230,0	500
РАЗОМ	53310,6	51388,3	56098,0	55000

які використовуються для генерації електроенергії за 10 років, та авторський прогноз розподілу після закриття ТЕС ГК.

Оскільки для умов України в грудні характерна дуже слабка сонячна радіація та незначна вітрова активність, то для покриття мінімальної потужності в день зимового сонцестояння (25 ГВт) потрібно використовувати атомні електростанції, гідроелектростанції та теплоелектроцентралі, які будуть працювати на природному газі. Для покриття максимальної потужності (31 ГВт) потрібно використовувати ще потужності ГАЕС.

Для сталості роботи енергосистеми в умовах добової зміни споживання пропонується використовувати потужні споживачі-регулятори, які здатні споживати електроенергію при її надлишку в енергомережі [25, 26]. В статті [18] пропонується використовувати електричні теплогенератори, що споживатимуть електроенергію вугільних енергоблоків, які не будуть відключатися під час нічних провалів споживання. Це дозволить економити значну кількість палива, насамперед, природного газу, та покращити умови роботи тепломеханічного обладнання теплових електростанцій. Але при цьому вугільні ТЕС будуть викидати додаткові кількості забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю.

Децентралізоване виробництво «зеленого» амоніаку можна використати як ефективний споживач-регулятор в ОЕС України. Амоніак має і буде мати великий попит на перспективу як мінеральне добриво та як носій водню і безвуглецеве екологічне паливо. Накопичено більш, ніж сторічний досвід його безпечного

зберігання та транспортування у великих кількостях [8, 10, 11, 18].

Для реалізації опції виробництва «зеленого» амоніаку основні потужності ОЕС України зможуть весь час працювати у базовому навантаженні. У такому разі різницю потужностей між виробництвом та споживанням можна направляти на установки виробництва амоніаку, для яких потрібні лише вода, повітря та електрична енергія. Під час нічного провалу споживання електроенергії, наприклад, «надлишкові» в середньому 3 ГВт потужності протягом 6 год. можна перетворити в 1634,4 т/день або 0,597 млн т/рік зеленого амоніаку. Уся «надлишкова» електроенергія, яка виробляється з ВДЕ, може бути прийнята в ОЕС України і направлена на виробництво  $NH_3$ .

На рис. 3 приведено розраховані авторами сценарії розподілу потужності в ОЕС України для виробництва електроенергії і розподілу потужності для споживання електроенергії в зимовий день, відповідно, у разі відмови від використання вугільних ТЕС ГК та переходу на виробництво зеленого амоніаку.

За запропонованим зимовим сценарієм АЕС та газові ТЕЦ працюватимуть в базовому навантаженні, 21800 МВт і 3400 МВт відповідно. Вітрові та сонячні електростанції, які матимуть велику встановлену потужність, генеруватимуть електроенергію в залежності від погодних умов. При цьому добове виробництво електроенергії на сонячних електростанціях буде набагато меншим, ніж на вітрових, 11,7 млн кВт·год і 56,0 млн кВт·год відповідно. Добовий виробіток електроенергії на ГЕС і ГАЕС оцінюється в 21,0 кВт·год,

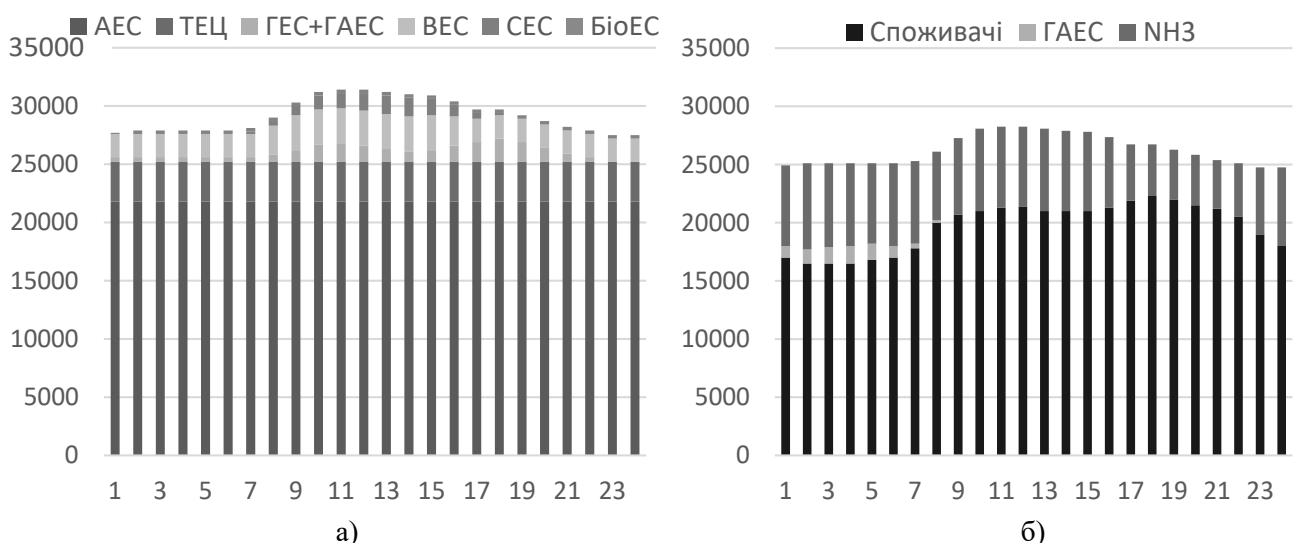


Рис. 3. Потужність на виробництво (а) та потужність на споживання (б) електроенергії, МВт, зимовий день

а ГАЕС у режимі накопичення (насосному режимі) витратять за добу 8,1 млн кВт·год. Добова потреба в електроенергії споживачами України становитиме 473,2 млн кВт·год. Діапазон зміни потужності у споживанні електроенергії складатиме від 16500 до 22000 МВт. На виробництво амоніаку буде спрямовано від 4180 до 7900 МВт потужності, а добове споживання електроенергії на ці цілі оцінюється у 149,15 млн кВт·год. Цієї енергії вистачить для виробництва 13,6 тис. т зеленого амоніаку.

На рис. 4 приведено авторські сценарії розподілу потужності в ОЕС України для виробництва електроенергії і розподілу потужності для споживання електроенергії в літній день, відповідно, у разі відмови від використання вугільних ТЕС ГК та переходу на виробництво зеленого амоніаку.

За літнім сценарієм АЕС працюватимуть на базовому навантаженні 19000 МВт. Більшість потужностей газових ТЕЦ перебуватимуть у стані проведення робіт, пов'язаних з підготовкою до опалювального сезону, тому їх потужності для ОЕС обмежаться на рівні 300 МВт. Вітрові та сонячні електростанції будуть виробляти в літній період значні кількості електроенергії. Добове виробництво електроенергії на сонячних електростанціях оцінюється в обсязі 91,0 млн кВт·год, а для вітрових електростанцій – 80,0 млн кВт·год. Добовий виробіток електроенергії на ГЕС і ГАЕС оцінюється в 21,0 кВт·год. Добова потреба в електроенергії споживачами України становитиме 420,7 млн кВт·год. Потреба в потужності для споживанні електроенергії лежить в діапазоні від 14700 до 20300

МВт. «Зайву» (надлишкову) потужність в ОЕС України в кількості від 2,02 до 11,47 ГВт можна направити на виробництво безвуглецевого амоніаку. Добове споживання електроенергії на виробництво  $\text{NH}_3$  становитиме 163,04 млн кВт·год. З такої кількості електроенергії можна виробити 14,8 тис. т зеленого амоніаку. При середньорічному добовому виробітку зеленого амоніаку 14,2 тис. т його річне виробництво становитиме 5,18 млн т. Таким чином змінне споживання електроенергії для децентралізованого виробництва зеленого амоніаку може успішно замінити маневрені потужності вугільних ТЕС ГК (до 5,74 ГВт), які наразі використовуються в ОЕС України.

Але, крім технологічної та екологічної доцільності переходу на виробництво «зеленого» амоніаку, слід розглядати також економічні фактори. Існуюча наразі в Україні система матеріальної стимуляції виробництва «зеленої» електроенергії на СЕС та ВЕС робить її найдорожчою в Європі та є основною причиною дисбалансу на ринку електроенергії [27]. Тому на сучасному етапі відмова від вугільних ТЕС та від використання природного газу при виробництві амоніаку зроблять і безвуглецеву електроенергію, і «зелений» амоніак неконкурентоздатними [28].

Протягом наступного десятиліття після відпрацювання промислових технологій електрохімічного синтезу амоніаку «зелений» амоніак зможе конкурувати з «сірим» чи «синім» [8, 29]. Після закінчення дії преференцій для відновлювальних джерел енергії на ринку електроенергії в Україні стане доцільним перехід на безвуглецеву генерацію електроенергії, і виробництво «зеленого» амоніаку.

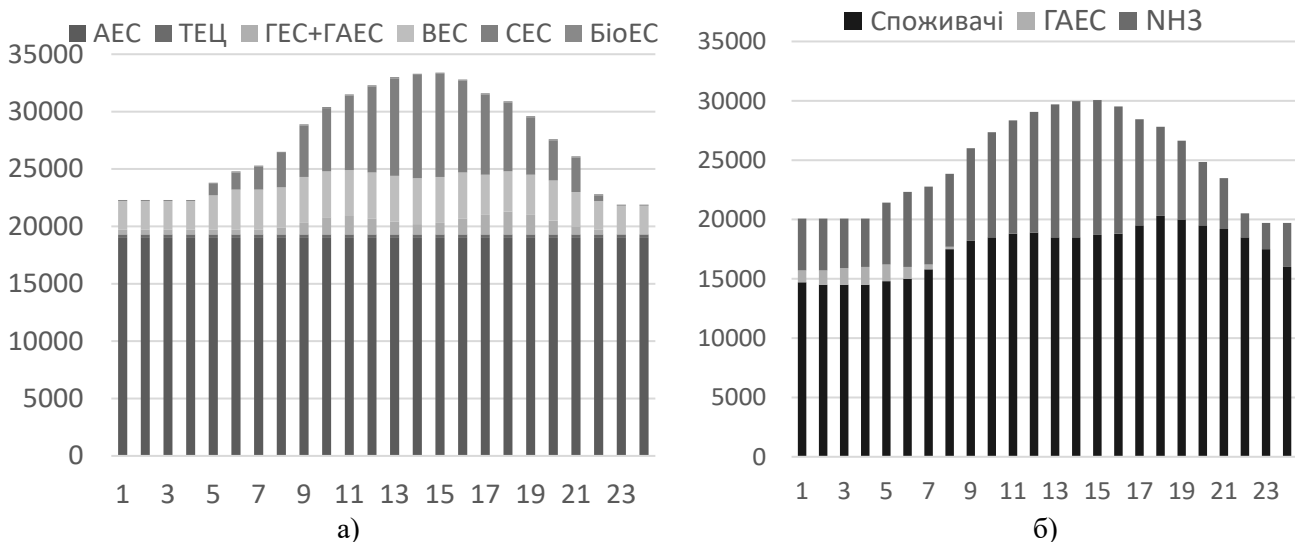


Рис. 4. Потужність на виробництво (а) та потужність на споживання (б) електроенергії, МВт, літній день

При збереженні теперішньої частки України в світовому виробництві амоніаку (близько 3,5%) прогнозне значення вітчизняного виробництва  $\text{NH}_3$  на 2050 р. становитиме близько 42 млн т. Переважна частина амоніаку буде використовуватися в енергетичних цілях як носій водню для установок водневої енергетики, включаючи автозаправні станції та енергоустановки на водневих паливних комірках, і як паливо для установок великої та децентралізованої енергетики. Для цього потрібно забезпечити виробництво 450–460 млрд кВт·год «зеленої» електроенергії, що більш, ніж втричі перевищує рівень споживання електроенергії в Україні в 2020 р. Середньозважена електрична потужність для виробництва такої кількості зеленого  $\text{NH}_3$  становитиме 51,3–52,5 ГВт. Таке значення близьке до існуючої загальної встановленої потужності ОЕС України в 2021 р. – 56,0 ГВт. У такому разі за рахунок введення в експлуатацію додаткових 60–70 ГВт потужностей ВДЕ (сонячних та вітрових електростанцій) загальна потужність ОЕС України має зрости до 125–135 ГВт.

Зараз у світі реалізуються декілька пілотних проектів виробництва зеленого амоніаку за рахунок електроенергії від сонячних електростанцій, розташованих в пустельних районах поблизу моря чи океану, та вітрових офшорних електростанцій – в Австралії [30], Чилі [31], Саудівській Аравії [8] тощо. На них вартість генерації електроенергії буде нижчою, ніж на теплових електростанціях на викопному паливі, вже в найближчі роки.

### 3. Вдячність

Викладені в статті матеріали були отримані авторами при виконанні науково-дослідної роботи «Технологічні, екологічні та економічні аспекти безвуглецевої амонійної енергетики» в рамках Цільового міждисциплінарного проекту НАН України «Науково-технічні та економіко-екологічні засади низьковуглецевого розвитку України».

### 4. Висновки

1. Зелений вибір України передбачає зменшення негативного впливу викидів парникових газів та забруднюючих речовин на природне довкілля і клімат шляхом скорочення споживання викопних джерел енергії. Очікуване різке зростання виробітку електроенергії на відновлювальних джерелах енергії висуває на порядок денний питання її зберігання. При використанні хімічних систем зберігання енергії електроенергія конвертується в хімічну енергію палив, які можна накопичувати тривалий час. Серед цих палив водень

та амоніак мають екологічну перевагу, оскільки при спалюванні  $\text{H}_2$  і  $\text{NH}_3$  відсутні викиди оксиду та діоксиду вуглецю, діоксиду сірки та твердих частинок.

2. Амоніак використовується не тільки для виробництва азотних добрив. Він є також носієм водню та безпосередньо паливом. Традиційне виробництво амоніаку пов'язане зі споживанням великих кількостей вуглеводневого палива і електричної та теплової енергії та значними викидами вуглекислого газу. Зеленою альтернативою виробництва «сірого» амоніаку є його синтез з азоту повітря та водню, отриманого шляхом електролізу води за рахунок електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел енергії. Питомі витрати електроенергії на виробництво безвуглецевого амоніаку становить близько 11 кВт·год/кг, а коефіцієнт конверсії електроенергії в хімічну енергію амоніаку як палива становить близько 50%.

3. Переведення виробництва амоніаку від використання природного газу на електрохімічні способи отримання продукту відповідає цілям зеленого енергетичного переходу України, але потребує великих витрат електроенергії. Для річного виробітку 5 млн т  $\text{NH}_3$  необхідне споживання становить 55 млрд кВт·год або 151 млн кВт·год за добу з середньозваженою потужністю 6,28 ГВт. За традиційною технологією річне споживання електроенергії для виробництва амоніаку становило 2,08 млрд кВт·год. У 2020 р. загальне виробництво електроенергії в Україні становило близько 150 млрд кВт·год. Тому забезпечення виробництва «зеленого» амоніаку вимагатиме наявності в ОЕС України 18 ГВт потужностей відновлювальних джерел енергії та 26,8 ГВт потужностей атомних електростанцій; при цьому будуть виведені з експлуатації вугільні електростанції загальною потужністю 21,8 ГВт, як основні джерела викидів забруднюючих речовин та парникових газів.

4. Пропонується використати потужності виробництва зеленого амоніаку як ефективні споживачі-регулятори, що дозволить основним генеруючим потужностям ОЕС України працювати в базовому режимі. Змінне споживання електроенергії для децентралізованого виробництва зеленого амоніаку може успішно замінити маневрені потужності вугільних ТЕС ГК (до 5,74 ГВт). «Зайва» (надлишкова) електроенергія під час нічних провалів споживання та при «надмірному» виробітку електроенергії на ВДЕ буде направлятися на виробництво амоніаку. Запропоновані сценарії виробітку та споживання електроенергії передбачають направлення від 4 до 8 ГВт взимку та від 2 до 11 ГВт влітку на виробництво амоніаку.



5. Запровадження виробництва зеленого амоніаку в Україні стане доцільним після відпрацювання промислових технологій електрохімічного синтезу амоніаку та закінчення дії преференцій ВДЕ на ринку електроенергії. У разі різкого зростання попиту на зелений амоніак для енергетичних потреб загальна встановлена потужність ОЕС України має зрости до 125–135 ГВт за рахунок нових потужностей відновлювальних джерел енергії.

### Конфлікт інтересів

Автори засвідчують відсутність конфлікту інтересів.

### Посилання

1. G20 Romeleader's declaration. URL: <https://www.g20.org/wp-content/uploads/2021/10/G20-ROME-LEADERS-DECLARATION.pdf> (дата звернення: 10.01.2022).
2. Endofcoalinsightat COP26. URL: <https://ukcop26.org/end-of-coal-in-sight-at-cop26> (дата звернення: 10.01.2022).
3. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Проект. URL: [https://mer.gov.ua/files/images/news\\_2020/14022020/pdf\\_зелена\\_концепція.pdf](https://mer.gov.ua/files/images/news_2020/14022020/pdf_зелена_концепція.pdf) (дата звернення: 10.01.2021).
4. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. COM (2019) 640 final. URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf) (дата звернення: 21.12.2021).
5. Annex to the Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. COM (2019) 640 final. URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf) (дата звернення: 21.12.2021).
6. Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J. Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018. 69. 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
7. Zamfirescu C., Dincer I. Using ammonia as a sustainable fuel. *Journal of Power Sources*. 2008. 185. 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.02.097>
8. Tullo, A.H. (2021). Is ammonia the fuel of the future? *Chemical and Engineering News*, Vol. 99, Iss. 8. URL: <https://cen.acs.org/business/petrochemicals/ammonia-fuel-future/99/i8> (дата звернення: 21.12.2021).
9. Salmon N., Bañares-Alcántara R. Green ammonia as a special energy vector: a review. *Sustainable Energy Fuels*, 2021, 5. 2814–2839; <https://doi.org/10.1039/d1se00345c>

10. Chehade G., Dincer I. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel. *Fuel*, 2021. 299. 120845. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120845>
11. Elishav O., Mosevitzky Lis B., Valera-Medina A., Grader G.S. (2021). Storage and Distribution of Ammonia. Chapter 5. In *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*. Elsevier Inc., 85–103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00005-9>
12. Erdemir, D., & Dincer, I. (2020). A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: challenges and solutions. *Int. J. Energy. Res.* 1–8. <https://doi.org/10.1002/er.6232>
13. Li, J., Lai, S., Chen, D., Wu, R., Kobayashi, N., Deng, L. & Huang, H. (2021). A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel. *Front. Energy Res.*, 9. 760356. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.760356>
14. Yapicioglu A., Dincer I. A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. 103. 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.023>
15. Kyriakou V., Garagounis I., Vasileiou E., Vourros A., Stoukides M. Progress in the Electrochemical Synthesis of Ammonia. *Catalysis Today*. 286. 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.06.014>
16. Garagounis I., Vourros A., Stoukides D., Dasopoulos D., Stoukides M. Electrochemical Synthesis of Ammonia: Recent Efforts and Future Outlook. *Membranes*, 2019, 9. 112. <https://doi.org/10.3390/membranes9090112>
17. Lan, R., Irvine, J.T.S. & Tao, S. Synthesis of ammonia directly from air and water at ambient temperature and pressure. *Sci. Rep.* 2013. 3. 1145; <https://doi.org/10.1038/srep01145>
18. Valera-Medina A., Amer-Hatem F., Azad A.K., Dedoussi I.C., de Joannon M., Fernandes R.X., Glarborg P., Hashemi H., HeX., Mashruk S., McGowan J., Mounaim-Rouselle C., Ortiz-Prado A., Ortiz-Valera A., Rossetti I., Shu B., Yehia M., Xiao H., Costa M. (2021). Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics. *Energy Fuels*, 35. 6964–7029. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c0368>
19. Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Ammonia and Nitrogenous Fertilizer Production. An ENERGY STAR® Guide for Energy & Plant Managers; March 2017. URL: [https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/Fertilizer\\_guide\\_170418\\_508.pdf](https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/Fertilizer_guide_170418_508.pdf) (дата звернення: 21.12.2021).
20. Soloveichik G. Electrochemical synthesis of ammonia as a potential alternative to the Haber-Bosch process. *Nature Catalysis*. 2019. Vol. 2. May 2019. 377–380. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0280-0>
21. Air separation plants. History and technological progress in the course of time (2019). URL: [https://www.linde-engineering.com/en/images/Air-separation-plants-history-and-technological-progress-2019\\_tcm19-457349.pdf](https://www.linde-engineering.com/en/images/Air-separation-plants-history-and-technological-progress-2019_tcm19-457349.pdf) (дата звернення: 21.12.2021).
22. Nayak-Luke R., Bañares-Alcántara R., Wilkinson I. 'Green' ammonia: Impact of renewable energy intermittency on plant sizing and levelized cost

- of ammonia (LCOA). *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018. 57, 14607–14616. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02447>
23. Чернявський М.В., Мірошніченко Є.С. Зміни в структурі генерації електроенергії в Україні та перспективи розвитку теплової енергетики. *Зб. наук. праць. XVII Міжнар. наук.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку (Київ, 19–20 жовтня 2021 р.)»*. Київ: ІТЕТ НАН України. С. 31–38. <https://doi.org/48126/conf2021>
24. Вольчин І.А., Гапонич Л.С. Викиди парникових газів на українських теплових електростанціях. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 4. С. 3–12. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2019.01>
25. Новіков П.В., Тесленко О.І., Ленчевський Є.А. Екологічна оцінка ущільнення добових графіків електричного навантаження енергосистем із застосуванням комплексів електричних теплогенераторів: *Зб. наук. праць XVII Міжнар. наук.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку (Київ, 19–20 жовтня 2021 р.)»*. Київ: ІТЕТ НАН України. С. 154–160. <https://doi.org/10.48126/conf2021>
26. Кулик М.М., Кириленко О.В. Стан та перспективи гідроенергетики України. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 56–64. <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.056>
27. Кулик М.М., Нечаєва Т.П., Згуровець О.В. Перспективи та проблеми розвитку Об'єднаної енергосистеми України в умовах її приєднання до енергосистеми Євросоюзу і гіпертрофованого використання у її складі вітрових та сонячних електростанцій. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. 4(59). С. 4–12. <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.004>
28. Череватський Д.Ю., Вольчин І.А. Довгострокові фактори і тенденції розвитку паливно-енергетичного комплексу України. *Економіка промисловості*. 2022. 1(97). 5–31. DOI: 10.15407/econindustry2022.01.005.
29. MacFarlane D.R., Cherepanov P.V., Jaecheol Ch., Suryanto B.H.R. Hodgetts R.Y., Bakker Ja.M., FerreroVallana F.M., Simonov A.N. A Roadmap to the Ammonia Economy. *Joule*, 2020. 4. 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>
30. Service R.F. Ammonia – a renewable fuel made from sun, air, and water – could power the globe without carbon. *Science*, 2018. Jul. 12, 2018. URL: <https://www.sciencemag.org/news/2018/07/ammonia-renewable-fuel-made-sun-air-and-water-could-power-globe-without-carbon> (дата звернення: 21.12.2021).
31. Fúnez Guerra C., Reyes-Bozo L., Vyhmeister E., Caparros M. Jaen, Salazar Jose Luis, Clemente-Jul C. (2020) Technical-economic analysis for a green ammonia production plant in Chile and its subsequent transport to Japan. *Renewable Energy*. 157. 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.041>.

## GREEN AMMONIA PRODUCTION FOR GREEN DEAL OF UKRAINE

**Igor Volchyn**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist,  
<https://orcid.org/0000-0002-5388-4984>

**Vladyslav Rashchepkin**<sup>1\*</sup>, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0002-8031-563X>

**Danylo Cherervatskyi**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Econ.), Senior Research Scientist,  
<https://orcid.org/0000-0003-4038-6393>;

<sup>1</sup> Thermal Energy Technology Institute of the NAS of Ukraine, Andriivska St., 19, Kyiv, Ukraine

e-mail: [ceti@i.kiev.ua](mailto:ceti@i.kiev.ua)

<sup>2</sup> Institute of Industrial Economics of the NAS of Ukraine, 2 Mariia Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [admin@econindustry.org](mailto:admin@econindustry.org)

\* Corresponding author: [slava003@ukr.net](mailto:slava003@ukr.net)

**Abstract.** *Ukraine's Green Energy Transition by 2050 involves a number of energy transformations in the economy, including decarbonisation, fossil fuel abandonment and the further development of renewable energy sources (RES). For a long-term storage of energy generated by RES, the chemical systems are most suitable that convert electricity into chemical energy of such types of fuels like hydrogen and ammonia, which after being burnt do not produce emissions of carbon monoxide and oxide, sulfur dioxide, or dust. Ammonia manufacturers that use traditional production technology are being themselves large consumers of fossil fuels and electricity and emit hundreds of millions of tons of carbon dioxide. An ecological alternative is the synthesis of green ammonia based on the electrolytic production of hydrogen using electricity produced by RES. But this option requires a lot of electricity. In the context of Ukraine, with an annual demand for the production of 5 million tons of*

*carbon-free ammonia, the required consumption of electricity amounts to 55 billion kWh. To obtain green ammonia in Ukraine, it is necessary to dramatically increase the scope of nuclear power plants and RES capacities, while abandoning the use of coal-fired power plants. Decentralized production of green ammonia can become an effective regulator of electric power in the power system without restrictions on the operation of nuclear power plants and RES. The start of this production will come after the development of synthesis technologies of green ammonia and the expiration of RES preferences in the energy market of Ukraine.*

**Keywords:** ammonia, carbon dioxide, emission, electricity, RES, demand-side load regulation.

## References

1. G20 Rome leader's declaration. URL: <https://www.g20.org/wp-content/uploads/2021/10/G20-ROME-LEADERS-DECLARATION.pdf> (Last accessed: 10.01.2022).
2. End of coalin sight at COP26. URL: <https://ukcop26.org/end-of-coal-in-sight-at-cop26> (Last accessed: 10.01.2022).
3. Ukraine 2050 Green Energy Transition Concept. Draft. URL: [https://mepr.gov.ua/files/images/news\\_2020/14022020/eng\\_pdf\\_зелена\\_концепція.pdf](https://mepr.gov.ua/files/images/news_2020/14022020/eng_pdf_зелена_концепція.pdf) (Last accessed: 10.01.2021).
4. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. COM(2019) 640 final. URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf) (Last accessed: 21.12.2021).
5. Annex to the Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. COM(2019) 640 final. URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf) (Last accessed: 21.12.2021).
6. Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W.I.F., & Bowen, P.J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
7. Zamfirescu, C., & Dincer, I. (2008). Using ammonia as a sustainable fuel. *Journal of Power Sources*, 185, 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.02.097>
8. Tullo, A.H. (2021). Is ammonia the fuel of the future? *Chemical and Engineering News*, Vol. 99, Iss. 8. URL: <https://cen.acs.org/business/petrochemicals/ammonia-fuel-future/99/i8> (Last accessed: 21.12.2021).
9. Salmon, N., & Bañares-Alcántara, R. (2021). Green ammonia as a special energy vector: a review. *Sustainable Energy Fuels*, 5, 2814–2839; <https://doi.org/10.1039/d1se00345c>
10. Chegade, G., & Dincer, I. (2021). Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel. *Fuel*, 299, 120845. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120845>
11. Elishav, O., Mosevitzky, Lis B., Valera-Medina, A., & Grader, G.S. (2021). Storage and Distribution of Ammonia. Chapter 5. In *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*. Elsevier Inc., 85–103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00005-9>
12. Erdemir, D., & Dincer, I. (2020). A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: challenges and solutions. *Int. J. Energy. Res*, 1–8. <https://doi.org/10.1002/er.6232>
13. Li, J., Lai, S., Chen, D., Wu, R., Kobayashi, N., Deng, L. & Huang, H. (2021). A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel. *Front. Energy Res.* 9, 760356. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.760356>
14. Yapicioglu, A., & Dincer, I. (2019). A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.023>
15. Kyriakou, V., Garagounis, I., Vasileiou, E., Vourros, A., & Stoukides, M. (2017). Progress in the Electrochemical Synthesis of Ammonia. *Catalysis Today*, 286, 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.06.014>
16. Garagounis, I., Vourros, A., Stoukides, D., Dasopoulos, D., Stoukides, M. (2019). Electrochemical Synthesis of Ammonia: Recent Efforts and Future Outlook. *Membranes*, 9, 112. <https://doi.org/10.3390/membranes9090112>
17. Lan, R., Irvine, J.T.S. & Tao, S. (2013). Synthesis of ammonia directly from air and water at ambient temperature and pressure. *Sci. Rep.*, 3, 1145; <https://doi.org/10.1038/srep01145>
18. Valera-Medina, A., Amer-Hatem, F., Azad, A.K., Dedoussi, I.C., de Joannon, M., Fernandes, R.X., Glarborg, P., Hashemi, H., He, X., Mashruk, S., McGowan, J., Mounaim-Rouselle, C., Ortiz-Prado, A., Ortiz-Valera, A., Rossetti, I., Shu, B., Yehia, M., Xiao, H., & Costa, M. (2021) Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics. *Energy Fuels*, 35, 6964–7029. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c0368>
19. Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Ammonia and Nitrogenous Fertilizer Production. An ENERGY STAR® Guide for Energy & Plant Managers; March 2017. URL: [https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/Fertilizer\\_guide\\_170418\\_508.pdf](https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/Fertilizer_guide_170418_508.pdf) (Last accessed: 21.12.2021).

20. Soloveichik, G. (2019). Electrochemical synthesis of ammonia as a potential alternative to the Haber-Bosch process. *Nature Catalysis*, 2, May, 377–380. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0280-0>.
21. Air separation plants. History and technological progress in the course of time (2019). URL: [https://www.linde-engineering.com/en/images/Air-separation-plants-history-and-technological-progress-2019\\_tcm19-457349.pdf](https://www.linde-engineering.com/en/images/Air-separation-plants-history-and-technological-progress-2019_tcm19-457349.pdf) (Last accessed: 21.12.2021).
22. Nayak-Luke, R., Bañares-Alcántara, R., & Wilkinson, I. (2018) ‘Green’ ammonia: Impact of renewable energy intermittency on plant sizing and levelized cost of ammonia (LCOA). *Ind. Eng. Chem. Res.*, 57, 14607–14616. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02447>
23. Chernyavskyy, M.V., Miroshnychenko, Ye.S. (2021). Changes in the Structure of Electricity Generation in Ukraine and Prospects of Thermal Energy Development. In Proceeding the XVII International Scientific and Practical Conference “Coal Thermal Energy: Paths for Rehabilitation and Development”, Kyiv, Thermal Energy Technology Institute of the NAS of Ukraine, 19–20, October 2021. 31–38. <https://doi.org/48126/conf2021>
24. Volchyn, I.A., Haponych, L.S. (2019). Greenhouse Gases Emissions at Ukrainian Thermal Power Plants. *Energy Technologies and Resources Saving*, Iss. 4, 3–12. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2019.01>
25. Novikov, P., Teslenko, O., & Lenchevsky, E. (2021). Ecological Estimation of Daily Electric Load Curve Compaction of Power System Using Electric Heat Generators Complexes. In Proceeding the XVII International Scientific and Practical Conference “Coal Thermal Energy: Paths for Rehabilitation and Development”, Kyiv, Thermal Energy Technology Institute of the NAS of Ukraine, 19–20, October 2021. 154–160 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.48126/conf2021>
26. Kulyk, M.M., & Kyrylenko, O.V. (2019). Current State and Prospects of Hydroenergy. *Technical Electrodynamics*, 4, 56–64. <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.056>
27. Kulyk, M.M., Nechaieva, T.P., Zgurovets, O.V. (2019). Prospects and Problems of Development of Integral Power System of Ukraine under Conditions of Connecting with EU Power System by Hyper-Trophy Using the Wind and Solar Power Plants. *The Problems of General Energy*, 4(59), 4–12. <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.004>
28. Cherevatskyi, D.Yu., & Volchyn, I.A. (2022). Long-term factors and trends in the development of the fuel and energy complex of Ukraine. *Economy of Industry*, 1(97), 5–31. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/econindustry2022.01.005>
29. MacFarlane, D.R., Cherepanov, P.V., Jaecheol, Ch., Suryanto, B.H.R., Hodgetts, R.Y., Bakker, Ja.M., Ferrero Vallana, F.M., & Simonov, A.N. (2020). A Road map to the Ammonia Economy. *Joule*, 4, 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>
30. Service, R.F. (2018). Ammonia – a renewable fuel made from sun, air, and water – could power the globe without carbon. *Science*, Jul. 12. URL: <https://www.sciencemag.org/news/2018/07/ammonia-renewable-fuel-made-sun-air-and-water-could-power-globe-without-carbon> (Last accessed: 21.12.2021).
31. Fúnez Guerra, C., Reyes-Bozo, L., Vyhmeister, E., Caparros, M. Jaen, Salazar Jose, Luis, & Clemente-Jul, C. (2020). Technical-economic analysis for a green ammonia production plant in Chile and its subsequent transport to Japan. *Renewable Energy*, 157, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.041>

Надійшла до редколегії: 19.04.2022