

УДК 620.9: 661.5:666:9:669.1

doi:10.20998/2413-4295.2025.03.04

ОЦІНКА ПОТРЕБ ЕНЕРГОЄМНИХ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ В РЕСУРСАХ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ

Д. В. ТОЛСТОВ*, Т. Р. БІЛАН

відділ трансформації структури паливно-енергетичного комплексу, Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, УКРАЇНА

*e-mail: dtolstov93@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проведено оцінку потреб у ресурсах для декарбонізації трьох енергоємних галузей промисловості України – металургійної, хімічної (виробництво аміаку) та цементної. Проаналізовано сучасні технологічні процеси та рівні споживання енергоресурсів, а також представлено можливості заміщення викопних палив зеленим воднем у виробничих ланках. Розглянуто міжнародний досвід та пілотні проекти у сфері сталеливарного виробництва, синтезу аміаку та випалу клінкеру, що демонструють ефективність використання водню як відновника та безвуглецевого палива. На основі аналітичних розрахунків визначено прогностичні обсяги споживання водню та додаткової електроенергії в умовах переходу до низьковуглецевих технологій. Показано, що для металургії застосування технології прямого відновлення заліза воднем у поєднанні з електродуговими печами дозволяє скоротити викиди парникових газів на понад 90 % порівняно з традиційною схемою, проте потребує суттєвого збільшення електроспоживання. Для хімічної промисловості заміна парового реформінгу природного газу на електроліз води створює умови для повної декарбонізації виробництва аміаку, знижуючи залежність від імпорту енергоносіїв і вивільняючи значні обсяги природного газу. У цементній галузі водень розглядається як перспективне паливо для процесів випалу клінкеру, що забезпечує скорочення викидів CO₂ порівняно зі спалюванням викопних палив і відповідає європейським екологічним вимогам. Зроблено розрахунки сценаріїв переходу від базового рівня виробництва до післявоєнного відновлення, які показують, що сукупні потреби у водні для визначених галузей коливатимуться в межах 1,45–2,01 млн т/рік. При цьому додаткове річне споживання електроенергії перевищуватиме 10–13 ТВт·год (без урахування електролізу). Отримані результати підкреслюють критичну роль розвитку відновлюваної генерації, електролітичних потужностей і водневої інфраструктури для забезпечення декарбонізації.

Ключові слова: водень; декарбонізація; металургія; аміак; цемент; енергоємність

ASSESSMENT OF RESOURCE REQUIREMENTS FOR DECARBONIZATION IN ENERGY-INTENSIVE INDUSTRIES OF UKRAINE

D. TOLSTOV, T. BILAN

Department of Structural transformation of the fuel and energy complex, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Paper presents a comprehensive assessment of resource requirements for the decarbonization of three key energy-intensive industries in Ukraine – metallurgy, chemical production (ammonia), and cement. Current technological processes and energy consumption levels are analyzed, and the potential for replacing fossil fuels with green hydrogen in industrial value chains is evaluated. International experience and pilot projects in steelmaking, ammonia synthesis, and clinker firing are reviewed, demonstrating the effectiveness of hydrogen as a reductant and carbon-free fuel. Based on analytical calculations, forecasted volumes of hydrogen consumption and additional electricity demand for the transition to low-carbon technologies are determined. It is shown that in metallurgy, the application of hydrogen-based direct reduction of iron combined with electric arc furnaces can reduce greenhouse gas emissions by more than 90% compared to the traditional BF–BOF route, though it requires a substantial increase in electricity demand. For the chemical industry, replacing steam methane reforming of natural gas with water electrolysis creates conditions for full decarbonization of ammonia production, reduces dependence on imported energy carriers, and frees up significant volumes of natural gas. In the cement sector, hydrogen is considered a promising fuel for clinker firing, enabling a substantial reduction of CO₂ emissions from fossil fuel combustion while ensuring compliance with European climate legislation. The calculated scenarios of transition from the baseline production level to post-war recovery indicate that total hydrogen demand for the analyzed sectors will range from 1.45 to 2.01 million tons per year, while additional electricity consumption will exceed 10–13 TWh annually (excluding the demand for electrolysis). The results emphasize the critical importance of developing renewable generation, deploying electrolysis capacities, and establishing hydrogen infrastructure to enable effective decarbonization of Ukraine's industrial sector.

Keywords: hydrogen; decarbonization; metallurgy; ammonia; cement; energy-intensive

Вступ

В умовах переходу до низьковуглецевої економіки важлива роль відводиться розвитку водневої енергетики, яка розглядається як один із ключових факторів декарбонізації важкої

промисловості. Металургійна, хімічна та цементна галузі є одними з найбільших споживачів викопних палив та джерелом значних викидів парникових газів. Перехід цих секторів на водневі технології здатен значно скоротити їхній вуглецевий слід, сприяти сталому розвитку і відповідати європейським

кліматичним цілям. Це актуально і для України, яка в межах євроінтеграції та кліматичних зобов'язань має адаптувати потужний індустріальний комплекс до вимог кліматично нейтрального майбутнього.

Європейський Союз (ЄС) у 2020 році представив стратегію водню, яка визначає чіткий шлях переходу до кліматично нейтральної економіки до 2050 року з акцентом на виробництво та використання водню в промисловості, транспорті та енергетиці [1]. Стратегія передбачає до 2030 року встановлення потужностей електролізу до 40 ГВт для виробництва зеленого водню, який замінить викопні джерела палива у важких промислових процесах, зокрема у сталеливарній, цементній та хімічній промисловості. Водень розглядається як паливо для високотемпературних процесів, як сировина для аміачного виробництва та відновник у металургії. Відповідно, ЄС планує створення водневих інфраструктурних кластерів, що дозволить ефективно розподіляти водень між промисловими зонами та транспортом [1, 2].

Україна, маючи власні потужні металургійні заводи, великі хімічні підприємства та цементну індустрію, також розробляє стратегії для розвитку водневої економіки. У 2024 році, в рамках ініціативи H2U «Воднева долина», компанія Hydrogen LLC отримала грант на створення виробничого об'єкта з виробництва зеленого водню. Проєкт передбачає будівництво водневого заводу в Рені (Одеська обл.), що обумовлене близькістю до морського порту, що сприяє транспортуванню водню через Чорне море та Дунай до країн Центральної Європи. Проєкт передбачає також будівництво сонячної електростанції потужністю 120 МВт, вітрової електростанції потужністю 80 МВт та електролізної установки потужністю 100 МВт. Початкова цільова виробнича ціль становить від 7000 до 8000 тон водню щорічно. Виробництво 1 м³ водню потребує 1,5–2 літри води та 4,5 кВт·год електроенергії [3]. Ця ініціатива спрямована на створення виробничих потужностей для зеленого водню з подальшим експортом до ЄС, а також на заміщення традиційних джерел палива у власній промисловості [3, 4]. Водночас для України питання масштабного переходу на водневі технології залишається складним з огляду на інвестиційні виклики, необхідність модернізації виробничих ліній та розвитку нормативно-правового поля [5].

Металургійна промисловість є одним із найбільших енергоспоживачів та джерел викидів CO₂. Застосування водню в технологіях прямого відновлення заліза дозволить суттєво знизити вуглецевий слід виробництва сталі, оскільки водень замінить кокс як відновник заліза. Для України, яка входить до числа світових лідерів із виробництва сталі, це відкриває можливості для модернізації та покращення екологічної ефективності галузі [6]. Аналіз обсягів споживання водню в металургії, а також прогноз енергетичних витрат на 1 тону сталі

при переході на водневі технології є надзвичайно актуальними для планування інвестицій та визначення масштабів інфраструктурних потреб.

Аміачна промисловість також традиційно є великим споживачем водню, який виробляється переважно з природного газу. Використання зеленого водню у синтезі аміаку дозволяє усунути залежність від викопного палива і значно знизити викиди парникових газів [7]. Враховуючи роль України як виробника мінеральних добрив, оптимізація виробництва аміаку на основі водню є важливим кроком до стійкого розвитку аграрного сектору та забезпечення екологічної безпеки.

У цементній промисловості, яка відповідає за приблизно 7% глобальних викидів CO₂, застосування водню у процесах випалу клінкеру розглядається як ефективний інструмент декарбонізації [8]. Водень може стати альтернативним паливом замість вугілля або газу у печах, що дозволить знизити прямі викиди CO₂ від спалювання викопних видів палива [7]. Враховуючи значний внесок цементної індустрії в економіку України та її енергоємність, перехід на водневі технології є пріоритетним напрямом для зменшення вуглецевого сліду будівельної галузі.

Мета роботи

Визначення обсягів споживання водню при переході металургійної, аміачної та цементної індустрій України на водневі технології є необхідним для формування матеріального балансу енергетичної галузі України, адже виробництво водню є енергозатратним процесом. Вирішення цієї задачі вимагає комплексного підходу із залученням актуальних наукових досліджень, даних про енергоефективність, та міжнародного досвіду.

Метою статті є аналіз поточного стану, потенціалу споживання водню та прогноз енергетичних потреб водневих технологій для основних енергоємних галузей промисловості України – виробництва сталі, аміаку та цементу. Результати допоможуть оцінити необхідні обсяги водню та витрати електричної енергії в нових технологічних процесах.

Виклад основного матеріалу

Використання водню в аміачній промисловості

Традиційне виробництво аміаку базується на процесі Haber-Bosch, у якому основним джерелом водню є паровий реформінг природного газу (Steam Methane Reforming, SMR). Процес SMR полягає у високотемпературній реакції метану з водяною парою (700–900°C) з утворенням синтез-газу, що містить водень та оксид вуглецю, який далі очищується для отримання водню, необхідного для синтезу аміаку [9]. Проте SMR супроводжується значними викидами

CO₂, що робить виробництво аміаку однією з енергетично вуглецеваних промислових технологій [10].

Для декарбонізації аміачного виробництва застосовується технологія заміни SMR на виробництво водню шляхом електролізу води – процесу розщеплення молекул води на водень і кисень під впливом електричного струму, отриманого з відновлюваних джерел енергії (сонце, вітер) [11]. Найпоширенішими типами електролізерів є щільні лужні електролізери (Alkaline Electrolysis) та електролізери з протонно-обмінною мембраною (PEM), які характеризуються високою чистотою водню та відносно швидким регулюванням потужності [12].

У світі активно реалізуються масштабні проекти з виробництва зеленого аміаку на основі водню, що отримується шляхом електролізу води за допомогою відновлюваної енергії. Прикладами таких проектів є будівництво компанією Envision Energy заводу з виробництва зеленого водню та аміаку потужністю 500 МВт у місті Чифен [13], міжнародний проект HyDeal Ambition, перший етап якого, HyDeal Spain, включає виробництво водню шляхом електролізу з використанням сонячної енергії. Очікується, що встановлена потужність електролізерів до 2030 року досягне 9,5 ГВт, а водень буде використаний для виробництва зеленої сталі, аміаку та добрив, що дозволить зменшити викиди CO₂ Іспанії на 4 %, а також сприятиме підвищенню енергетичної незалежності країни за рахунок заміщення 5 % імпорту природного газу. Вартість водню оцінюється приблизно в 1,5 євро за кілограм [14].

У 2024 році Європейська Комісія обрала 85 інноваційних проектів для грантової підтримки на суму 4,8 млрд євро в рамках Innovation Fund. Обрані проекти охоплюють широкий спектр секторів, включаючи енергоємні галузі, відновлювану енергетику, промислове управління викидами та виробництво відновлюваного водню, що сприятиме зниженню викидів на 476 млн тонн CO₂ еквіваленту за перші десять років роботи. Особливу увагу приділено виробництву ключових компонентів для зеленої енергетики в ЄС, зокрема сонячних панелей (3 ГВт) та електролізерів (9,3 ГВт), що узгоджується з цілями Net-Zero Industry Act (NZIA) [15].

Заміна природного газу на «зелений» водень дозволяє суттєво знизити викиди CO₂, оскільки водень, отриманий електролізом, не містить вуглецевих домішок і може безпосередньо використовуватися у синтезі аміаку [16]. Для інтеграції «зеленого» водню необхідне переобладнання аміачного заводу та забезпечення інфраструктури транспортування водню — існуючі газопроводи можуть бути модернізовані для транспортування чистого водню або його сумішей з природним газом (blended hydrogen), що знижує капітальні витрати на інфраструктуру [17].

Прикладом такого підходу є проект APA Group та Wesfarmers Chemicals, Energy & Fertilisers (WesCEF) в Західній Австралії, де планується виробництво водню на базі електролізу (до 900 МВт електролізної потужності) біля Пінджарра з транспортуванням по модернізованому газопроводу Parmelia (43 км) до аміачного заводу Квіні. Переважна частина електроенергії для електролізу постачатиметься з вітрових та сонячних електростанцій із частковим підключенням до енергомережі для стабілізації виробництва [18]. Важливим аспектом проекту є забезпечення гнучкості роботи електролізерів і балансування енергоспоживання, що дозволяє оптимізувати собівартість виробництва водню [19].

Серед викликів – високі капітальні витрати на електролізні установки (оцінювані на рівні понад 4000 австралійських доларів за кіловат), необхідність оновлення трубопровідної інфраструктури та адаптація виробничих процесів аміачного заводу до нових режимів подачі водню [20]. Водночас потенціал зниження викидів CO₂ і вплив на промислову декарбонізацію роблять цю технологію перспективною для реалізації кліматичних цілей.

В Україні для виробництва аміаку використовується традиційний метод. Основні виробничі потужності зосереджені на 4 найбільших виробниках аміаку. Річний обсяг виробництва по заводам відображено у табл. 1.

Таблиця 1 – Виробництво аміаку в Україні

Підприємство	Потужність NH ₃ , млн т/рік
Одеський припортовий завод (ОПЗ) [21]	1,160
«Азот» [22] (м. Черкаси)	1,060
«Рівнеазот» [23]	0,400
«ДніпроАзот» [24]	0,450

Валове виробництво аміаку знизилося з 4,3 млн т у 2011 році до 2,55 млн т у 2021 році [25]. Проте, незважаючи на зменшення виробництва, аміак залишається важливим промисловим продуктом для України.

Для виробництва однієї тони аміаку, при розрахунку по стехіометричній реакції, використовується 178 кг водню. З врахуванням втрат в циклі Габера-Боша реальне значення – 185 кг водню на тону аміаку [26, 27]. Витрати електроенергії (ЕЕ) та природного газу (ПГ) на виробництво водню в SMR процесі на устаткуванні компанії “HYGEAR” наведені в табл. 2.

Наведені в табл. 2 дані надають витрати електричної енергії на виробництво 1 кг H₂. Так як питомі витрати водню на 1 т NH₃ мають значення 185 кг водню, то на виробництво 1 т аміаку витрачається 548 кВт·год електричної енергії, для розміру Medium Plus, та 1294 м³ газу. В той час як існуючі дані по

споживанню природного газу в процесі виробництва аміаку на підприємствах України вказують значення 1,1 тис м³ природного газу на виробництво 1 т аміаку, при споживанні електроенергії на рівні 139 кВт·год [28, 29].

Таблиця 2 – Витрата ресурсів на виробництво водню в SMR процесі [30]

Установка (продуктивність H ₂ , кг/год)	Споживання		Питомі витрати	
	ПГ, Nm ³ /г од	ЕЕ, кВт·г од	ПГ, Nm ³ /к г H ₂	ЕЕ, кВт·г од/кг H ₂
Compact (3,1)	23	14,5	7,42	4,68
Medium (6,2)	46	26	7,42	4,19
Medium Plus (9,3)	69	29,5	7,42	3,17

Використання водню в цементній галузі

Основними джерелами викидів парникових газів (CO₂) у цементній промисловості є:

- викиди від розкладу вапняку ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) у кальцинаторі та печі, що становлять близько 60–65 % загальних викидів ($\approx 0,53$ т CO₂/т клінкеру);

- викиди від спалювання викопних видів палива (переважно вугілля та природного газу), необхідних для забезпечення температур 900–1500 °С під час випалу клінкеру, які становлять близько 35–40 % ($\approx 0,35$ т CO₂/т клінкеру) [31].

У підсумку, сумарний вуглецевий слід цементного виробництва сягає 0,8 т CO₂ на 1 т клінкеру, що підкреслює його високу інтенсивність викидів і визначає цементну промисловість одним із пріоритетних секторів для декарбонізації. Середня енергоємність цементного виробництва становить близько 4 ГДж/т цемент [31].

В Україні у 2022 році виробництво цементу скоротилося на 51 % порівняно з 2021 роком – до 5,4 млн т, а внутрішнє споживання становило лише 35 % від рівня попереднього року. Зниження компенсувалося експортом, обсяг якого склав 935 тис. т (–3,7 %), тоді як імпорт зменшився у 14,8 рази – до 39 тис. т. У галузі протягом останніх 15 років здійснювалася модернізація (перехід із «мокрої» на «суху» технологію, зниження питомої енергоємності та частки клінкеру в цементі), але зростання використання вугілля як заміника дорогого природного газу призвело до збільшення викидів CO₂. Водночас підприємства впроваджували заміну частини палива відходами (відпрацьованими шинами, мастилами, RDF-паливом). У післявоєнному відновленні попит на цемент зростатиме, і водень може стати ключовою альтернативою нинішнім видам альтернативного палива, забезпечуючи зменшення викидів та зниження навантаження від

вуглецевого оподаткування в межах механізму СВAM [32].

Наразі в Україні 5 заводів виробляють клінкер. Дані щодо обсягів виробництва та технології наведені в табл. 3

Як «мокрый», так і «сухий» спосіб може бути реалізований за декількома технологічними схемами, які відрізняються як послідовністю операцій, так і видом устаткування, що використовується. Вибір технологічної схеми визначається властивостями перероблюваної сировини, тобто її вологістю, твердістю, однорідністю тощо [33]. Загалом під час виробництва 1 т клінкеру витрачається від 3000 МДж/т («сухий» спосіб з підігрівачем і декарбонізатором) до 6400 МДж/т (мокрый спосіб), зокрема, на більшості цементних підприємств у країнах Євросоюзу – від 3300 до 4000 МДж на 1 т клінкеру.

Таблиця 3 – Виробництво клінкеру на цементних заводах України, млн т/рік [34]

Завод	Обсяги виробництва
ПАТ «Подільський цемент» (сухий метод)	2,5
ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (сухий метод)	3,6
«Волинь-Цемент» (Дікергофф) (мокрый метод)	1,16
«ЮГЦемент» (Дікергофф) (мокрый метод)	1
ПАТ «Кривий Ріг Цемент» (напівсухий метод)	0,96

Аналіз даних [35] свідчить, що питомі витрати тепла на випал клінкеру для «сухого» способу виробництва становлять у середньому близько 3835 МДж/т клінкеру (125 кг у.п./т). Для «мокрого» 6325 МДж/т клінкеру (215 кг у.п./т), а для комбінованого способу – близько 4250 МДж/т клінкеру (145 кг у.п./т).

Середні питомі витрати електроенергії на виробництво 1 т портландцементу становлять для заводів із сухим способом 125 кВт·год/т цементу, тоді як для заводів із мокрим способом – 118 кВт·год/т цементу.

Після модернізації та переходу на «суху» технологію виробництва витрати енергії становлять згідно [36]:

ПАТ «Подільський цемент» – 3,2 ГДж/т клінкеру.

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» – 3,1 ГДж/т клінкеру.

Тобто обидва підприємства вийшли на рівень, близький до сучасних показників витрат, що відповідає міжнародним практикам енергоефективного виробництва цементу.

У контексті декарбонізації значна увага приділяється альтернативним видам палива. Традиційно в якості заміників застосовують біомасу та відходи, проте останніми роками значний інтерес отримав водень (H_2) як безвуглецеве паливо [37]. Його використання в цементних печах може частково або повністю замінити вугілля чи природний газ, що забезпечує зниження енергетичних викидів CO_2 .

Ряд досліджень демонструють потенціал водню для декарбонізації цементного виробництва. Так, моделювання, проведене Mineral Products Association (MPA), показало, що заміна теплової енергії у печі на 100 % H_2 може повністю усунути викиди вихлопного CO_2 (від спалювання) [37]. Компанія «Hanson» (Ribblesdale Cement Works, Велика Британія) провела пілотні випробування з використанням суміші 39 % водню, 12 % м'ясо-кісткового борошна і 49 % гліцерину, що потенційно дозволяє заощаджувати до 180 тис. т CO_2 щороку [38].

У роботі [39] розглянуто виробництво цементу із «сухим» методом та паливом у вигляді природного газу та водню. Витрати енергоресурсів на виробництво тони клінкеру наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Витрати енергоресурсів при «сухому» методі виробництва цементу та різних типах палива на 1 тону клінкеру

Параметр	Природний газ	H_2 (водень)
Витрати природного газу, кг	77,54	0
Витрати водню, кг	0	34,02
Витрати тепла, МДж	3877,05	4082,4
Витрати електричної енергії, кВт·год	118,52	109,76

Витрати енергії не враховують витрати на уловлювання CO_2 . У статті [39] прийнято, що нижча теплота згоряння природного газу становить 50 МДж/кг, водню 120 МДж/кг.

За оцінками експертів, необхідність повоєнної відбудови країни може сприяти збільшенню внутрішнього попиту на цементну продукцію до рівня 15 млн т у рік. За результатами проведення Конференції будівельників України було встановлено, що для відбудови вже зруйнованих станом на лютий 2023 року будівель знадобиться 11,9 млн т бетону без урахування поточного споживання цементної продукції [40]. Враховуючи продовження бойових дій на території України, реальна потреба країни у цементі буде набагато більшою [41].

Використання водню у виробництві сталі

До 2022 року чавунно-сталева промисловість України займала провідне місце в економіці країни, забезпечуючи близько 10% ВВП та до 33% загального обсягу експорту. Внаслідок повномасштабної агресії російської федерації виробництво та експорт чавуну і

сталі різко скоротилися, хоча Україна зберегла контроль над більшістю залізрудних активів і частиною металургійних потужностей.

До повномасштабної війни структура виробництва характеризувалася домінуванням доменно-конверторного процесу (BF-BOF), що забезпечував близько 76% виплавки сталі у 2020 році. Частка електродугових печей (EAF) становила менше 6%, тоді як застарілі мартенівські печі ще забезпечували близько 19%. Така структура формувала високі викиди CO_2 та знижувала конкурентоздатність української продукції.

У результаті руйнування двох із п'яти найбільших металургійних заводів (що забезпечували близько 40% ринку), а також через виклики, пов'язані з дефіцитом водних ресурсів, нестабільністю енергопостачання та проблемами транспортної інфраструктури, галузь перебуває у стані трансформації. Водночас зростання ролі ЄС як головного торговельного партнера після 2022 року стимулює необхідність відповідності екологічним вимогам, зокрема механізму CBAM.

На глобальному рівні дедалі більшої актуальності набуває використання водню як низьковуглецевого відновника замість коксу чи природного газу. Пряме відновлення заліза (H_2 -DRI) вважається ключовим напрямом декарбонізації: у межах проекту HYBRIT (Швеція) компанії SSAB, LKAB та Vattenfall планують перші промислові обсяги сталі без вихлопного палива вже у 2030-х роках [42].

Іншим перспективним рішенням є технологія HIsarna, що поєднує плавлення руди у шахтно-конверторній печі з можливістю використання водню та біопалива. Пілотні проекти Tata Steel Europe показали, що така заміна може скоротити викиди CO_2 на 50–80% [43].

За оцінками дослідників [44], перехід на H_2 -DRI може знизити питомі викиди CO_2 у виробництві сталі до 95% порівняно з BF-BOF. Галузеві дорожні карти (IEA, IPCC) розглядають поєднання водневих маршрутів (насамперед H_2 -DRI-EAF) як ключовий портфель технологій, який може вивести сталелитевну галузь на траєкторію сумісних із кліматичною нейтральністю викидів до 2050 р. – за умови швидкого масштабування відновлюваної електроенергії, інфраструктури водню.

На 2025 рік в Україні максимальний обсяг виробництва сталі за технологією BF-BOF та BF-ONF складає 15,58 млн тон у рік. Спосіб виробництва сталі на основі доменної печі і основної кисневої печі (конвертору) використовує залізну руду, вугілля, вапняк і перероблену сталь. У середньому технологічний ланцюг «доменна піч – кисневий конвертер» за кордоном, згідно з даними [45, 46], використовує 1370 кг залізної руди, 780 кг металургійного вугілля, 270 кг вапняку, 125 кг переробленої сталі, 356 кВт·год електричної енергії для виробництва 1000 кг сирової сталі. У роботі [47]

наводиться значення витрат електроенергії на рівні 7% від загально енергетичного споживання для процесу BF-BOF, при рівні загально енергетичного споживання у 21,4 – 22,7 ГДж/тону [48], це становить 417 кВт·год/тону. Україна має високий показник енергомосткості сталі – 30,2 ГДж/т [49], що при 7% значенню споживання електричної енергії від загально енергетичного споживання дає споживання електроенергії на рівні 580 кВт·год/тону. Згідно [50], витрата електричної енергії на виробництва 1 тони сталі в технології домена піч – кисневий конвертор складає 206 кВт·год, при цьому витрати розподіляються таким чином: коксовий цех – 3 кВт·год, доменна піч – 28 кВт·год, конвертерний цех – 18 кВт·год, товстолістовий стан – 45 кВт·год, стан холодної прокатки – 29 кВт·год, стан гарячої прокатки – 61 кВт·год, киснева станція – 22 кВт·год.

Процес прямого відновлення заліза з використанням водню та подальшим виплавленням у електродуговій печі (H₂-DRI-EAF) вважається одним із найперспективніших напрямків сталого виробництва сталі. На першому етапі залізородну сировину (окатиші або брикети) відновлюють у шахтних печах або реакторах при температурі близько 800–1000 °С у середовищі водню. Основна реакція: $Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O$. У результаті утворюється губчасте залізо з високим ступенем металізації — приблизно 85–95 %, а єдиним побічним продуктом є водяна пара. При застосуванні зеленого водню прямі викиди CO₂ фактично відсутні, що дозволяє скоротити викиди парникових газів на ~95 % порівняно з технологіями на основі природного газу.

Другий етап полягає в подачі отриманого DRI разом із металобрухтом до електродугової печі (EAF), де за допомогою електричної дуги відбувається плавлення, рафінування та легування сталі. Для підтримки необхідного хімічного складу та теплового балансу додається вуглець. Якщо електроенергія для EAF походить із низьковуглецевих джерел, то загальні викиди CO₂ усього шляху H₂-DRI-EAF зводяться майже до нуля, обмежуючись лише залишковими технологічними викидами на рівні приблизно 0,05–0,2 т CO₂ на тону сталі [52].

Згідно [53] витрати енергоресурсів на 1 тону сталі складають: вугілля – 9,4 кг, природний газ – 34,95 кг, електроенергія – 758 кВт·год, водень – 67,67 кг.

Дослідження [54] наводить інші дані щодо витрат енергоресурсів на 1 тону сталі – 1 кг вуглецю, 534,48 кВт·год електроенергії, 54 кг водню.

Згідно даних компанії Midrex [55, 55] витрата водню складає 54 кг, електричної енергії 600 кВт·год.

Автори [57] наводять такі дані по витратах енергоносіїв: 80–125 кВт·год споживання допоміжних систем таких як компресори, насоси, 310–640 кВт·год споживання електродугової печі, витрати водню: 726–767 м³. Крім водню, також потрібно 48 м³ природного газу на 1 тону DRI, який необхідний для підтримання температури процесу та забезпечення

необхідного вмісту вуглецю в отриманому губчастому залізі.

Порівняння витрат ресурсів на виробництво 1 т сталі різними технологіями наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Порівняння витрат ресурсів на виробництво сталі різними технологіями

Ресурс	BF-BOF (доменна)	H ₂ -DRI + EAF
Вугілля (кг)	780	9,4
Природний газ (кг)	0	34,95
Електроенергія (кВт·год)	400	700
Водень (кг)	0	60

Комбінація H₂-DRI та EAF дозволяє широко використовувати вторинну сировину (металобрухт) у поєднанні з відновленим залізом, забезпечує гнучкість складу шихти, знижує залежність від коксового вугілля та слугує технологічним фундаментом для виробництва сталі з мінімальним вуглецевим слідом.

Обговорення результатів

Перехід енергоємних галузей України на водневі технології є визначальним чинником досягнення кліматичних цілей та мінімізації впливу СВАМ. Нижче наведено балансові оцінки потреб у водні (H₂) та додаткового електроспоживання виробничих процесів (самих агрегатів і допоміжних систем), без урахування електроенергії для електролізерів.

Цемент: переведення випалу клінкеру на H₂
Вихідні припущення (на основі табл. 4):

– витрата H₂ на «сухий» процес: **34,02 кг/ т клінкеру;**

– електроенергія процесів (дроблення, помел, транспортування, газодувки тощо): **109,76 кВт·год/ т клінкеру.**

Розглянемо три робочі сценарії.

Сценарій С1 (рівень споживання 2022 р.)

Обсяг виробництва цементу $Q_{cem}=5,4$ млн т/рік
Зв'язок між обсягом цементу та клінкеру виконується через клінкер-фактор CF (частка клінкеру в цементі), рівний CF=0,75.

Обсяги виробництва клінкеру в 2022 році:

$$Q_{cl} = Q_{cem} \cdot CF = 5,4 \cdot 0,75 = 4,05 \text{ млн т/рік.}$$

Витрати водню:

$$MH_2 = Q_{cl} \cdot mH_2 = 4,05 \cdot 10^6 \cdot 34,02 = 137,8 \text{ тис. т/рік.}$$

Витрати електроенергії на виробництво клінкеру:

$$E = Q_{cl} \cdot E_{ел} = 4,05 \cdot 10^6 \cdot 109,76 = 444 \text{ ГВт/рік.}$$

Сценарій С2 (післявоєнний попит)

Обсяг виробництва цементу $Q_{\text{cem}}=15$ млн т/рік
Обсяг виробництва клінкеру у сценарії С2:

$$Q_{cl} = Q_{\text{cem}} \cdot CF = 15 \cdot 0.75 = 11,25 \text{ млн т/рік.}$$

Витрати водню:

$$MH2 = 11,25 \cdot 10^6 \cdot 34,02 = 382,7 \text{ тис. т/рік.}$$

Витрати електроенергії на виробництво клінкеру:

$$E = Q_{cl} \cdot E_{\text{ел}} = 11,25 \cdot 10^6 \cdot 109,76 = 1\,234,8 \text{ ГВт.}$$

Сценарій С3 (переведення заводів з «сухою» технологією на водень)

За табл. 3 заводи ПАТ «Подільський цемент» та ПрАТ «Івано-Франківськцемент» мають встановлену потужність у 6,1 млн т клінкеру/рік.

$$MH2 = 6,1 \cdot 10^6 \cdot 34,02 = 207,52 \text{ тис. т/рік.}$$

$$E = 6,1 \cdot 10^6 \cdot 109,76 = 669,54 \text{ ГВт/рік.}$$

Перехід цементної галузі України на водень забезпечує суттєве скорочення вуглецевих викидів, але вимагає значних ресурсів. У сценарії 2022 року потреба становить близько 138 тис. т H_2 та 0,44 ТВт·год електроенергії на рік. Для післявоєнного попиту у 15 млн т цементу споживання водню зростає до 383 тис. т, а електрики — до 1,23 ТВт·год. Переведення лише двох найбільших заводів «сухої» технології потребує 208 тис. т H_2 і 0,67 ТВт·год електроенергії. Це демонструє критичну роль водню у декарбонізації галузі та необхідність розвитку відповідної енергетичної інфраструктури.

Аміак: 100 % заміщення сировинного H_2 «зеленим» H_2

– витрата H_2 на 1 т NH_3 (реалістичне значення з урахуванням втрат циклу): 185 кг/т NH_3 ;

– електроенергія процесів (українські дані з експлуатації): 139 кВт·год/т NH_3 .

Розрахуємо для двох масштабів: фактичного випуску (2021) і максимально можливої потужності чотирьох основних заводів по випуску т NH_3 .

Сценарій А1 (фактичного випуску на даних 2021 року)

$$Q_{NH3} = 2,55 \text{ млн. т/рік.}$$

$$E = 2,55 \cdot 10^6 \cdot 139 = 354,5 \text{ ГВт} \cdot \text{год/рік.}$$

$$MH2 = 2,55 \cdot 10^6 \cdot 185 = 0,47 \text{ млн. т/рік. М.}$$

Сценарій А2 (сумарна проектна потужність)

Сума потужностей ОПЗ, Черкаський «Азот», «Рівнеазот», «ДніпроАзот» складає 3,07 млн.т/рік

$$MH2 = 3,07 \cdot 10^6 \cdot 185 = 0,57 \text{ млн. т/рік.}$$

$$E = 3,07 \cdot 10^6 \cdot 139 = 426,7 \text{ ГВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Повна «зелена» сировина для NH_3 вимагає 0,47–0,57 млн т H_2 /рік та 0,35–0,43 ТВт·год/рік технологічної електрики (без електролізерів).

Сталь: повна заміна BF–BOF (BF–OHF) → H_2 –DRI–EAF

Норми витрат на 1 т сталі :

$$mH2 = 54 \dots 68 \text{ кг/т сталі}$$

$$E_{\text{ел}} = 600 \dots 758 \text{ кВт} \cdot \text{год/т сталі}$$

На підконтрольній території максимальний обсяг BF–BOF(OHF), який переводимо на H_2 –DRI–EAF, становить 15,58 млн. т/рік.

Водень:

$$MH2_{\text{min}} = 15,58 \cdot 10^6 \cdot 54 = 842 \text{ тис. т/рік.}$$

$$MH2_{\text{max}} = 15,58 \cdot 10^6 \cdot 68 = 1\,059 \text{ тис. т/рік.}$$

Електроенергія (без електролізу):

$$E_{\text{min}} = 15,58 \cdot 10^6 \cdot 600 = 9,348 \text{ ТВт} \cdot \text{год/рік.}$$

$$E_{\text{max}} = 15,58 \cdot 10^6 \cdot 758 = 11,81 \text{ ТВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Для повної заміни BF–BOF потрібні 0,84–1,06 млн т H_2 /рік та 9,35–11,81 ТВт·год/рік електроенергії.

У табл.6 зведено конфігурації переведу галузей промисловості на водень, та витрати ресурсів.

Консервативний сценарій – рівні виробництва 2021–2022 рр.; нижня межа витрат на виробництво сталі.

Амбітний – післявоєнний попит, верхня межа витрат на виробництво сталі.

Частковий перехід – два «сухі» цементні заводи на H_2 , решта як у консервативному сценарії.

Таблиця 6 – Сумарна потреба у водні та електроенергії по секторах (без електролізу H_2)

Інтегрований варіант	H_2 , тис. т/рік	Електроенергія, ГВт·год/рік
Консервативний (C1 + A1 + сталь-min)	1 449,80	10 146,50
Амбітний (C2 + A2 + сталь-max)	2 011,20	13 471,50
Частковий перехід (C3 + A1 + сталь-min)	1 519,50	10 372,00

Висновки

За результатами розрахунків, річна потреба у водні для трьох ключових секторів становить 1,45–2,01 млн т H₂, що у декілька разів перевищує поточні глобальні обсяги виробництва «зеленого» водню. При цьому додаткове річне споживання електроенергії, пов'язане із самими технологічними процесами (без електролізу), оцінюється у 10,15–13,5 ТВт·год. Це співмірно з 15–20 % довоєнного кінцевого споживання електроенергії в Україні, що свідчить про значний тиск на енергосистему навіть без урахування виробництва H₂.

Для виробництва сталі за технологією H₂-DRI-EAF необхідні 0,84–1,06 млн т водню на рік, а також 9,34–11,81 ТВт·год електроенергії на роботу електродугових печей і допоміжних систем. Такий рівень споживання відповідає сценаріям, за яких BF-BOF(OHF) (15,58 млн т сталі на рік) повністю замінюється водневим відновленням. При переведенні на H₂-DRI-EAF споживання електроенергії знаходиться на рівні 600–758 кВт·год/т сталі, тоді як у традиційній схемі BF-BOF електроспоживання є у 2–3 рази нижчим. Це підкреслює, що H₂-металургія потребує значного нарощування доступних потужностей генерації електричної енергії.

У разі повного переведення виробництва аміаку на зелений водень потреби галузі становитимуть 0,47–0,57 млн т H₂ залежно від сценарію (виробництво 2021 року або максимальні потужності). Додатково знадобиться 0,35–0,57 ТВт·год/рік електроенергії для роботи компресорів, насосів та інших допоміжних систем синтезу NH₃. Важливим аспектом є вивільнення природного газу: близько 2,8–3,4 млрд м³/рік може бути зекономлено завдяки переходу на електроліз, що суттєво знижує залежність від імпорتنих енергоносіїв.

У випадку цементної промисловості ключовим джерелом викидів CO₂ є як декарбонізація вапняку (60–65 %), так і спалювання вихопних палив у печах (35–40 %). Перехід на використання водню у «сухому» процесі випалу клінкеру дозволяє повністю усунути викиди від палива та суттєво зменшити вуглецевий слід галузі. Розрахунки показують, що навіть у консервативному сценарії (C1, рівень виробництва 2022 року) потреба у водні становитиме близько 138 тис. т/рік, а у післявоєнному сценарії з попитом у 15 млн т цементу (C2) – майже 383 тис. т/рік. Додатково необхідно від 0,44 до 1,23 ТВт·год електроенергії для допоміжних процесів.

Список літератури

- European Commission. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf (дата звернення: 05.08.2025).
- European Commission. Key actions of the EU Hydrogen Strategy. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en (дата звернення: 05.08.2025).
- Green Hydrogen Organisation. Ukraine overview. URL: <https://gh2.org/countries/ukraine> (дата звернення: 05.08.2025).
- Fuel Cells Works. Ukraine's First Hydrogen Plant Plans. URL: <https://fuelcellsworks.com/2025/06/05/h2/in-volyn-plans-are-underway-to-establish-the-country-s-first-hydrogen-plant-focused-on-exporting-products-to-the-eu> (дата звернення: 05.08.2025).
- International Energy Agency. Ukraine's hydrogen opportunity: A roadmap. URL: <https://www.iea.org/reports/unlocking-ukraines-hydrogen-opportunity-a-roadmap> (дата звернення: 05.08.2025).
- H2 Diplo Review. Prospects for Ukrainian green hydrogen sector. URL: https://h2diplo.de/wp-content/uploads/2024/07/20240702_Review-Hydrogen-Producers-Final.pdf (дата звернення: 05.08.2025).
- Hydrogen Ukraine. National Hydrogen Strategy of Ukraine. URL: https://www.ive.org.ua/?lang=en&page_id=3856 (дата звернення: 05.08.2025).
- Andrew R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*. 2019. Vol. 11. P. 1675–1710. doi: 10.5194/essd-11-1675-2019.
- Ghavam S., Vahdati M., Wilson I. A. G., Styring P. Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. Art. 580808. doi: 10.3389/fenrg.2021.580808.
- Rocky Mountain Institute. Low-Carbon Ammonia Technology: Blue, Green and Beyond. URL: <https://rmi.org/low-carbon-ammonia-technology-blue-green-and-beyond/> (дата звернення: 01.09.2025).
- Carmo M., Fritz D. L., Mergel J., Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. № 38 (12). P. 4901–4934. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151
- Appl M. *Ammonia: Principles and Industrial Practice*. 1999. doi: 10.1002/9783527613885 (дата звернення: 05.08.2025).
- Hydrogen Insight. Envision Energy launches world's largest green hydrogen and ammonia plant. URL: <https://hydrogeninsight.com> (дата звернення: 05.08.2025).
- HyDeal Asturias – Invest in Spain. URL: <https://www.investinspain.org/content/icex-invest/en/noticias-main/2022/hydeal-asturias.html> (дата звернення: 05.08.2025).
- European Commission, Innovation Fund 2023 call: 85 projects selected to receive €4.8 billion in grants. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_2056 (дата звернення: 05.08.2025).
- International Energy Agency (IEA). Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ee41bb9-8e81-4b64-8701-2acc064ff6e4/AmmoniaTechnologyRoadmap.pdf> (дата звернення: 05.08.2025).
- European Hydrogen Backbone (EHB). A future-proof hydrogen infrastructure for Europe. URL: <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf> (дата звернення: 05.08.2025).
- Staffell I., Scamman D., Abad A. V., Balcombe P., Dodds P. E., Ekins P., Shahd N. Warda K. R. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*. 2019. № 12. P. 463–491. doi: 10.1039/C8EE01157E.

19. APA Group, Wesfarmers Chemicals, Energy & Fertilisers. Renewable ammonia production in Western Australia via over-the-fence hydrogen. URL: <https://ammoniaenergy.org/articles/apa-group-and-wescefe-renewable-ammonia-production-in-western-australia-via-over-the-fence-hydrogen/> (дата звернення: 01.09.2025).
20. Graham P., Hayward J., Foster J. GenCost 2023–24: Final report. URL: https://www.csiro.au/-/media/Energy/GenCost/GenCost2023-24Final_20240522.pdf (дата звернення: 01.09.2025).
21. Фонд державного майна України. ПАТ «Одеський припортовий завод»: резюме URL: https://www.spfu.gov.ua/userfiles/pdf/opz-7-_250.pdf (дата звернення: 15.08.2025).
22. Черкаський «Азот» запустили два цехи, які є ключовими у виробництві добрив. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3895846-cerkaskij-azot-zapustili-dva-cehi-aki-e-klyucovimi-u-virobnictvi-dobriv.html> (дата звернення: 15.08.2025).
23. «РІВНЕАЗОТ» виробив за 2020 рік понад 1,8 млн тонн добрив. URL: <https://www.azot.rv.ua/press/novyny/383-rivneazot-vypustyv-za-2020-rik-ponad-1-8mln-tonn-dobryv> (дата звернення: 15.08.2025).
24. Alfa Laval. Increased plant capacity and reduced maintenance at fertilizer plant URL: <https://www.alfalaval.com/media/stories/fertilizers/increased-plant-capacity-and-reduced-maintenance-at-fertilizer-plant/> (дата звернення: 15.08.2025)
25. *Статистичний щорічник України за 2022*. Київ: Державна служба статистики України, 2023, 642 с.
26. Родін Л. Розробка хімічних технологій: виробництво «зеленого» метанолу і «зеленого» аміаку з «зеленого» водню. URL: https://sae.gov.ua/static-objects/sae/imported_content/67927ef787086.pdf (дата звернення: 15.08.2025).
27. Saygin D., Blanco H., Boshell F., Cordonnier J., Rouwenhorst K., Lathwal P., Gielen D. Ammonia production from clean hydrogen and the implications for global natural gas demand. *Sustainability*. 2023. № 15(2). 1623. doi: 10.3390/su15021623.
28. Ковеня Т. В. Аналіз роботи підприємств хімічного комплексу України у 2010 р. *Хімічна промисловість України*. 2010. № 3. С. 3–18.
29. Бабіченко А. К., Азаров М. І., Бабіченко Ю. А., Красніков І. Л., Лисаченко І. Г. Дослідження загальних тенденцій сучасного розвитку виробництва аміаку. *Technology Audit and Production Reserves*. 2014. № 51(19). С. 55–60. doi: 10.15587/2312-8372.2014.28098.
30. Hydrogen production: SMR technology. URL: <https://hygear.com/technology/steam-methane-reforming/> (дата звернення: 15.08.2025).
31. International Energy Agency. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. URL: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> (дата звернення: 15.08.2025).
32. *Воднева стратегія України*. Міністерство економіки України. URL: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf> (дата звернення: 15.08.2025).
33. Симборський А. І., Станиціна В. В. Потенціал енергозбереження у цементній промисловості. *Проблеми загальної енергетики*. 2010. Вип. 3. С. 25–29.
34. Паранюк Я. Д. *Оцінка ефективності інноваційних проектів на підприємствах в умовах ризику та невизначеності* : дис. канд. екон. наук: 08.00.04. Тернопіль. нац. екон. ун-т (ТНЕУ). Тернопіль : ТНЕУ, 2018. 216 с.
35. Плашихін С. В. *Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Цементна промисловість*. Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.
36. Миколок О. А., Ковальчук І. М. Практика впровадження енергоефективних технологій на підприємствах цементної промисловості України. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2014. № 1. С. 227–230.
37. Fennell P. S., Davis S. J., Mohammed A. Decarbonizing cement production. *Joule*. 2021. Vol. 5, No. 6. P. 1305–1311. doi: 10.1016/j.joule.2021.04.011.
38. Cement produces cement with climate-neutral fuel mix using hydrogen technology URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-01-10-2021> (дата звернення: 15.08.2025).
39. Williams F., Yang A., Nhuchhen D. R. Decarbonisation pathways of the cement production process via hydrogen and oxy-combustion. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 300. Art. 117931. doi: 10.1016/j.enconman.2023.117931.
40. Interfax-Ukraine. Український цемент має стати основою для післявоєнної відбудови – думка. URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/950279.html> (дата звернення: 11.08.2025).
41. Обух В. Повоєнне відновлення: актуальні шанси для розвитку будіндустрії. *Укрінформ*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3690313-povoenne-vidnovlenna-sans-dla-rozvitku-budindustrii.html> (дата звернення: 21.08.2025).
42. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking. *International Energy Agency*. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (дата звернення: 11.08.2025).
43. Boggelen J., Barnes C., Gavel D. J., Meijer K., Zeilstra C., Hage H. *Hlsarna pilot plant operations – an update*. 2023. Conference: 6th European Steel Technology and Application Days (ESTAD). URL: https://www.researchgate.net/publication/391049548_Hlsarna_pilot_plant_operations_-_an_update (дата звернення: 25.08.2025).
44. Vogl V., Åhman M., Nilsson L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. P. 736–745. doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.279.
45. Fan Z., Friedmann S. J. Low-carbon production of iron & steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*. 2021. doi:10.1016/j.joule.2021.02.018.
46. Steel and raw materials. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023-1.pdf> (дата звернення: 21.08.2025).
47. The facts about steelmaking. URL: <https://ieefa.org/sites/default/files/2022-06/steel-fact-sheet.pdf> (дата звернення: 25.08.2025).
48. Energy use in the steel industry URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf> (дата звернення: 25.08.2025).
49. Смірнов О. М., Тимошенко С. М., Нарівський А. В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та Європейського зеленого курсу. *Вісник НАН України*. 2023. № 4. С. 21–35. doi: 10.15407/vsn2023.04.021.

50. Ремус Р., Агуадо-Монсоне М. А., Рудьє С., Дельгадо Санчо Л. *Довідковий документ з найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ) для виробництва чавуну та сталі*. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/v3FMP-BREF-Final-Version_ukr_15-10.pdf (дата звернення: 25.08.2025).
51. Carey L., Brickman A., Yavorsky N., Rosas J., Gamage C. *Opportunities for Near-Zero-Emissions Steel Production in the Great Lakes*. URL: <https://rmi.org/gap-analysis-for-near-zero-emissions-steel-production-in-the-great-lakes/> (дата звернення: 25.08.2025).
52. Sustainable Steel Indicators. Brussels: World Steel Association, 2022.
53. Nurdiawati A., Zaini I. N., Wei W., Gyllenram R., Yang W., Samuelsson P. Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 393. 136262. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136262.
54. Alikulov K., Aminov Z., Anh L. H., Xuan T. D., Kim W. Comparative Technical and Economic Analyses of Hydrogen-Based Steel and Power Sectors. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 5. P. 1242. doi: 10.3390/en17051242.
55. Midrex Technologies, Inc. *Future Processing Options for Hydrogen DRI. Direct from Midrex*. URL: <https://www.midrex.com/tech-article/future-processing-options-for-hydrogen-dri/> (дата звернення: 01.09.2025).
56. U.S. Department of Energy. *Hydrogen Program – Hydrogen Production and Consumption in Direct Reduced Ironmaking*. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/08/f54/ftco-h2-scale-kickoff-2018-8-chevrier.pdf> (accessed 01.09.2025).
57. Rechberger K., Spanlang A., Sasiain Conde A., Wolfmeir H., Harris C. Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking. *Steel Research International*. 2020. Vol. 91. No. 6. 2000110. doi: 10.1002/srin.202000110.
- References (transliterated)**
- European Commission. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Available at: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf (accessed 05.08.2025)
 - European Commission. Key actions of the EU Hydrogen Strategy. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en (accessed 05.08.2025).
 - Green Hydrogen Organisation. Ukraine overview. Available at: <https://gh2.org/countries/ukraine> (accessed 05.08.2025).
 - Fuel Cells Works. Ukraine's First Hydrogen Plant Plans. Available at: <https://fuelcellworks.com/2025/06/05/h2/involyn-plans-are-underway-to-establish-the-country-s-first-hydrogen-plant-focused-on-exporting-products-to-the-eu> (accessed 05.08.2025).
 - International Energy Agency. Ukraine's hydrogen opportunity: A roadmap. Available at: <https://www.iea.org/reports/unlocking-ukraines-hydrogen-opportunity-a-roadmap> (accessed 05.08.2025).
 - H2 Diplo Review. Prospects for Ukrainian green hydrogen sector. 2024. Available at: https://h2diplo.de/wp-content/uploads/2024/07/20240702_Review-Hydrogen-Producers-Final.pdf (accessed 05.08.2025).
 - Hydrogen Ukraine. National Hydrogen Strategy of Ukraine. Available at: https://www.ive.org.ua/?lang=en&page_id=3856 (accessed 05.08.2025).
 - Andrew R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, 2019, Vol. 11, pp. 1675–1710, doi: 10.5194/essd-11-1675-2019.
 - Ghavam S., Vahdati M., Wilson I. A. G., Styring P. Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*, 2021, Vol. 9, Art. 580808, doi: 10.3389/fenrg.2021.580808.
 - Rocky Mountain Institute. Low-Carbon Ammonia Technology: Blue, Green and Beyond. RMI, 2025. Available at: <https://rmi.org/low-carbon-ammonia-technology-blue-green-and-beyond/> (accessed 01.09.2025).
 - Carmo M., Fritz D. L., Mergel J., Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, no 38 (12), pp. 4901–4934, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>.
 - Appl M. *Ammonia: Principles and Industrial Practice*, 1999, doi:10.1002/9783527613885.
 - Green Hydrogen Insight. Envision Energy launches world's largest green hydrogen and ammonia plant. Available at: <https://hydrogeninsight.com> (accessed 05.08.2025).
 - HyDeal Asturias – Invest in Spain, 2022. Available at: <https://www.investinspain.org/content/icex-invest/en/noticias-main/2022/hydeal-asturias.html> (accessed 05.08.2025).
 - European Commission, Innovation Fund 2023 call: 85 projects selected to receive €4.8 billion in grants. Available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_2056 (accessed 05.08.2025).
 - International Energy Agency (IEA). Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ee41bb9-8e81-4b64-8701-2acc064ff6e4/AmmoniaTechnologyRoadmap.pdf> (accessed 05.08.2025).
 - European Hydrogen Backbone (EHB). A future-proof hydrogen infrastructure for Europe. Available at: <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf> (accessed 05.08.2025).
 - Staffell I., Scamman, D., Abad A. V., Balcombe P., Dodds P. E., Ekins P., Shahd N., Warda K. R. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 2019, no. 12, pp. 463–491, doi: 10.1039/C8EE01157E
 - APA Group, Wesfarmers Chemicals, Energy & Fertilisers. Renewable ammonia production in Western Australia via over-the-fence hydrogen. Available at: <https://ammoniaenergy.org/articles/apa-group-and-wescef-renewable-ammonia-production-in-western-australia-via-over-the-fence-hydrogen/> (accessed 01.09.2025).
 - Graham P., Hayward J., Foster J. GenCost 2023–24: Final report. Available at: https://www.csiro.au/-/media/Energy/GenCost/GenCost2023-24Final_20240522.pdf (accessed 01.09.2025).
 - Fond derzhavnoho maina Ukrainy. PAT «Odeskyi pryportovyi zavod»: reziume [State Property Fund of Ukraine. PJSC Odessa Port Plant: summary]. Available at: https://www.spfu.gov.ua/userfiles/pdf/opz-7-_250.pdf (accessed 15.08.2025).
 - Cherkaskyi «Azot» zapustyly dva tsekhy, yaki ye kliuchovymy u vyrobnytstvi dobryv [Cherkasy Azot launched two workshops that are key to fertiliser production]. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric->

- economy/3895846-cerkaskij-azot-zapustili-dva-cehi-aki-e-klucovimi-u-virobnictvi-dobriv.html (accessed 15.08.2025).
23. «RIVNEAZOT» vyrobnyv za 2020 rik ponad 1,8 mln tonn dobrov [‘RIVNEAZOT’ produced over 1.8 million tonnes of fertilisers in 2020]. Available at: <https://www.azot.rv.ua/press/novyny/383-rivneazot-vypustyv-za-2020-rik-ponad-1-8mln-tonn-dobriv> (accessed 15.08.2025).
 24. Alfa Laval. *Increased plant capacity and reduced maintenance at fertilizer plant*. Available at: <https://www.alfalaval.com/media/stories/fertilizers/increased-plant-capacity-and-reduced-maintenance-at-fertilizer-plant/> (accessed 15.08.2025).
 25. *Statystychnyi shchorichnyk Ukrainy za 2022 [Statistical Yearbook of Ukraine for 2022]*. Kyiv. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine], 2023, 642 p.
 26. Rodin L. *Rozrobka khimichnykh tekhnolohii: vyrobnytstvo «zelenoho» metanolu i «zelenoho» amiaku z «zelenoho» vodniu [Development of chemical technologies: production of ‘green’ methanol and ‘green’ ammonia from ‘green’ hydrogen]*. Available at: https://sae.gov.ua/static-objects/sae/imported_content/67927ef787086.pdf (accessed 15.08.2025).
 27. Saygin D., Blanco H., Boshell F., Cordonnier J., Rouwenhorst, K., Lathwal, P., Gielen, D. Ammonia production from clean hydrogen and the implications for global natural gas demand. *Sustainability*, 2023, no. 15 (2), 1623, doi: 10.3390/su15021623.
 28. Kovenya T. V. Analiz roboty pidpriemstv khimichnoho kompleksu Ukrainy u 2010 r [Analysis of the performance of Ukrainian chemical companies in 2010]. *Khimichna promyslovist Ukrainy [Chemical industry of Ukraine]*, 2010, no 3, pp. 3–18.
 29. Babichenko A. K., Azarov M. I., Babichenko Yu. A., Krasnikov I. L., Lysachenko I. H. Doslidzhennia zahalnykh tendentsii suchasnoho rozvytku vyrobnytstva amiaku [Research into general trends in the modern development of ammonia production]. *Technology Audit and Production Reserves*, 201, no. 51(19), pp.55–60, doi: 10.15587/2312-8372.2014.28098.
 30. Hydrogen production: SMR technology. Available at: <https://hygear.com/technology/steam-methane-reforming/> (accessed 15.08.2025).
 31. International Energy Agency. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Available at: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> (accessed 15.08.2025).
 32. *Vodneva stratehiia Ukrainy [Ukraine's Hydrogen Strategy]*. Ministerstvo ekonomiky Ukrainy [Ministry of Economy of Ukraine]. Available at: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf> (accessed 15.08.2025).
 33. Symborsky A. I., Stanitsyna V. V. Potencial energozberezhennya u cementnij promyslovosti [Energy saving potential in the cement industry]. *Problemy` zagal`noyi enerety`ky` [General energy issues]*, 2010, Vol. 3, pp. 25–29.
 34. Paranyuk Y. D. Ocinka efekty`vnosti innovacijny`x proektiv na pidprijemstvax v umovax ry`zy`ku ta nevy`znachenosti [Assessment of the effectiveness of innovative projects at enterprises in conditions of risk and uncertainty]. PhD thesis. 2018. Available at: <https://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/36948>.
 35. Plashykhin S. V. *Dovidnyk z resursoiefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. Tsementna promyslovist [Resource Efficient and Cleaner Production Handbook. Cement Industry]*. Kyiv. Tsentr resursoiefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva [Centre for Resource-Efficient and Clean Production], 2020, 96 p.
 36. Mykoliuk O. A., Kovalchuk I. M. *Praktyka vprovadzhennia enerhoiefektyvnykh tekhnolohii na pidpriemstvakh tsementnoi promyslovosti Ukrainy [Practice of implementing energy-efficient technologies at enterprises of the cement industry of Ukraine]*. *Bulletin of Khmelnytsky National University. Economic Sciences*. Available at: <https://elar.khmnu.edu.ua/bitstream/123456789/1879/1/MIK-OLYUK2.pdf/> (accessed 01.09.2025).
 37. Fennell P. S., Davis S. J., Mohammed A. Decarbonizing cement production. *Joule*, 2021, Vol. 5, no. 6, pp. 1305–1311, doi: 10.1016/j.joule.2021.04.011.
 38. Cement produces cement with climate-neutral fuel mix using hydrogen technology. Available at: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-01-10-2021> (accessed 15.08.2025).
 39. Williams F., Yang A., Nhuchhen D. R. Decarbonisation pathways of the cement production process via hydrogen and oxy-combustion. *Energy Conversion and Management*, 2024, Vol. 300, 117931, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117931.
 40. Interfax-Ukraine. *Ukrainskyi tsement maie staty osnovoiu dlia pisliavoiennoi vidbudovy [Interfax-Ukraine. Ukrainian cement should become the basis for post-war reconstruction]*. Available at: <https://interfax.com.ua/news/economic/950279.html> (accessed 11.08.2025).
 41. Obukh V. Povoienne vidnovlennia: aktualni shansy dlia rozvytku budindustrii [Post-war reconstruction: current opportunities for the development of the construction industry]. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3690313-povoienne-vidnovlennia-sans-dla-rozvitku-budindustrii.html> (accessed 21.08.2025).
 42. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking. *International Energy Agency*. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (accessed 11.08.2025).
 43. Van Boggelen J., Barnes C., Gavel D. J., Meijer K., Zeilstra C., Hage H. Hlsarna pilot plant operations – an update Conference: 6th European Steel Technology and Application Days (ESTAD). Available at: https://www.researchgate.net/publication/391049548_Hlsarna_pilot_plant_operations_-_an_update (accessed 25.08.2025).
 44. Vogl V., Ahman M., Nilsson L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 203, pp. 736–745, doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.279.
 45. Fan Z., Friedmann S. J. Low-carbon production of iron & steel: Technology options, economic assessment, and policy, *Joule*, 2021, doi:10.1016/j.joule.2021.02.018.
 46. Steel and raw materials. Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023-1.pdf> (accessed 21.08.2025).
 47. The facts about steelmaking. Available at: <https://ieefa.org/sites/default/files/2022-06/steel-fact-sheet.pdf> (accessed 25.08.2025).
 48. Energy use in the steel industry. Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf> (accessed 25.08.2025).

49. Smirnov O. M., Tymoshenko S. M., Narivskyi A. V. Vidnovlennia ta innovatsiinyi rozvytok vyrobnytstva stali v Ukraini v konteksti enerhoefektyvnosti ta Yevropeiskoho zelenoho kursu [Restoration and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and the European Green Deal]. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2023, Vol. 4, pp. 21–35, doi: 10.15407/visn2023.04.021.
50. Remus R., Ahuado-Monsone M., Rudie S., Delhado Sancho L. *Dovidkovyi dokument z naikrashchyykh dostupnykh tekhnolohii ta metodiv upravlinnia (NDTM) dlia vyrobnytstva chavunu ta stali* [Reference document on best available techniques and management methods (BAT) for the production of pig iron and steel]. Available at: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/v3FMP-BREF_Final-Version_ukr_15-10.pdf (accessed 25.08.2025)
51. Carey L., Brickman A., Yavorsky N., Rosas J., Gamage C. Opportunities for Near-Zero-Emissions Steel Production in the Great Lakes Available at: <https://rmi.org/gap-analysis-for-near-zero-emissions-steel-production-in-the-great-lakes/> (accessed 25.08.2025).
52. *Sustainable Steel Indicators*. Brussels: World Steel Association, 2022.
53. Nurdiawati A., Zaini I.N., Wei W., Gyllenram R., Yang W., Samuelsson P. Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process. *Journal of Cleaner Production*, 2023, Vol.393, 136262, doi:10.1016/j.jclepro.2023.136262.
54. Alikulov K., Aminov Z., Anh L. H., Xuan T. D., Kim W. Comparative Technical and Economic Analyses of Hydrogen-Based Steel and Power Sectors. *Energies*, 2024, Vol. 17, no. 5, p. 1242, doi: 10.3390/en17051242.
55. Midrex Technologies, Inc. Future Processing Options for Hydrogen DRI. Direct from Midrex. Available at: <https://www.midrex.com/tech-article/future-processing-options-for-hydrogen-dri/> (accessed 01.09.2025).
56. U.S. Department of Energy. Hydrogen Program – Hydrogen Production and Consumption in Direct Reduced Ironmaking. Available at: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/08/f54/fcto-h2-scale-kickoff-2018-8-chevrier.pdf> (accessed 01.09.2025).
57. Rechberger K., Spanlang A., Sasiain Conde A., Wolfmeir H., Harris C. Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking. *Steel Research International*. 2020. Vol. 91, no. 6, 2000110, doi: 10.1002/srin.202000110.

Відомості про авторів (About authors)

Толстов Дмитро Вадимович – аспірант, Інститут загальної енергетики Національної академії наук України; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-2042-1836; e-mail: dtolstov93@gmail.com.

Tolstov Dmytro – graduate student, General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2042-1836; e-mail: dtolstov93@gmail.com.

Білан Тетяна Романівна – кандидат технічних наук, старший дослідник, відділ трансформації структури паливно-енергетичного комплексу, Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-0280-6716; e-mail: bilan.ize@gmail.com.

Bilan Tetiana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Department of Structural transformation of the fuel and energy complex, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0280-6716; e-mail: bilan.ize@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Толстов Д. В., Білан Т. Р. Оцінка потреб енергоресурсів для декарбонізації промисловості України: сталь, аміак, цемент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 3 (25). С. 27-38. doi:10.20998/2413-4295.2025.03.04.

Please cite this article as:

Tolstov D., Bilan T. Assessment of resource requirements for decarbonization in energy-intensive industries of Ukraine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 3(25), pp. 27–38, doi:10.20998/2413-4295.2025.03.04.

Надійшла (received) 02.08.2025

Прийнята (accepted) 20.09.2025