

УДК 669.162.2:669.788

О. І. Бабаченко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7501-4173**О. С. Нестеров**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-0183-0327**Л. І. Гармаш**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-6873-6685*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА КРИЗА

Анотація. Метою дослідження є виявлення нових напрямків скорочення частки викопного палива в енергобалансі промислового виробництва для можливості подолання енергетичної кризи. Останні декілька років людство живе в умовах безпрецедентної енергетичної кризи. Спочатку пандемія коронавірусу, потім різке зростання цін на енергоносії та розв'язана росією війна в Україні загострили проблеми енергоспоживання та посилили необхідність ширшого розвитку альтернативних джерел енергії та новітніх промислових технологій. В кризових умовах 2022 року Європейський Союз не просто зберіг курс на декарбонізацію, а й прискорює трансформацію економіки та промисловості, розуміючи, що це сприяє енергетичній незалежності та безпеці. Розробляються дві ключові стратегії у енергетичній сфері - диверсифікація за допомогою розподілу та балансу джерел енергії, що гарантують безпеку всієї енергетичної системи, та декарбонізація як курс на поступову відмову від традиційних джерел енергії (природний газ, нафта, кам'яне вугілля, торф), зменшення викидів вуглекислого газу та перехід на відновлювані джерела (випромінювання Сонця, вітер, морські припливи, біомаса). Одним із ключових компонентів майбутньої енергетичної системи розглядається нешкідливий для довкілля водень. Проаналізовано основні напрямки Європейської Стратегії в галузі водню, представлено низку основоположних документів енергетичної політики ЄС, прийнятих у 2022 році. Чорна металургія сьогодні є одним із найбільших джерел викидів, тому завдання змінити курс на виробництво з низьким рівнем викидів та вуглецево-нейтральним паливом є для неї одним із найактуальніших. Потенціал водню як палива та відновника відомий давно, але зараз його роль у декарбонізації на всіх етапах металургійного виробництва стає дедалі суттєвішою. У світі запущено декілька великих дослідницьких програм із виробництва водню та відновлення оксидів заліза. На основі глибокої модернізації виробничих потужностей та енергетичних систем, а також запровадження нових новаторських методів кількість поточних річних викидів під час виробництва сталі може бути знижена на 15 – 20 %. Подальше скорочення до ~1,0 т CO₂/т сталі можливе за допомогою впровадження нових технологій, таких як рециркуляція колошникового газу в доменній печі, киснева доменна піч, максимальна заміна коксу біомасою та за рахунок заміни вуглецю воднем у таких відновниках та паливах, як природний газ та коксовий газ. Енергетична криза може стати «вікном можливостей», розвиваючи нові напрямки скорочення частки викопного палива в енергобалансі.

Ключові слова: декарбонізація, енергетична криза, водень, низьковуглецеві технології, відновлювальні джерела енергії.

Посилання для цитування: Бабаченко О. І., Нестеров О. С., Гармаш Л. І. Декарбонізація та енергетична криза. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 35-48. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-35-48.

Стан проблеми. Сьогодні світ переживає найсильнішу з 1970-х років енергетичну кризу. Споживання енергоресурсів, у тому числі, природного газу, значно зменшилося під час пандемії 2020 р., що призвело до зниження його вартості та відкрило можливості прискореного переходу до альтернативної енергетики та зниження викидів. Але з 2021 р. економіка почала відновлюватися, попит на енергоресурси зріс і альтернативні джерела перестали справлятися зі збільшеними потребами. У результаті, з вересня 2021 року почалося зростання цін на природний газ, нафту і вугілля і до березня 2022 року ціни на сиру нафту зросли в 2 рази, на вугілля в 3, на природний газ більш ніж як у 5 разів у порівнянні з початком попереднього року.

Серйозну вразливість глобальної енергетичної системи посилила війна в Україні, яка показала, як країни, багаті на викопне паливо, можуть чинити величезний тиск на весь світ. Це не перший випадок, коли енергія використовується як інструмент геополітики, проте цього разу з'явилися реальні можливості позбутися залежності від імпорту викопного палива та прискорити перехід до альтернативних відновлюваних джерел енергії, вирішуючи при цьому питання глобальної декарбонізації відповідно до цілей Паризької угоди щодо клімату та досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року [1].

Мета дослідження – виявлення нових напрямків скорочення частки викопного палива в енергобалансі промислового виробництва для можливості подолання енергетичної кризи.

Методика дослідження – використання системного аналізу стану використання енергетичних ресурсів у металургії з відкритих джерел, обробка інформації та прогноз.

Основні результати дослідження. В останній рік Європейський Союз не просто зберіг курс на декарбонізацію, а й прискорює трансформацію економіки та промисловості, розуміючи, що це сприяє енергетичній незалежності та безпеці. Восени 2022 р. на позачерговому засіданні Ради ЄС з питань транспорту, телекомунікацій та енергетики було особливо наголошено на необхідності зменшити залежність від викопного палива, в тому числі, із Росії, та прискорити декарбонізацію енергетичної системи ЄС [2].

У кризових умовах 2022 року Європа дотримується двох ключових стратегій у енергетичній сфері:

- диверсифікація – розподіл та баланс джерел енергії, які гарантують безпеку всієї енергетичної системи;
- декарбонізація – курс на поступову відмову від традиційних джерел

енергії (природний газ, нафта, кам'яне вугілля, торф), зменшення викидів вуглекислого газу (CO_2) та перехід на відновлювані джерела (випромінювання Сонця, вітер, морські припливи, біомаса).

По суті, кліматичний енергоперехід – це перша в історії людства трансформація, під час якої люди свідомо відмовляються від ефективніших джерел енергії на користь менш ефективних, але відновлюваних. Зміна клімату включена до Глобальної стратегії ЄС як одна з головних загроз безпеці поряд з ненадійністю енергетичних поставок, тероризмом, гібридними загрозами та економічною нестабільністю [3]. Для реалізації стратегій щодо клімату та енергетичної безпеки у 2015 р. було створено Енергетичний союз, який у 2019 р. розробив «Зелений пакт для Європи», покликаний привести ЄС до нульового вуглецевого балансу до 2050 р. Основним документом, який закріплює на законодавчому рівні мету «Зеленого пакту», є ухвалений у 2021 р. Кліматичний закон [4].

У лютому 2022 р. було прийнято так звану «Зелену таксономію», яка визначила перелік низьковуглецевих джерел енергії [5]. Одним із ключових компонентів майбутньої енергетичної системи розглядається нешкідливий для довкілля водень. У Європейській Стратегії в галузі водню, яка була прийнята влітку 2020 р., представлено класифікацію різних його видів залежно від джерел походження, способів виробництва та вуглецевого сліду [6]:

- «зелений» водень - найчистіший водень, який отримується за рахунок електролізу води із застосуванням енергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ);

- «блакитний» водень одержують із природного газу, а побічний при його виробництві вуглекислий газ уловлюється та зберігається у спеціальних сховищах;

- «сірий» водень - при його отриманні CO_2 викидається в атмосферу.

Якщо у травні 2021 року Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) прогнозувало, що для досягнення нульових викидів до 2050 року потрібно 530 мільйонів тонн водню, то в новому звіті, опублікованому в жовтні 2022 року, МЕА прогнозує, що потрібно всього 450 мільйонів тонн (скорочення на 15 % порівняно з минулорічним дослідженням) [7]. У торішньому прогнозі приблизно 200 із 530 мільйонів тонн водню (~37,7 %) мали надходити з «блакитного» водню. Але в новому звіті йдеться про те, що з викопного палива буде отримано трохи більше 112,5 млн. тонн (~21 %). 337,5 млн. тонн будуть вироблятися шляхом електролізу води. Щоб досягти нульових викидів до 2050 року, вже до 2030 буде потрібно 90 мільйонів тонн водню, виробленого електролізерами потужністю 720 ГВт.

Оскільки всього за кілька місяців 2022 р. ціни на природний газ, який є основною сировиною для виробництва «блакитного» і «сірого» водню,

зросли більш ніж на 70%, енергетична криза підштовхнула до термінового пошуку альтернативних джерел енергії. Нові інвестиції в екологічно чистий «зелений» водень перевищили суму 70 мільярдів доларів, оскільки водень, виготовлений з викопного палива, став нерентабельним [8]. В даний час водень вже є промисловим товаром, у рік виробляється і споживається близько 120 млн. тонн «сірого» водню, в основному в нафтопереробній промисловості та для виробництва аміаку. 96% всього водню виробляється з копалин, а решта - шляхом електролізу. «Зелений» водень нині дорожчий за «сірий», проте його вартість падає через комбінований ефект зниження вартості електролізера та здешевлення відновлюваної енергії настільки, що в найближчому майбутньому він може скласти конкуренцію «блакитному» водню (рис. 1). Найближчим десятиліттям за певних умов цілком досяжні витрати на виробництво «зеленого» водню у розмірі близько 2-3 доларів США за кілограм.

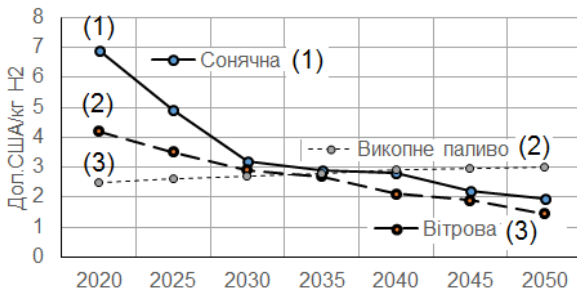


Рисунок 1 – Прогноз витрат на виробництво водню із сонячної (1), вітрової (2) енергії та водню із викопного палива (3).

У травні 2022 року «Велика сімка» запустила Hydrogen Action Pact, в якому викладаються стан та перспективи розвитку водневих технологій у кожній країні G7, включаючи аналіз витрат, стратегії та політичної підтримки та рекомендації щодо прискорення світової торгівлі воднем. За даними Rystad Energy, провідної аналітичної компанії в нафтогазовій галузі, у березні 2022 року ціни на «сірий» водень у Європі досягли піку ~14 доларів за кг, тоді як ціни на «зелений» водень варіювалися від 4 доларів за кг на Піренейському півострові до 16 доларів за кг в інших місцях [9]. З іншого боку, дефіцит сировини торкнувся і сектору відновлюваних джерел енергії, що призвело до підвищення вартості «зеленого» водню [10]. Однак, згідно з прогнозом МЕА, обсяг «зеленого» водню зростатиме, а водневі проекти на основі викопного палива, особливо ті, що пов'язані з газом, можуть загальмуватися через високі ціни на газ, ненадійність постачання та зобов'язання щодо скорочення використання природного газу. На відміну від копалин, «зелений» водень можна виробляти практично скрізь, де є сприятливі вітрові або сонячні умови.

У травні 2022 року було запущено європейський проект REPowerEU, покликаний допомогти Європі відмовитися від російського викопного

палива за допомогою виробництва до 2030 року 10 мільйонів тонн «зеленого» водню та імпорту ще 10 мільйонів тонн [11]. Для цього буде потрібно близько 600 ГВт нової вітрової та сонячної енергії та 200 ГВт електролізерів. Тільки в Німеччині за 9 місяців 2022 року запустили 4906 МВт нових сонячних потужностей та 1653 МВт вітряних [12].

Наприкінці жовтня 2022 року на Європейському водневому тижні ЄС оголосив про нову велику багатомільярдну ініціативу щодо фінансування європейського водню, в рамках якої буде виділено до 3 млрд. євро на проекти по всьому ланцюжку його створення, включаючи виробництво електролізерів, відновлюваних джерел енергії та виробництво екологічно чистого водню у важкій промисловості [13]. Ця програма не тільки посилить роль водню, а й підтримає стратегію відмови від російського викопного палива.

Близько 1 мільярда євро з цієї суми буде направлено на проекти з зневуглицювання важкої промисловості – на виробництво сталі, аміаку, хімікатів та виробництво і використання відновлюваного водню. І хоча водень не є панацеєю від кліматичної кризи, він пропонує гарні рішення для конкретних галузей важкої промисловості (металургія, транспорт, судноплавання, гірничодобувна промисловість), де наслідки енергетичної кризи позначаються найбільше. Стрімке зростання вартості енергії, інфляція, дефіцит сировини вже призвели до безпрецедентного простою потужностей та скорочення виробництва сталі приблизно на 10 % [14]. Тому де тільки можливо природний газ замінюється продуктами нафтопереробки, відновлюється навіть генерація на мазуті, чого не було вже дуже давно.

Чорна металургія, яка значною мірою залежить від викопних енергоносіїв, як і раніше, є одним з основних джерел викидів CO₂ (рис. 2) [15-16]. На сьогодні питомі викиди в чорній металургії складають близько 1,8 т CO₂/т сталі. За рахунок модернізації заводів, запровадження сучасних технологій та підвищення енергоефективності на всіх етапах виробництва можна знизити викиди на 15 – 20 %. Подальше скорочення до ~1,0 т CO₂/т сталі можливі за допомогою нових технологій, таких як рециркуляція колошникового газу доменної печі, киснева доменна піч чи максимальна заміна коксу біомасою. Значно знизити викиди CO₂ можна за рахунок заміни вуглецю воднем у таких відновниках та паливах, як природний газ та коксовий газ. Це стосується і процесів прямого відновлення заліза (DR). Суттєвого скорочення можна досягти за допомогою захоплення та зберігання CO₂ (CCS).

Активна розробка низьковуглецевих технологій виробництва сталі, в тому числі, на основі водню, ведеться вже понад 60 років [17-18]. З початку 2000-х років було реалізовано кілька великих міжнародних програм – програма ULCOS у Європі [19-20], програма CO₂ Breakthrough у світовому масштабі [21-22]. У 2010-х дослідження значно сповільнилися через кризу

та фінансові проблеми, проте надалі необхідність контролювати зміни клімату призвела до значного зростання різних проектів та їх подальшого промислового впровадження [23-24]. Серед найбільш масштабних – COURSE50 у Японії, програма POSCO у Кореї, австралійська програма CO2BTP, програма прориву AISI CO₂ у Північній Америці, проекти Китаю, Індії та Тайваню [25-26].

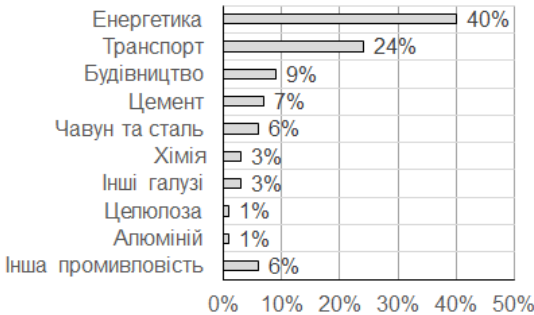


Рисунок 2 – Сумарні викиди CO₂ за галузями.

Відповідно до Паризької угоди, до 2050 року викиди при виробництві сталі повинні скоротитися на 90 % порівняно з поточними рівнями, що, згідно з останнім дослідженням Wood Mackenzie Horizons, вимагатиме інвестицій у розмірі 1,4 трильйона доларів США та революційних змін на кожному етапі виробництва [27]. Для створення нових водневих печей прямого відновлення та електродугових печей потрібно не менше 800-900 мільярдів доларів США, інвестиції в нові гірничодобувні підприємства та потужності з виробництва «зелених» окатишів потребуватимуть 250-300 мільярдів доларів США. Для переходу на чисту енергію потрібно близько 2000 гігават потужностей з виробництва відновлюваних джерел енергії. Заходи щодо компенсації викидів вуглецю (уловлення, використання та зберігання вуглецю CCUS) вимагатимуть додаткових інвестицій у розмірі 200-250 мільярдів доларів США.

Підвищення цін на сировину та витрати на боротьбу з викидами вуглецю на основі нових технологій та використання низьковуглецевої сировини призведуть до збільшення собівартості виробництва сталі на ~15-20 %. Для зневуглецювання потрібно близько 50 мільйонів тонн «зеленого» водню, тому для «зеленої» сталі має бути розроблена «Воднева екосистема». Зрештою, металургія має здійснити повний перехід від енергії, переважно заснованої на вуглеводнях, до відновлюваної енергії по всьому ланцюжку – від видобутку корисних копалин до виробництва сталі. Кількісна оцінка масштабу цієї проблеми:

- близько 50 млн. т зеленого водню на рік за конкурентними цінами (~2 долари США за кг);
- близько 2000 ГВт виділених потужностей із вироблення

відновлюваних джерел енергії;

- збільшення споживання високоякісної залізної руди в 5 разів (до 750 млн. тонн);
- подвоєння глобального обсягу металобрухту (з коефіцієнтом вилучення понад 80 %) з метою переходу на більш екологічно чисту сировину;
- уловлювання та зберігання ~470 млн. тонн вуглецю на рік.

Згідно з останнім звітом асоціації Hydrogen Europe, зневуглицювання середнього металургійного заводу в ЄС вимагатиме 1,2-1,3 ГВт електролізерів, які працюють на відновлюваних джерелах енергії. Перехід усіх металургійних заводів ЄС на водневий маршрут «залізо прямого відновлення - електродугова піч» потенційно може скоротити викиди парникових газів до 196 млн. тонн на рік, але для цього потрібно до 5,3 млн. тонн відновлюваного водню і до 370 ТВтч додаткової відновлюваної електроенергії, включаючи споживання електроенергії в ЕДП [29].

За останні 50-60 років завдяки постійному розвитку та впровадженню нових технологій металургійна промисловість підвищила свою енергоефективність та знизила питому витрату енергії приблизно на 60%. Сьогодні у рамках програми ULCOS розробляються кілька революційних технологій різкого скорочення викидів CO₂ у чорній металургії [29]:

- 1) доменна піч з рециркуляцією колошникового газу (TGR-BF);
- 2) новий процес відновлювальної плавки (HIsarna);
- 3) покращене пряме відновлення (ULCORED);
- 4) електроліз залізної руди (ULCOWIN і ULCOLYSIS);
- 5) виробництво сталі на основі водню;
- 6) використання біомаси як відновника.

Економічні та екологічні показники передових технологій ULCOS показують, що їхнє впровадження на металургійних комбінатах може скоротити викиди CO₂ на 80 %. Особлива роль тут належить доменному виробництву, на яке припадає ледь частка всіх викидів чорної металургії. Оскільки вуглець у доменному процесі є і відновником, і паливом, необхідно вирішувати проблему комплексно – шукати ефективні заміники і того, й іншого на основі «проривних» технологій.

Вже зараз проекти кількох великих виробників (ArcelorMittal, LKAB, SSAB, Thyssenkrupp, Vattenfall та ін.) перебувають у стадії розробки та надалі будуть відігравати важливу роль у розвитку необхідних технологій для виробництва економічно обґрунтованої «зеленої» сталі. У Швеції за проектом HYBRIT будується демонстраційний завод, до якого входять установки прямого відновлення залізної руди, що живиться воднем від установки електролізу води з використанням електроенергії, що не містить викопного палива [30]. Компанія ArcelorMittal оголосила про початок виробництва чавуну на основі водню на своєму заводі прямого відновлення MIDREX у Гамбурзі [31]. Очікується, що в промислових масштабах водень

для відновлення залізняку до заліза реально почне використовуватися вже до 2030 року [32].

Україна також має намір прискорити інтеграцію до проектів, спрямованих на участь у «зеленому переході». У жовтні 2022 р. Укргідроенерго та Концерн Галнафтогаз підписали меморандум про співпрацю з метою реалізації водневої стратегії України, спрямованої на підвищення стабільності та незалежності енергосистеми країни. Укргідроенерго, як найбільша гідрогенеруюча компанія в Україні, має намір брати участь у виробництві «зеленого» водню як альтернативного палива з метою інтеграції України у відповідні європейські процеси [33].

В ІЧМ НАН України науково-дослідні роботи з використання водню у доменному виробництві ведуться ще з 60-х років минулого століття. У 1966р. на доменній печі заводу «Запоріжсталь» були проведені промислові випробування технології вдування водню (більше 50 % H_2 у коксовому газі) в умовах роботи печі із застосуванням природного газу, які показали, що збільшення вмісту водню при заміні приблизно половини природного газу, що надходить у піч, подвоєною кількістю коксового призвело до підвищення продуктивності печі на 3,4 % та зниженню витрати коксу на 1,2 % [34]. Це відбувається, значною мірою, за рахунок більш рівного ходу печі при вдуванні збагаченого воднем коксового газу, що дозволяє, з одного боку, при збереженні перепаду тиску підвищити питому витрату повітряного дуття, а отже, і інтенсивність плавлення на 2,6 % , а, з іншого боку, збільшити кількість відновлювальних газів, тобто знизити ступінь прямого відновлення.

Висновки

У світі запущено декілька великих дослідницьких програм із виробництва водню та відновлення оксидів заліза. На основі глибокої модернізації виробничих потужностей та енергетичних систем, а також запровадження нових новаторських методів кількість поточних річних викидів під час виробництва сталі може бути знижена на 15 – 20 %. Подальше скорочення до $\sim 1,0$ т CO_2 /т сталі можливе за допомогою впровадження нових технологій, таких як рециркуляція колошникового газу в доменній печі, киснева доменна піч, максимальна заміна коксу біомасою та за рахунок заміни вуглецю воднем у таких відновниках та паливах, як природний газ та коксовий газ. Енергетична криза може стати «вікном можливостей», розвиваючи нові напрямки скорочення частки викопного палива в енергобалансі.

Аналіз результатів багаторічних досліджень з використання водню в доменному виробництві, які проводяться в ІЧМ, показує, що зниження питомої витрати коксу при застосуванні відновлювальних газів з підвищеним вмістом водню досягається за рахунок більш інтенсивної роботи водню в порівнянні з окисом вуглецю в нижніх горизонтах печі, а

також подальшого розширення зони непрямого відновлення за рахунок переміщення її у нижні горизонти. Визначено основні закономірності впливу газової фази на характер відновлення, плавлення та краплинного перебігу залізородних матеріалів у процесі відновлювально-теплової обробки газами з різним вмістом водню, що дозволило розробити комплекс вимог до якості залізородної сировини, скоротити витрати твердого палива, підвищити ефективність заміни коксу іншими видами палива та розробити технологічні прийоми доменної плавки з використанням двох та більше видів залізородних матеріалів, що забезпечують збільшення кампанії доменних печей.

Перелік посилань

1. Paris Agreement. United Nations 2015. URL: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.
2. Як Європа позбувається залежності від російських енергоресурсів. URL: https://finance.ua/saving/jak-evropa-pozbuvaetsia-zalezhnosti-vid-rosijskyh-energoresursiv#headline_4.
3. Shared Vision, Common Action: A Stronger Europe. A Global Strategy for the European Union's Foreign And Security Policy // European External Action. URL: https://eeas.europa.eu/archives/docs/top_stories/pdf/eugs_review_web.pdf.
4. European Climate Law. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119>.
5. EU Taxonomy: Commission presents Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonization. European Commission. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_711.
6. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Brussels, 8.7.2020. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.
7. IEA shrinks forecast for blue hydrogen production by almost half in wake of global gas crisis in net-zero scenario. URL: <https://www.hydrogeninsight.com/production/iea-shrinks-forecast-for-blue-hydrogen-production-by-almost-half-in-wake-of-global-gas-crisis-in-net-zero-scenario/2-1-1342981>.
8. Accelerating hydrogen deployment in the G7: Recommendations for the Hydrogen Action Pact. URL: <https://www.irena.org/Publications/2022/Nov/Accelerating-hydrogen-deployment-in-the-G7>.
9. Navigating the future of energy. URL: <https://www.rystadenergy.com/>.
10. European Hydrogen Bank will close '100% of the cost gap' between renewable and fossil hydrogen as soon as 2023, but shadow of US tax credit looms. URL: <https://www.hydrogeninsight.com/policy/european-hydrogen-bank-will-close-100-of-the-cost-gap-between-renewable-and-fossil-hydrogen-as-soon-as-2023-but-shadow-of-us-tax-credit-looms/2-1-1341703>.
11. REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition. URL: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/>

- detail/en/IP_22_3131.
12. Germany connects 1 GW of wind, solar to the grid in Sept. URL: <https://renewablesnow.com/news/germany-connects-1-gw-of-wind-solar-to-the-grid-in-sept-803003/>.
 13. EU unveils \$3bn cash pot to realise its hydrogen targets – and it wants projects to fund right now. URL: <https://www.hydrogeninsight.com/industrial/eu-unveils-3bn-cash-pot-to-realise-its-hydrogen-targets-and-it-wants-projects-to-fund-right-now/2-1-1341502>.
 14. European steel and aluminium sectors call for cautious implementation of carbon import levy. URL: <https://www.fastmarkets.com/insights/european-steel-and-aluminium-sectors-call-for-cautious-implementation-of-carbon-import-levy>.
 15. Holappa L. A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry. *Metals*. 2020. 10(9), 1117. DOI: 10.3390/met10091117.
 16. Global Status of CCS 2020- Report of The Global CCS Institute, URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf>.
 17. Birat J.-P., Antoine M., Dubs A., et al. Vers une siderurgie sans carbone? *Revue de metallurgie*, 1993. Vol. 90, No°3. P. 411–422. DOI: 10.1051/metal/199390030411.
 18. Trusted data to back-up your decisions. URL: https://www.icis.com/explore/commodities/energy/hydrogen/?cmpid=PSC%7cENER%7cCHLEG-2022-0824-EMEA-Hydrogen_PPC_Search%7cHydrogen&sfid=7014G00001uSskQAE&gclid=CjwKCAiA68ebBhB-EiwALVC-Nj2joIExQPnOce31_sKGrYmJdJo7zCJ_rAVd_mioJRY4qfBdlziO9nxoCenUQAvD_BwE.
 19. Birat J.-P. Steel and CO₂ – the ULCOS Program, CCS and Mineral Carbonation using Steelmaking Slag. URL: https://www.researchgate.net/profile/Jean-Pierre-Birat/publication/237496408_Steel_and_CO2_-_the_ULCOS_Program_CCS_and_Mineral_Carbonation_using_Steelmaking_Slag/links/53f338750cf2da8797445a09/Steel-and-CO2-the-ULCOS-Program-CCS-and-Mineral-Carbonation-using-Steelmaking-Slag.pdf.
 20. Jan van der Stel. Development of ULCOS-Blast Furnace: Working-toward tecnology demonstration. URL: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Iron%20and%20Steel%20202%20Secured%20presentations/1050%20Jan%20van%20der%20Stel.pdf.
 21. Carbon Recycling Breakthrough Converts 100% Of CO₂ Into Ethylene. URL: <https://oilprice.com/Energy/Energy-General/Carbon-Recycling-Breakthrough-Coverts-100-Of-CO2-Into-Ethylene.html>.
 22. Ultra-Low CO₂ steelmaking. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/515960>.
 23. Birat J.-P., Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen Steelmaking, part 2: Competition with other zero-carbon steelmaking solutions geopolitical issues, *Materiaux & Techniques*. 2021. DOI: 10.1051/mattech/2021023.
 24. Hutson M.. The promise of carbon-neutral steel. *The New Yorker*, Sept. 18, 2021, URL: <https://www.newyorker.com/news/annals-of-a-warming-planet/the-promise-of-carbon-neutral-steel>.
 25. Kim J., Ahn Y., Roh T. Low-Carbon Management of POSCO in Circular Economy: Current Status and Limitations. *Towards a Circular Economy: Corporate Management and Policy Pathways. ERIA Research Project Report 2014-44*. Jakarta, Indonesia, 2016; pp. 185–199. URL: https://www.eria.org/RPR_FY2014_No.44_Chapter_11.pdf/.

26. He K., Wang L., Li X. Review of the Energy Consumption and Production Structure of China's Steel Industry: Current Situation and Future Development. *Metals*. 2020. 10. 302// <https://doi.org/10.3390/met10030302>.
27. Pedal to the metal: Iron and steel's US\$1.4 trillion shot at decarbonisation. URL: <https://www.woodmac.com/horizons/pedal-to-the-metal-iron-and-steels-one-point-four-trillion-usd-shot-at-decarbonisation/>.
28. Average EU steel plant would need a whopping 1.2GW of electrolyzers and 4.5 GW of solar to decarbonise/. URL: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-average-eu-steel-plant-would-need-a-whopping-1-2gw-of-electrolyzers-and-4-5gw-of-solar-to-decarbonise/2-1-1265531>.
29. M. Abdul Quadera, Shamsuddin Ahmed, S. Z. Dawal, Nukman Y. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 55, March 2016, Pages 537-549. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.101.
30. HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/hybrit/files/hybrit_brochure.pdf
31. ArcelorMittal. Hydrogen-Based Steelmaking to Begin in Hamburg. URL: <https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>.
32. Hydrogen Scaling Up. The Hydrogen Council. URL: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>.
33. Укргідроенерго має намір взяти участь у виробництві "зеленого" водню. URL: https://biz.ligazakon.net/ru/news/214443_ukrgidroenergo-namerena-uchastvovat-v-proizvodstve-zelenogo-vodoroda.
34. Некрасов З. И., Страшников И. В., Хомяков Э. С. Технологические и экономические аспекты применения коксового газа в доменном производстве СССР. *Металлургия чугуна*. М. : Metallurgy, 1973. № 1. С. 81-84.

References

1. PARIS AGREEMENT. UNITED NATIONS 2015. Available from: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_pari_s_agreement.pdf.
2. Іак Європа позбувається залежності від російських енергоресурсів. Available from: https://finance.ua/saving/jak-evropa-pozbuvaetsia-zalezhnosti-vid-rosijskyh-energoresursiv#headline_4.
3. Shared Vision, Common Action: A Stronger Europe. A Global Strategy for the European Union's Foreign And Security Policy. European External Action. Available from: https://eeas.europa.eu/archives/docs/top_stories/pdf/eugs_review_web.pdf.
4. European Climate Law. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC). Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119>.
5. EU Taxonomy: Commission presents Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonization. European Commission. Available from: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_711.
6. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic

- and social committee and the committee of the regions. Brussels, 8.7.2020. Available from: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.
7. IEA shrinks forecast for blue hydrogen production by almost half in wake of global gas crisis in net-zero scenario. Available from: <https://www.hydrogeninsight.com/production/iea-shrinks-forecast-for-blue-hydrogen-production-by-almost-half-in-wake-of-global-gas-crisis-in-net-zero-scenario/2-1-1342981>.
 8. Accelerating hydrogen deployment in the G7: Recommendations for the Hydrogen Action Pact. Available from: <https://www.irena.org/Publications/2022/Nov/Accelerating-hydrogen-deployment-in-the-G7>.
 9. Navigating the future of energy. Available from: <https://www.rystadenergy.com/>.
 10. European Hydrogen Bank will close '100% of the cost gap' between renewable and fossil hydrogen as soon as 2023, but shadow of US tax credit looms. Available from: <https://www.hydrogeninsight.com/policy/european-hydrogen-bank-will-close-100-of-the-cost-gap-between-renewable-and-fossil-hydrogen-as-soon-as-2023-but-shadow-of-us-tax-credit-looms/2-1-1341703>.
 11. REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition. Available from: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131.
 12. Germany connects 1 GW of wind, solar to the grid in Sept. Available from: <https://renewablesnow.com/news/germany-connects-1-gw-of-wind-solar-to-the-grid-in-sept-803003/>.
 13. EU unveils \$3bn cash pot to realise its hydrogen targets – and it wants projects to fund right now. Available from: <https://www.hydrogeninsight.com/industrial/eu-unveils-3bn-cash-pot-to-realise-its-hydrogen-targets-and-it-wants-projects-to-fund-right-now/2-1-1341502>.
 14. European steel and aluminium sectors call for cautious implementation of carbon import levy. Available from: <https://www.fastmarkets.com/insights/european-steel-and-aluminium-sectors-call-for-cautious-implementation-of-carbon-import-levy>.
 15. L. Holappa. A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry. *Metals*. 2020. 10(9), 1117. DOI: 10.3390/met10091117.
 16. GLOBAL STATUS OF CCS 2020- report of The Global CCS Institute, Available from: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf>.
 17. Birat J.-P., Antoine M., Dubs A. et al. Vers une siderurgie sans carbone? *Revue de metallurgie*. Vol. 90, No^o3 (Mars 1993), pp. 411–422. DOI: 10.1051/metal/199390030411.
 18. Trusted data to back-up your decisions. Available from: https://www.icis.com/explore/commodities/energy/hydrogen/?cmpid=PSC%7cENE R%7cCHLEG-2022-0824-EMEA-Hydrogen_PPC_Search%7cHydrogen&sfid=7014G00001uSskQAE&gclid=CjwKCAiA68ebBhB-EiwALVC-Nj2joIExQPnOcE31_sKGrYmdJo7zCJ_rAVd_mioJRY4qfBdlziO9nxCenUQAvD_BwE.
 19. J.-P. Birat. Steel and CO₂ – the ULCOS Program, CCS and Mineral Carbonation using Steelmaking Slag. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Jean-Pierre-Birat/publication/237496408_Steel_and_CO2_-_the_ULCOS_Program_CCS_and_Mineral_Carbonation_using_Steelmaking_Slag.pdf.
 20. Jan van der Stel. Development of ULCOS-Blast Furnace: Working-toward

- technology demonstration. Available from: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Iron%20and%20Steel%20%20Secured%20presentations/1050%20Jan%20van%20der%20Stel.pdf.
21. Carbon Recycling Breakthrough Converts 100% Of CO₂ Into Ethylene. Available from: <https://oilprice.com/Energy/Energy-General/Carbon-Recycling-Breakthrough-Coverts-100-Of-CO2-Into-Ethylene.html>.
 22. Ultra-Low CO₂ steelmaking. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/id/515960>.
 23. Birat J.-P., Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen Steelmaking, part 2: Competition with other zero-carbon steelmaking solutions geopolitical issues, *Materiaux & Techniques*, 2021. DOI: 10.1051/mattech/2021023.
 24. Hutson M.. The promise of carbon-neutral steel. *The New Yorker*, Sept. 18, 2021, Available from: <https://www.newyorker.com/news/annals-of-a-warming-planet/the-promise-of-carbon-neutral-steel>.
 25. Kim J., Ahn Y., Roh T. Low-Carbon Management of POSCO in Circular Economy: Current Status and Limitations. *Towards a Circular Economy: Corporate Management and Policy Pathways. ERIA Research Project Report 2014-44*. Jakarta, Indonesia, 2016; pp. 185–199. Available from: https://www.eria.org/RPR_FY2014_No.44_Chapter_11.pdf/.
 26. He K., Wang L., Li X. Review of the Energy Consumption and Production Structure of China's Steel Industry: Current Situation and Future Development. *Metals*. 2020. 10. 302. DOI: 10.3390/met10030302.
 27. Pedal to the metal: Iron and steel's US\$1.4 trillion shot at decarbonisation. Available from: <https://www.woodmac.com/horizons/pedal-to-the-metal-iron-and-steels-one-point-four-trillion-usd-shot-at-decarbonisation/>.
 28. Average EU steel plant would need a whopping 1.2GW of electrolyzers and 4.5GW of solar to decarbonise. Available from: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-average-eu-steel-plant-would-need-a-whopping-1-2gw-of-electrolyzers-and-4-5gw-of-solar-to-decarbonise/2-1-1265531>.
 29. M. Abdul Quadera, Shamsuddin Ahmed, S.Z.Dawal, Nukman Y. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 55, March 2016, pp 537-549. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.101.
 30. HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology). Available from: https://ssabwebsitcdn.azureedge.net/-/media/hybrit/files/hybrit_brochure.pdf.
 31. ArcelorMittal. Hydrogen-Based Steelmaking to Begin in Hamburg. Available from: <https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>.
 32. Hydrogen Scaling Up. The Hydrogen Council. Available from: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>.
 33. Ukrgridoenergo mae namir vzyati uchast' u virobnictvi "zelenogo" vodnyu. Available from: https://biz.ligazakon.net/ru/news/214443_ukrgidroenergo-namerena-uchastvovat-v-proizvodstve-zelenogo-vodoroda.
 34. Nekrasov Z. I., Strashnikov I. V., Homyakov E. S. Tekhnologicheskie i ekonomicheskie aspekty primeneniya koksovogo gaza v domennom proizvodstve CCCP. *Metallurgiya chuguna*. Moskva: Metallurgiya, 1973. No 1. P. 81-84.

O. I. Babachenko, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7501-4173

O. S. Nesterov, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0183-0327

L. I. Garmash, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6873-6685

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

DECARBONIZATION AND THE ENERGY CRISIS

Summary. The purpose of the study is to identify new directions for reducing the share of fossil fuels in the energy balance of industrial production for the possibility of overcoming the energy crisis. Humanity has been living in conditions of an unprecedented energy crisis for the past few years. First, the coronavirus pandemic, then the sharp rise in energy prices and the war in Ukraine unleashed by Russia exacerbated energy consumption problems and increased the need for wider development of alternative energy sources and the latest industrial technologies. In the crisis conditions of 2022 the European Union not only maintained the course for decarbonization, but also accelerates the transformation of the economy and industry, because this contributes to energy independence and security. Two way strategies are being developed in the energy sector - diversification through the distribution and balance of energy sources, which guarantee the security of the entire energy system, and decarbonization as a course to gradually abandon traditional energy sources (natural gas, oil, coal, peat), reducing carbon dioxide emissions and transition to renewable sources (solar radiation, wind, sea tides, biomass). Environmentally friendly hydrogen is considered one of the key components of the future energy system. The main directions of the European Strategy in the field of hydrogen are analyzed, and a number of fundamental documents of the EU energy policy adopted in 2022 are presented. Today, ferrous metallurgy is one of the largest sources of emissions, so the task of changing the course to production with a low level of emissions and a carbon-neutral sector is for it one of the most relevant. The potential of hydrogen as a fuel and reducing agent has been known for a long time, but now its role in decarbonization at all stages of metallurgical production is becoming more and more significant. Several large research programs on hydrogen production and reduction of iron oxides have been launched in the world. Based on the deep modernization of production capacities and energy systems, as well as the introduction of new innovative methods, the amount of current annual emissions during steel production can be reduced by 15-20%. Further reductions to ~1.0 t CO₂/t steel are possible with new technologies such as blast furnace gas recirculation, oxygen blast furnace, maximum replacement of coke with biomass and by replacing carbon with hydrogen in reductants and fuels such as natural gas and coke gas. The energy crisis can become a "window of opportunity", developing new directions for reducing the share of fossil fuels in the energy balance.

Key words: decarbonization, energy crisis, hydrogen, low-carbon technologies, renewable energy sources.

For citation: Babachenko O. I., Nesterov O. S., Garmash L. I. Dekarbonizatsiia ta enerhetychna kryza [Decarbonization and the energy crisis]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 35-48. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-35-48.

*Стаття надійшла до редакції збірника 20.10.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*