

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

НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Анотація. Метою роботи є проведення аналізу використання технологій декарбонізації доменної плавки. В рамках активної «зеленої» кампанії за зниження енергоємності та зменшення шкідливих викидів останніми роками дедалі активніше ведуться роботи у напрямку декарбонізації металургійних процесів. Металургію майбутнього все частіше називають водневою. У статті представлено аналіз основних перспективних напрямів переходу світової чорної металурги до безвідходних та екологічно чистих технологій, вуглецевої нейтральності та максимального скорочення викидів парникових газів. Проаналізовано переваги та проблеми «зеленого» виробництва сталі. Наведено огляд пілотних проектів щодо переходу на безвуглецеве виробництво сталі на найбільших світових металургійних комбінатах за рахунок використання водню замість викопного палива. Проаналізовано переваги та проблеми використання «сірого», «зеленого» та «блакитного» «вуглецево-нейтрального» водню. В історичному контексті показано як поглиблювалися та уточнювалися уявлення про роль водню як відновника у доменному процесі відповідно до змін у технології доменної плавки та внесок вчених ІЧМ у ці дослідження. Наведено основні напрямки сучасних розробок у галузі декарбонізації металургійних процесів. В даний час найперспективнішими вважаються 2 напрямки отримання «зеленої сталі» - закачування водню у доменну піч і процес прямого відновлення заліза з використанням водню замість викопного палива. Дослідження щодо визначення фізико-хімічних закономірностей процесів відновлення у доменній печі за участю водню продовжуються в ІЧМ і в даний час. Наведено результати лабораторних досліджень впливу відновлювального газу зі змінним вмістом водню на характер відновлення агломерату та окатишів у «сухий» зоні доменної печі.

Ключові слова: декарбонізація металургії, низьковуглецеві технології, доменна піч, «зелений» водень, відновлювальні процеси, доменний газ, колошниковий газ, коксовий газ.

Посилання для цитування: Бабаченко О. І., Нестеров О. С., Гармаш Л. І. Низьковуглецеві технології у доменному виробництві. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 34-54. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-34-54

Сучасний стан проблеми. Сучасна чорна металургія, як і раніше, потребує величезних витрат енергоресурсів і є одним з головних джерел

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Выпуск 35
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35*

забруднення повітря та парникового ефекту, її підприємства споживають близько 8% світового обсягу енергії та виробляють ~7% викидів шкідливих газів [1]. У чорній металургії в основному виділяються два парникових гази: метан CH_4 і діоксид вуглецю CO_2 , які утворюються у всіх технологічних процесах при спалюванні палива, вигорянні вуглецю з напівфабрикатів, розкладанні складових флюсів. Інтенсивність викидів CO_2 у металургійній промисловості залежить від маршруту виробництва та, за різними оцінками, коливається від 466 до 2150 кг CO_2 на тонну сирової сталі [2].

До 2050 року у сфері чорної металургії передбачається скоротити викиди вуглекислого газу на 80-95% (проти 1990 року) [3]. Основну роль будуть відігравати підвищення матеріалоефективності, продуктивності та уловлювання викидів (40%, 21% та 16% відповідно) [4]. Причому, якщо до 2030 р. 90% річного скорочення викидів забезпечить переважно поліпшення технологічних показників та ефективності використання матеріалів, то у більш довгостроковій перспективі основна роль відводиться інноваційним технологіям, які будуть представлені в основному технологіями уловлювання, використання та зберігання вуглецю (CCUS) та водневими технологіями [5].

Метою роботи є проведення аналізу використання технологій декарбонізації доменної плавки.

Воднева стратегія ЄС (EU Hydrogen Strategy), яка передбачає широке використання водню як енергоносія та має на меті доведення до нуля викидів вуглекислого газу промисловими об'єктами, транспортом, енергетикою та будівництвом була представлена влітку 2020 року [6].

У європейських країнах вже активно готуються до водневого буму. В Німеччині споруджується найбільша у світі установка з виробництва водню методом електролізу та розпочато експеримент із часткового заміщення природного газу воднем в опаленні житла. Замінити метан на водень у газопровідній мережі збираються у Великій Британії. В Нідерландах та Бельгії створюється система заправок водневим паливом. В Австрії готують одразу кілька пілотних проектів щодо використання водню замість вугілля під час виробництва сталі. У країнах Північно-Західної Європи основним напрямом декарбонізації буде використання потенціалу відновлюваних джерел енергії у Північному морі – перетворення морської вітрової електроенергії на водень.

Прогнозується, що вже до 2030 р. попит на водень може зрости на третину за рахунок нових промислових застосувань, значна частина з яких припаде на чорну металургію [7]. На найбільших світових меткомбінатах вже розпочато будівництво пілотних установок.

Однією з перших компаній, яка закачала в доменну піч водень як додатковий відновник та для заміни вугільного пилу, стала Thyssenkrupp

Steel. Успішно було проведено перший етап водневих випробувань на одній із фурм ДП № 9 у Дуйсбурзі в лютому 2021 р. [8]. На другому етапі, який планують розпочати у 2022 році, передбачається поширити цей метод на усі 28 фурм доменної печі. Однак під час реалізації проєкту компанія зіштовхнулася з низкою серйозних проблем. Крім пандемії є і суто технічні труднощі – для однієї фурми водень доставлявся вантажівкою, але для 28 потрібен трубопровід.

Компанія Salzgitter в березні 2021 року ввела в дію першу в німецькій металургійній промисловості установку з отримання «зеленого» водню, який планується використовувати як альтернативу коксу в доменних печах [9].

Австрійська Voestalpine запатентувала технологію «зеленого» виробництва сталі, яка передбачає використання водню та біогазу замість вихопного палива в процесі прямого відновлення заліза [10]. За рахунок цього передбачається до 2030 скоротити викиди на 30%, а до 2050 - перейти на безвуглецеве виробництво сталі.

До 2050 року вуглецевої нейтральності та максимального скорочення викидів парникових газів за рахунок переходу від доменного виробництва до процесів металізації та використання в них «чистого» вуглецево-нейтрального водню планує досягти Міжнародний холдинг «Металоінвест» [11]. Планується три етапи:

2019-2025 рр. – завершення планової модернізації, скорочення прямих та непрямих викидів парникових газів на 1,8%, непрямих неенергетичних викидів на 25%.

2026-2036 рр. – перехід на низьковуглецеве виробництво заліза прямого відновлення, оптимізація процесів виробництва коксу, агломерату та чавуну. Використання чистого «блакитного», «жовтого» та «зеленого» водню. Зменшення прямих викидів парникових газів на 15%.

2037-2050 рр. – досягнення вуглецевої нейтральності за рахунок завершення переходу на чистий водень в основному технологічному процесі та підвищення енергоефективності інших процесів.

Британська металургійна компанія Liberty Steel розробила проєкт будівництва заводу з випуску відновленого заліза на 2 млн.т на рік у Дюнкерку. Передбачається, що спочатку відновлення заліза відбуватиметься із використанням суміші природного газу та водню з перспективою переходу на чистий водень.

Комбінат ArcelorMittal у Гамбурзі планує освоїти випуск вуглецево-нейтральної сталі за допомогою «зеленого» водню та скоротити витрати на купівлю дозволів на викиди вуглекислого газу [12].

Шведські компанії SSAB, LKAB та Vattenfall, які беруть участь у проєкті HYBRIT з виробництва відновленого заліза з використанням водню замість природного газу, планують будувати завод у Єлліварі [13].

Нове підприємство буде поєднане з фабрикою окомкування. Запуск підприємства у пілотному режимі запланований на 2026 р. Спочатку його продуктивність становитиме 1,3 млн. т на рік, а до 2030 року збільшиться до 2,7 млн. т на рік. Компанія SSAB має намір завершити переведення своїх заводів у Швеції на виробництво «безвуглецевої» сталі до 2026 року.

Fortescue Metals Group, яка займається видобутком залізняку, планує розпочати будівництво першого в Австралії експериментального заводу з виробництва «зеленої» сталі в 2021 році.

У доменному виробництві Індії реалізуються інноваційні концепції доменних печей, а печі, що існують, модернізуються з урахуванням низьковуглецевих технологій. До 2050 року їхня частка зросте до ~ 7% виробництва сталі із залізної руди, а частка технології прямого відновлення заліза на основі водню зросте до ~ 22%.

Найбільші металургійні підприємства Латинської Америки нині розробляють довгострокові стратегії переходу до «низьковуглецевого водню» [14].

Одним із наймасштабніших проєктів є намір Японії скоротити викиди парникових газів до 2030 року як мінімум на 46% і досягти нульового рівня до 2050 року [15]. Nippon Steel у середньостроковій перспективі планує вжити заходів щодо декарбонізації виробництва та інвестувати у будівництво великих електродугових печей.

Уряди багатьох країн розробляють пакети заходів, що стимулюють металургійні підприємства переходити на безвуглецеві технології виробництва – електрометалургію та водень. У рамках міжнародного співробітництва у спільних програмах ЄС Міненерго України також розробляє положення Водневої стратегії України [16]. Передбачається, що на екологічну модернізацію протягом 10 років буде витрачено щонайменше \$3 млрд.грн. Вуглецемісткість української металургійної продукції на 15-60% вища за європейську, тому в рамках European Green Deal передбачається до 2050 р. знизити шкідливі викиди в агломераційному виробництві до 25%, у доменному до 40%, у конвертерному до 25% [17].

Процес переходу чорної металургії до безвідходних та екологічно чистих технологій – тривалий, складний і вимагає вкладення величезних коштів та праці. Чорна металургія – одна з галузей, що найбільш повно використовують відходи у виробництві («повернення» в агломераційному виробництві, продукти пилоочищення доменних, сталеплавильних та електросталеплавильних печей, фізичне та хімічне тепло відхідних газів тощо), проте значно заощадити енергію і знизити викиди процесів агломерації, окомкування та ін. неможливо без технологічних інновацій, основними напрямками яких є [18]:

- модернізація агломераційного виробництва;
- використання коксового газу в доменному виробництві;

- збільшення використання брухту у конвертерному виробництві;
- регенерація тепла вихідних газів на всіх етапах виробництва;
- оптимізація процесів нагріву;
- попереднє нагрівання брухту;
- використання ефективних систем очищення газів;
- утилізація шлаків.

Окрім заходів щодо економії ресурсів, раціональне природокористування включає і природоохоронні. Оскільки значна частка енерговитрат у металургії припадає на вугілля, декарбонізація та низьковуглецеві технології вже не є питанням вибору. За даними Міжнародної енергетичної агенції, використання вугілля – одна з найбільших причин викидів парникових газів. На кліматичній конференції COP26 у Глазго понад 40 країн, у тому числі й Україна, погодилися поступово відмовитися від використання викопного вугілля [19].

Заходи щодо декарбонізації у чорній металургії умовно можна розділити на дві категорії. Перша – модернізація існуючих заводів, яка принципово не змінює спосіб виробництва сталі (електрифікація, уловлювання допалювання, покращена сорбція води та газу). Друга – реалізація інноваційних водневих технологій, проте, на думку деяких фахівців, промислове виробництво «зеленої» сталі з використанням водню може розпочатися не раніше ніж через 25-30 років [20].

Оскільки в доменному виробництві вугілля, як і раніше, залишається одним з головних енергоносіїв і реагентів, глибока декарбонізація можлива тільки при його заміні на менш вуглецевмісні альтернативи, такі як природний газ, біоресурси або водень. Підвищення ефективності доменної плавки можна досягти за рахунок:

- 1) оптимізації властивостей залізовмісної сировини шляхом максимізації вмісту в ньому заліза для зменшення використання вугілля як відновника;
- 2) збільшення використання вуглецевмісних палив шляхом ддування ПВП, природного газу, пластмас, біомаси або водню;
- 3) використання коксового газу як джерела енергії.

Оскільки водень у доменній печі, на відміну від вуглецю, реагує з утворенням не шкідливого CO_2 , а води, розробка водневої технології – важливий крок у переході до виробництва сталі, що не впливає на клімат. Водень можна розглядати як ефективний універсальний енергоносіє, тому що він має високу теплоту згоряння (приблизно в 3 рази більше, ніж вуглеводневі горючі). Однак воднева технологія має і негативні моменти. Водень умовно поділяють на «сірий» (з вугілля, нафти та газу), «блакитний» (ТЕС чи АЕС) та «зелений» (з води). Сьогодні лише 1% водню вважається по-справжньому «зеленим», а виробництво 99% «сірого» та

«блакитного», на думку вчених, дає більший вклад у парниковий ефект, ніж пряме спалювання газу, нафти та вугілля [21].

«Сірий» водень створює масу парникових викидів у вигляді вуглекислого газу, оскільки майже половину його світового обсягу одержують із природного газу (метану). На заміну «сірому» водню почали просувати «блакитний», при створенні якого CO_2 уловлюють, а не викидають в атмосферу. Проте насправді «блакитний» водень створює лише на 9-12% менше викидів CO_2 , ніж «сірий». Більше того, виробництво обох видів водню вивільняє в атмосферу масу метану, чия здатність створювати парниковий ефект у десятки разів вища, ніж у CO_2 . Загалом виробництво «блакитного» водню на 20% «брудніше» спалювання газу та вугілля та на 60% спалювання дизельного палива. І це в ідеальному варіанті, коли вважається, що «впійманий» CO_2 може зберігатися сотні років з абсолютною надійністю.

Однак металургію майбутнього все частіше називають водневою. Хоча в даний час водень коштує дорого, а його отримання, зберігання і транспортування ускладнюється безліччю суто технічних проблем. Проте з'являється все більше розробок, що дозволяють отримувати водень з низькою собівартістю. Воднева металургія стає все більш реальною та економічно обгрунтованою.

За прогнозами Bloomberg New Energy Finance (BNEF) вже до 2030 року «зелений» водень за ціною $\sim \$2/\text{кг}$ почне конкурувати з вугіллям і природним газом як енергоносіє при виробництві сталі. А до 2050 року за ціною $\$1/\text{кг}$ водень стане вигіднішим за газ і зможе конкурувати з найдешевшим вугіллям за нульової емісії CO_2 . За рахунок водню відбудеться своєрідна остаточна електрифікація світової промисловості [22]. За менш оптимістичними прогнозами міжнародного агентства відновлюваної енергетики IRENA, до 2025 року водень коштуватиме $\$4\text{-}6/\text{кг}$, а в 2040 $\$2/\text{кг}$ [23].

В рамках активної «зеленої» кампанії за зниження «вуглецевого впливу» в останні роки все більш активно ведуться розробки в галузі декарбонізації металургійних процесів. За прогнозами, світове споживання вугілля для виробництва чавуну до 2030 року має скоротитися на 8%, а до 2050 року майже на 30%. Цьому сприятиме перехід до процесів відновлення заліза газоподібним воднем із застосуванням нестандартних та інноваційних підходів щодо вирішення проблеми високої розчинності водню в металі.

Швидкість «зеленого» переходу безпосередньо залежатиме від технологій, що дозволяють здешевити отримання «чистої» енергії з водню. В даний час найбільш перспективними вважаються 2 напрямки отримання «зеленої сталі» - використання водню в доменній печі в процесах прямого відновлення заліза замість викопного палива:

1. Водень використовується як альтернативний інжекційний матеріал для вдування вугільного пилу з метою покращення експлуатаційних характеристик звичайних доменних печей. Однак, хоча вдування водню в ДП може зменшити викиди вуглецю до 20%, це не забезпечує вуглецево-нейтральній сталі, оскільки коксівне вугілля, як і раніше, залишається необхідним відновником в доменному процесі.

2. Водень застосовується як альтернативний відновник для отримання заліза прямого відновлення, яке потім переробляється в сталь електродугових печах. Водень поряд з окисом вуглецю або їх суміш у будь-якому співвідношенні можна використовувати в доменній печі як газ-відновник у процесах відновлення оксидів заліза до металевого заліза [24-25].

Основні результати наукових досліджень. Уявлення про роль водню як відновника в доменному процесі поглиблювалися та уточнювалися відповідно до змін у технології доменної плавки. До середини ХХ століття, при невеликих концентраціях водневмісних компонентів в газах доменної печі, вважалося, що водень практично не витрачається на відновлення оксидів і цілком у неокисленому вигляді переходить у колошниковий газ [26]. В подальшому було виявлено, що при подачі в горн доменної печі окису вуглецю в суміші з воднем можна істотно зменшити витрати коксу, оскільки такий газ сприяє зростанню непрямого відновлення заліза та зменшенню потреби печі в теплі, а отже, і в коксі [27].

При переході доменної плавки на комбіноване дуття було показано, що часткове окислення водню необхідно враховувати при складанні загального теплового та матеріального балансу доменної плавки [28]. Введення в горн печі значних кількостей водневмісних палив супроводжувалося зниженням ступеня прямого відновлення оксидів заліза та витрат коксу [29]. У багатьох випадках головну роль у цьому приписували кінетичним перевагам водню в порівнянні з окисом вуглецю при відновленні оксидів заліза. Порівняльне вивчення кінетики відновлення офлюсованого агломерату в залежності від його основності воднем, окисом вуглецю і сумішами доменного газу з різним вмістом H_2 показало, що швидкість проникнення H_2 у внутрішні об'єми шматочка відновлюваного матеріалу буде більшою, ніж швидкість проникнення CO у 3,7 разу. Для газоподібних продуктів H_2O та CO_2 це співвідношення склало 1,56 [30].

Фундаментальні дослідження фізико-хімічної природи процесів відновлення у доменній печі за участю водню дозволили сформулювати загальні закономірності зміни складу газу та перебігу відновлювальних процесів за висотою доменної печі [31]. У нижніх її шарах у міру накопичення в газі CO_2 та H_2O склад суміші швидко досягає рівноважного щодо реакції водяного газу. Далі по ходу газу до верхньої частини області

уповільненого теплообміну відновлення протікає при збереженні рівноваги цієї реакції. При цьому CO і H_2 одночасно беруть участь у відновленні та мають однаковий відновлювальний потенціал. Ступінь використання водню досягає тут максимуму, після чого знижується. Кінцевий ступінь використання водню визначається інтенсивністю розвитку цієї реакції на верхньому рівні теплообміну.

Газифікація вуглецю водяною парою протікає інтенсивніше газифікації вуглекислим газом. Однак у горні доменної печі CO_2 зникає ближче до фурм, ніж H_2O . Відновлювальні компоненти CO та H_2 гальмують процеси газифікації, особливо при температурах нижче 1100°C . При взаємодії H_2O з вуглецем у присутності CO процес ускладнюється реакцією водяного газу, яка при температурі нижче 1100°C протікає швидше процесів газифікації. З підвищенням температури в міру зменшення ступеня перетворення H_2O реакції водяного газу гальмуючий вплив водню слабшає і добавки водню можуть навіть прискорювати газифікацію. Температурні межі між областями непрямого, змішаного та прямого відновлення визначаються співвідношенням швидкостей відновлення оксидів воднем та CO та швидкості газифікації вуглецю водяною парою та CO_2 .

Якщо відновлення оксидів заліза здійснюється воднем у суміші з продуктом відновлення H_2O , максимально допустимий вміст водяної пари в відновлювальному газі має становити $\sim 20\%$ при температурі 773 K та $\sim 40\%$ при температурі 1273 K . Якщо ж відновлення здійснювати сумішшю $\text{CO}+\text{CO}_2$, то при цих температурах максимальний вміст CO_2 не має перевищувати 50% і 25% відповідно. Вище температури 1073 K водень є активнішим відновником ніж оксид вуглецю, тобто оптимальне співвідношення $\text{CO}:\text{H}_2$ залежить від температури та визначається рівноважними умовами реакцій відновлення оксидів Fe при відповідній температурі [32].

Граничний ступінь використання водню при відновленні Fe з Fe_3O_4 при температурах 1400 , 1500 і 1600°C становить відповідно $65,5$, $66,5$ і $67,5\%$, а при відновленні Fe_2O_3 – 74 , 75 і 76% [33].

Оксид вуглецю та водень, які, на відміну від реакцій відновлення вуглецем твердого коксу оксидів заліза, виконують роль газоподібних відновників, утворюються при взаємодії CO_2 та H_2O з розпеченим коксом у потоці повітряного дуття та в результаті конверсії різних вуглеводневих добавок. Кінцевим продуктом скрізь є залізо, вода та вуглекислий газ, причому воду можна знову використовувати для отримання водню та кисню, що дозволяє здійснити замкнутий цикл відновлення заліза воднем та створити безвідходне виробництво.

На відміну від вуглеводневих палив, відновлювальні гази, що складаються практично повністю з термічно стійких CO і H_2 , можна подавати в доменну піч у високонагрітому стані та в кількостях, що

дозволяють знизити питому витрату коксу до мінімально допустимого рівня. Завдання полягає в тому, щоб енергоємний процес конверсії вуглеводнів CO_2 та H_2O з отриманням газоподібних відновників CO та H_2 винести за межі доменної печі та подавати їх у піч вже у готовому та нагрітому вигляді.

У природі немає промислових запасів газів, які можна було б без переробки використовувати у доменному процесі як відновники. На практиці для цих цілей найчастіше використовують природний та коксовий газ. Вдування значних обсягів ПГ призводить до збільшення частки водню в газах доменних печей і, як наслідок, суттєво змінює технологію доменної плавки. На підставі аналізу показників роботи печей ПАТ ММК та ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» було оцінено вплив водню природного газу на зміну теплового та відновлювального процесів за радіусом доменної печі [34]. Встановлено, що відновлювальна робота водню за радіусом печі відбувається нерівномірно, знижуючись від периферії до осьової зони доменної печі. При збільшенні витрати ПГ слід збільшити рудне навантаження на периферії біля стін з урахуванням роботи водню по радіусу печі, що дозволить збільшити рівень використання водню та знизити витрату коксу.

Промислова перевірка технології доменної плавки на атмосферному дутті та високонагрітих відновлювальних газах в умовах комбінату «Азовсталь» показала, що при заміні сирого природного газу високонагрітими продуктами його парової конверсії можливе зниження питомої витрати коксу на виплавку чавуну та підвищення продуктивності печі [35-36].

Низькокалорійний доменний (колошниковий) газ, що утворюється в результаті згоряння коксу та здійснення відновлювальних процесів, містить близько 30-35% горючих складових та велику кількість баласту (азот та вуглекислота), тому використання його у високотемпературних печах утруднене, а передача на значні відстані економічно не вигідна. Для інтенсифікації процесу розроблено безліч заходів, що покращують його властивості – підвищення тиску, температури та вологості доменного дуття, збагачення дуття киснем, вдування в горн природного газу, мазуту тощо. В результаті сукупної дії цих факторів у складі доменного газу підвищується вміст водню з одночасним зменшенням CO , внаслідок чого теплота його згоряння змінюється незначно і становить близько 3500-4000 кДж/м³, а вихід доменного газу знижується з 3800-4000 до 2000-2500 м³/т чавуну.

Вперше промислові випробування технології вдування водню в доменну піч (понад 50% H_2 у коксовому газі) в умовах роботи печі на комбінованому дутті було проведено на доменній печі заводу «Запоріжсталь» у 1966 р. за участю вчених ІЧМ під керівництвом академіка

З.І. Некрасова. Максимальна ефективність нової технології була досягнута при вдуванні суміші коксового та природного газів у співвідношенні 80,2 : 31,7 м³/т чавуну. При цьому продуктивність ДП зросла на 3,4%, питома витрата коксу знизилася на 1,2%, витрата природного газу на 40 м³/т, тобто коефіцієнт заміни склав 2,0 м³/м³ [37].

Більш інтенсивний та економічний (порівняно з роботою тільки на природному газі) хід печі при вдуванні коксового газу пояснюється поліпшенням розподілу газового потоку по перерізу печі за рахунок більш повного (за наявності вільного водню) перебігу процесів горіння в повітряній фурмі та фурменому вогнищі, що призводить до збільшення обсягу відновлювальних газів, а отже, і розмірів циркуляційної зони, а це, у свою чергу, зумовлює більш плавний схід шихтових матеріалів. Також схід шихтових матеріалів полегшується завдяки підвищенню вмісту в горнових газах водню, що має меншу щільність. В результаті спостерігається зниження або збереження перепаду тиску горн - колошник, незважаючи на збільшення виходу горнових газів. Збільшенню інтенсивності спалювання коксу при вдуванні коксового газу сприяє вивільнення частини кисню дуття внаслідок скорочення приходу в горн вуглецю газів, що вдуваються.

Більш рівний хід печі при вдуванні коксового газу дозволив, з одного боку, підвищити витрати повітряного дуття, отже, і інтенсивність плавки, а з іншого боку – збільшити кількість відновлювальних газів, тобто знизити ступінь прямого відновлення. Як показали розрахунки, за рахунок підігріву коксового газу до температури 700-800°С, при якій ще не відбувається розкладання метану, що міститься в ньому, може бути отриманий додатковий ефект - продуктивність печі зростає, а питома витрата коксу знижується на 40-45 кг/т чавуну [38]. Однак розроблені для цієї мети газопідігрівачі коксового газу не отримали промислового впровадження, оскільки їх конструкція та розміри виявилися принципово мало чим відрізняючимися від конверторів періодичної дії з керамічною насадкою, а технологічне навантаження (тільки нагрівання) - досить обмеженим. У результаті було доведено, що головна перевага коксового газу лежить на шляху його використання не як паливо, а як відновлювального газу. При цьому вуглеводні, що містяться в ньому, будуть не баластом, а джерелом отримання нових додаткових кількостей активних відновників СО і Н₂.

При попаданні метану (основного компонента природного газу) в нагрітий струмінь дуття ще в порожнині фурми йде поступове відокремлення від нього атомів водню [39]. Частина водню концентрується в периферійній зоні біля стін (явище «вивіювання»), що посилює неоднорідність складу та властивостей фурменого газу за перерізом горна. Частина вуглеводнів природного газу піддається термічній дисоціації з

утворенням радикалів і сажистого вуглецю, що, крім погіршення складу горнового газу, негативно впливає на проникність шлаку внаслідок утворення на ньому сажистих плівок [40].

Як показали експерименти, потрапляння природного газу або продуктів його розкладання в шар нагрітого коксу різко посилює його реакційні властивості, зумовлює втрату поверхневої міцності шматків та утворення вуглецевого сміття [41]. Останній, поряд із сажистим вуглицем, що виділяється при термічному розкладанні вуглеводнів природного газу, згущує шлак, знижує його плинність і викликає розлад ходу печі. Внаслідок цього збільшення витрати природного газу вище за рівень $100 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну призводить до помітного зменшення коефіцієнта заміни коксу газом і до погіршення ефективності його використання.

Надалі при реалізації технології вдування коксового газу в доменні печі на Макіївському металургійному комбінаті в 1986-1987 рр. було досягнуто результату стабільного введення в доменну піч 300 м^3 газу на тонну чавуну, в окремих добах витрата доходила до $350 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну. При цьому вміст водню в коксовому газі змінювалося на 52-54%. За рахунок підвищення ступеня використання CO на 0,9% та водню на 4% було отримано економію коксу $6,1 \text{ кг}/\text{т}$ чавуну [42]. Пізніші дослідження показали, що коксовий газ може застосовуватися і як відновлювальний газ для отримання заліза прямого відновлення, і як газоподібне паливо для сталеливарного заводу [43]. Однак наявність у ньому коксу знижує швидкість відновлювального процесу, а наявність сірчистих сполук та сажі небажана. Непрямий несприятливий вплив на процес відновлення надають азот та метан – азот знижує швидкість відновлення, вміст метану більше 5% призводить до його розщеплення з поглинанням тепла та неконтрольованого утворення відкладень вуглецю, що особливо шкідливо для шахтних печей.

Великий внесок у вивчення закономірностей відновлювальних процесів у доменній печі при використанні в них водню зробили вчені ІЧМ як у галузі теоретичних пошуків, так і при проведенні дослідно-промислових випробувань на найбільших доменних печах СРСР. Аналіз кінетики взаємодії оксидів заліза з метаном за допомогою хроматографічного аналізу дозволив визначити закономірності процесу відновлення заліза та поведінки CH_2O , CO_2 , H_2O , CO та H_2 у різних температурних зонах ДП [44]. При попаданні метану в нагрітий струмінь дуття ще в порожнині фурми йде поступове відокремлення від нього атомів водню [45]. Послідовне відділення водню від молекул метану та інших молекул вуглеводнів зі складу природного газу призводить до утворення дуже активних радикалів, здатних до полімеризації [46].

У газах кисневої частини окислювальної зони виявили високу концентрацію парів води, причому максимум вмісту H_2O був розташований до фурм ближче, ніж максимум вмісту CO_2 . Однак при

подальшій взаємодії з вуглецем водяна пара зникає значно далі від фурм, ніж вуглекислий газ [47]. Результати аналізу складу газу та температури на різних горизонтах печі дозволили визначити закономірності відновлювальних та теплообмінних процесів при застосуванні високозбагаченого киснем дуття спільно з природним газом [48].

На основі досліджень у галузі малококсової та безкоксової доменної плавки розроблено комплекс технологій заміщення коксу та природного газу іншими енергоносіями, в т.ч. коксовим газом, який дозволив розширити використання паливних добавок і відповідно зменшити витрату коксу [49]. Комплексні дослідження закономірностей поведінки водню в доменному виробництві та його впливу на перебіг відновлювальних процесів, проведені в ІЧМ раніше, є базою та науковою основою НДР, які проводяться в Інституті на даний час з урахуванням сучасних наукових та практичних досягнень.

Аналіз результатів лабораторних досліджень впливу відновлювального газу зі змінним вмістом водню на характер відновлення агломерату та окатишів у «сухий» зоні доменної печі (Т 950°C) показав, що введення до складу відновлювального газу 5% водню при рівні CO=30% у середньому збільшує відновлення залізородного матеріалу на 25-30%. При цьому вміст Fe металевого в окатишах при високому вмісті водню в відновлювальному газі вище, ніж в агломераті в середньому на 15-20%. Об'єктом досліджень були промислові частково офлюсовані окатиші та лабораторний магнезійний агломерат, хімічний склад яких представлений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад залізородної сировини.

Матеріал	Хімічний склад, %						Осн., од.
	Fe _{заг.}	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	
агломерат	50,64	11,2	9,3	14,23		2,8	1,53
окатиші	62,8	1,2	7,65	0,8	0,8	0,6	неофл.

За умовами експерименту в реактор завантажували шар агломерату або окатишів масою 150 г фракцією 8-16 мм і нагрівали в струмі аргону до температури 950°C. При температурі 950°C інертний газ перемикали на відновлювальний різного складу зі швидкістю 3л/хв і витримували протягом 60 хвилин, після чого зразок охолоджували в струмі аргону і визначали втрату маси зразка і вміст в ньому Fe_{мет.}, FeO і Fe_{заг.} На другій стадії експерименту відновлювальні матеріали проплавляли за методикою ІЧМ в плавильній печі, де визначалися температури повної втрати газопроникності шару, початку та максимальної фільтрації рідких фаз, а також маса первинного шлаку та вміст FeO.

Таблиця 2 – Серія відновлень суміщами газів.

Окатиші									
Склад газу	Виграти, л/мин	Впрага маси, г	R, %	Fe мет, %	Температура, °С			Масса п.ш.	FeO п.ш.
					Тпг	Тнф	Тмф		
0% H ₂ + 33% CO + 67% N ₂	2	11,0	27,6	5,5	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
0% H ₂ + 33% CO + 67% N ₂	4	11,0	27,6	5,4	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
0% H ₂ + 33% CO + 67% N ₂	3	11,2	26,7	5,5	1280	1320	1430	28,4	36,7
5% H ₂ + 30% CO + 65% N ₂	3	13,6	33,8	4,9	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
10% H ₂ + 30% CO + 60% N ₂	3	13,8	34,3	11,5	1290	1330	1440	26,8	35,4
15% H ₂ + 30% CO + 55% N ₂	3	14,0	34,8	12,8	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
20% H ₂ + 30% CO + 50% N ₂	3	18,0	44,5	20,5	1320	1380	1420	24,2	37,2
33% H ₂ + 0% CO + 67% N ₂	3	18,6	45,6	23,8	1290	1360	1450	23,8	38,2
Агломерат									
Склад газу	Виграти, л/мин	Впрага маси, г	R, %	Fe мет, %	Температура, °С			Масса п.ш.	FeO п.ш.
					Тпг	Тнф	Тмф		
0% H ₂ + 33% CO + 67% N ₂	2	9,0	27,9	7,0	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
0% H ₂ + 33% CO + 67% N ₂	4	11,6	34,8	10,0	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
0% H ₂ + 33% CO + 67% N ₂	3	10,2	31,0	5,1	1320	1430	1510	11,6	9,2
5% H ₂ + 30% CO + 65% N ₂	3	12,2	36,4	8,7	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
10% H ₂ + 30% CO + 60% N ₂	3	12,8	37,9	11,4	1320	1440	1480	12,8	8,8
15% H ₂ + 30% CO + 55% N ₂	3	15,4	44,8	10,6	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д	Н.д
20% H ₂ + 30% CO + 50% N ₂	3	14,8	38,5	11,2	1315	1470	1490	9,8	7,2
33% H ₂ + 0% CO + 67% N ₂	3	13,8	40,4	15,4	1290	1480	1500	10,2	7,6

Результати випробувань представлені в таблиці 2. Як бачимо, з підвищенням концентрації водню показник відновлюваності збільшується на 2,5-3% на кожні 5% водню у складі відновлювального газу. Вміст Fe металевого в окатишах після обробки відновлювальним газом з високим вмістом водню вище, ніж в агломераті, в середньому на 15-20% (відн.).

У всіх випадках у разі збільшення вмісту водню в відновлювальному газі температури початку повної втрати газопроникності шару та початку фільтрації рідких фаз зростають, при цьому маса первинного шлаку та вміст FeO у ньому скорочуються.

Висновок

Результати проведених досліджень показують, що, оскільки водень суттєво впливає на перебіг відновлювальних процесів, подальше поглиблене вивчення закономірностей його поведінки в доменній печі є необхідною науковою основою для розробки нових технологій, що сприяють зниженню витрати палив вуглецю та зменшенню викидів CO₂.

Перелік посилань

1. Дорожня карта технологій чорної металургії. *International Energy Agency* : веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
2. Ali Hasanbeigi, Marlene Arens, Jose Carlos Rojas Cardenas, Lynn Price, Ryan Trioloa. Comparison of Carbon Dioxide Emissions Intensity of Steel Production in China, Germany, Mexico, and the United States. *Resources, Conservation and Recycling*. 2016. Volume 113. 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.008>
3. Йопп К. Реалистичные целевые показатели для выбросов черной металлургии. *Черные металлы*. 2014. № 1. С. 54-55.
4. Глобальная дорожная карта МЭА по технологиям производства чугуна и стали. *International Energy Agency* : веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/events/kick-off-workshop-for-the-iea-global-iron-steel-technology-roadmap>
5. Technology Assessment and Roadmapping. *ESTEP* : веб-сайт. URL: <https://www.estep.eu/green-steel-for-europe/publications/>
6. Обеспечение климатически нейтральной экономики. *European Commission* : веб-сайт. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259
7. Водород в Северо-Западной Европе. *International Energy Agency* : веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-north-western-europe>
8. Закачка водорода в доменную печь: Thyssenkrupp Steel успешно завершила первый этап испытаний. *Hydrogen Central* : веб-сайт. URL: <https://hydrogen-central.com/injection-hydrogen-furnace-thyssenkrupp-steel-test-phase-successfully/>
9. Немецкая Salzgitter начала продажи «зеленой» стали. *Uaprom.info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/178610-nemeckaya-salzgitter-nachala-prodazhi-zelenoj-stali.html>
10. Австрийская Voestalpine запатентовала технологию «зеленого» производства стали. *Uaprom.info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/179757-avstrijskaya-voestalpine-zapatenovala-tehnologiyu-zelenogo-proizvodstva-stali.html>
11. «Металлоинвест» планирует достигнуть углеродной нейтральности к 2050

- году. *Uaprom.info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/179522-metallinvest-planiruet-dostignut-uglerodnoj-nejtralnosti-2050-godu.html>
12. ArcelorMittal примет участие в водородном проекте в Гамбурге. *Uaprom.info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/179198-arcelormittal-primet-uchastie-vodorodnom-proekte-gamburge.html>
 13. В Швеции выбрали площадку для строительства завода водородной металлургии. *Uaprom.info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/178763-shvecii-vybrali-ploshhadku-stroitelstva-zavoda-vodorodnoj-metallurgii.html>
 14. Запуск водорода в Латинской Америке. *International Energy Agency* : веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/events/launch-of-hydrogen-in-latin-america>
 15. Японии предстоит пройти уникальный путь к чистому нулю, но она может достичь этого за счет инноваций и инвестиций. *International Energy Agency* : веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/commentaries/japan-will-have-to-tread-a-unique-pathway-to-net-zero-but-it-can-get-there-through-innovation-and-investment>
 16. Минэнерго разработало три документа для подготовки Водородной стратегии Украины. *Uaprom.info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/179101-minenergo-razrabotalo-tri-dokumenta-podgotovki-vodorodnoj-strategii-ukrainy.html>
 17. Металлургия України. Візія розвитку металургійного сектору 2030. *GMK Center* : веб-сайт. URL: <https://gmk.center/news/anons-viziya-rozvitku-metallurgijnogo-sektoru-2030>
 18. Большая Е. П. Экология металлургического производства. Новотроицк : НФ НИТУ «МИСиС», 2012. 155 с.
 19. Украина обязалась отказаться от угля к 2040 году. *Репортер* : веб-сайт. URL: <https://dp.reporter.ua/articles/ukraina-objazalas-otkazatsja-ot-uglja-k-2040-godu>
 20. Промышленное производство «зеленой стали». *Uaprom.info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/178749-promyshlennoe-proizvodstvo-zelenoj-stali-nachnetsya-ranshe-chez-25-30-let-direktor-south32.html>
 21. Howarth R. W., Jacobson M. Z. How green is blue hydrogen? (2021). *Energy Science & Engineering*. 2021. Vol. 9. Issue 10. P. 1676-1687 <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
 22. BloombergNEF. *Bloomberg Finance L.P.* : веб-сайт. URL: <https://about.bnef.com/>
 23. Международное агентство возобновляемых источников энергии. *IRENA - International Renewable Energy Agency* : веб-сайт. URL: <https://www.irena.org/>
 24. Л. фон Богданди, Г.-Ю. Энгель. Восстановление железных руд. Москва : Металлургия, 1971. 242 с.
 25. Симонов В. К., Гришин А. М., Иващенко В. П. Расчеты по теории процессов восстановления : учеб. пособие. Днепропетровск : НМетАУ, 2006. 48 с.
 26. Павлов М. А. Металлургия чугуна. Москва : Металлургиздат, 1945. 350 с.
 27. Шаповалов М. А. О вдувании восстановительных газов в горн доменной печи. *Сталь*. 1958. № 5. С. 385-390.
 28. Любав А. П. Анализ явлений доменного процесса. Москва : Металлургиздат, 1962.
 29. Красавцев Н. И. Некоторые теоретические вопросы, связанные с вдуванием в доменную печь восстановительных газов. *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1961. № 112. С. 31-39.
 30. Острик П. Н., Ростовцев С. Т. Влияние состава газовой фазы на кинетику

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Выпуск 35
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

- восстановления офлюсованного агломерата. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1962. № 9. С. 17-25.
31. Гольдштейн Н. Л. Водород в доменном процессе. Москва : Металлургия, 1971. 208 с.
 32. Розе Ф. Получение газа-восстановителя для прямого восстановления руд. *Черные металлы*. 1975. № 21. С. 3-7.
 33. Бигеев В. А., Вдовин К. Н., Колокольцев В. М. Основы металлургического производства. Санкт-Петербург : Лань, 2017. 614 с.
 34. Рогожников С. П., Рогожников И. С. Влияние водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов по радиусу доменной печи. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020. Т. 76. № 1. С. 41-49. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-1-41-49>
 35. Козуб В. Н., Андронов В. Н., Бачинин А. А. Доменная плавка с вдуванием горячих восстановительных газов на заводе «Азовсталь». *Сталь*. 1971. № 1. С. 12-15.
 36. Волошин В. С., Руських В. П., Зотов Д. С. Технічне переозброєння і вдосконалення технології доменного виробництва металургійного комбінату «Азовсталь». *Металл и литье Украины*. 2020. № 3. С. 13-18.
 37. Некрасов З. И., Страшников И. В., Хомяков Э. С. Опытная доменная плавка с применением смеси коксового и природного газов. *Металлургия чугуна*. 1973. № 1. С. 69-81.
 38. Некрасов З. И., Страшников И. В., Хомяков Э. С. Технологические и экономические аспекты применения коксового газа в доменном производстве СССР. *Металлургия чугуна*. 1973. № 1. С. 81-84
 39. Бугаев К. М. Окисление природного газа в фурменной зоне доменной печи при различных параметрах комбинированного дутья. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1977. № 1. С. 5-7.
 40. Дидевич А. В. Некоторые особенности теплового режима горна при работе на комбинированном дутье. Донецк : Тр. ДОННИИЧМ. 1970. С. 68-74.
 41. Товаровский И. Г., Гладков Н. А., Нестеров А. С. Особенности формирования расплава в условиях малококсовой доменной плавки. *Сталь*. 1994. № 2. С.9-12.
 42. Отчет НИР ИЧМ «Повышение эффективности использования коксового газа в доменных печах Макеевского металлургического комбината за счет рационального распределения его между печами и совершенствования режима доменной плавки с доведением коэффициента замены природного газа коксовым до 2,7-3,0 м³/м³». 1984 г.
 43. Способы и системы получения железа прямого восстановления и газообразного топлива для сталелитейного завода: пат. RU (11) 2 675 581(13) С2. US 2015/040516 (15.07.2015).
 44. Некрасов З. И., Гладков Н. А., Сидорова Л. Я. Применение хроматографического анализа при исследовании кинетики восстановления и накопления газообразных продуктов реакции : сб. научных трудов «Новые методы исследования процессов восстановления черных металлов». Москва : Наука. 1974. С. 76-77.
 45. Некрасов З. И., Сидорова Л. Я., Гладков Н. А. Особенности взаимодействия окислов железа с метаном. Сообщение 1. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*.

1975. № 11. С. 15-18.
46. Гладков Н. А. Анализ опыта использования комбинированного дутья. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2009. Вып. 20. С. 37-44.
 47. Некрасов З. И., Москалина Ф. Н. Состав газа в горне доменной печи при работе на природном газе и обычном дутье. *Сталь*. 1962. № 9. С. 773-776.
 48. Некрасов З. И., Москалина Ф. Н., Можаренко Н. М. Особенности процессов восстановления в шахте доменной печи при применении природного газа и дутья с концентрацией кислорода до 30%. *Металлургия чугуна*. 1973. № 1. С. 56-69.
 49. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. Днепропетровск : Пороги, 2003. 597 с.

References

1. Iron and Steel Technology Roadmap. *www.iea.org*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
2. Ali Hasanbeigi, Marlene Arens, Jose Carlos Rojas Cardenas, Lynn Price, Ryan Trioloa. (2016). Comparison of Carbon Dioxide Emissions Intensity of Steel Production in China, Germany, Mexico, and the United States. *Resources, Conservation and Recycling*. 2016, Volume 113, 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.008>
3. Jopp K. (2014). Realistichnye celevye pokazateli dlya vybrosov chernoj vetallurgii. [Realistic targets for iron and steel emissions]. *Chernye metally*, 2014, 1, 54-55. [In Russian].
4. Kick-off Workshop for the IEA Global Iron & Steel Technology Roadmap. *www.iea.org*. Retrieved from <https://www.iea.org/events/kick-off-workshop-for-the-iea-global-iron-steel-technology-roadmap>
5. Technology Assessment and Roadmapping. *www.estep.eu*. Retrieved from <https://www.estep.eu/green-steel-for-europe/publications/>
6. Powering a climate-neutral economy: Commission sets out plans for the energy system of the future and clean hydrogen. *ec.europa.eu*. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259
7. Hydrogen in North-Western Europe. *www.iea.org*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-north-western-europe>
8. Injection Of Hydrogen Into Blast Furnace: Thyssenkrupp Steel Concludes First Test Phase Successfully. *hydrogen-central.com*. Retrieved from <https://hydrogen-central.com/injection-hydrogen-furnace-thyssenkrupp-steel-test-phase-successfully/>
9. Nemeckaya Salzgitter nachala prodazhi «zelenoj» stali. [German Salzgitter starts selling green steel]. *uaprom.info*. Retrieved from <http://uaprom.info/news/178610-nemeckaya-salzgitter-nachala-prodazhi-zelenoj-stali.html> [In Russian].
10. Avstrijskaya Voestalpine zapatentovala tekhnologiyu «zelenogo» proizvodstva stali. [Austrian Voestalpine patented green steel production technology]. *uaprom.info*. Retrieved from <http://uaprom.info/news/179757-avstrijskaya-voestalpine-zapatentovala-tehnologiyu-zelenogo-proizvodstva-stali.html> [In Russian].
11. “Metalloinvest” planiruet dostignut' uglerodnoj nejtral'nosti k 2050 godu. [Metalloinvest plans to achieve carbon neutrality by 2050]. *uaprom.info*. Retrieved from <http://uaprom.info/news/179522-metalloinvest-planiruet-dostignut->

- uglerodnoj-nejtralnosti-2050-godu.html [In Russian].
12. ArcelorMittal primet uchastie v vodorodnom proekte v Gamburgue. [ArcelorMittal to take part in hydrogen project in Hamburg]. *uaprom.info*. Retrieved from <http://uaprom.info/news/179198-arcelormittal-primet-uchastie-vodorodnom-proekte-gamburgue.html> [In Russian].
 13. V Shvecii vybrali ploshchadku dlya stroitel'stva zavoda vodorodnoj metallurgii. [Sweden has chosen a site for the construction of a hydrogen metallurgy plant]. Retrieved from <http://uaprom.info/news/178763-shvecii-vybrali-ploshhadku-stroitelstva-zavoda-vodorodnoj-metallurgii.html> [In Russian].
 14. Launch of Hydrogen in Latin America. *www.iea.org*. Retrieved from <https://www.iea.org/events/launch-of-hydrogen-in-latin-america>
 15. Japan will have to tread a unique pathway to net zero, but it can get there through innovation and investment. *www.iea.org*. Retrieved from <https://www.iea.org/commentaries/japan-will-have-to-tread-a-unique-pathway-to-net-zero-but-it-can-get-there-through-innovation-and-investment>
 16. Minenergo razrabotalo tri dokumenta dlya podgotovki Vodorodnoj strategii Ukrainy [The Ministry of Energy has developed three documents for the preparation of the Hydrogen Strategy of Ukraine]. *uaprom.info*. Retrieved from <http://uaprom.info/news/179101-minenergo-razrabotalo-tri-dokumenta-podgotovki-vodorodnoj-strategii-ukrainy.html> [In Russian].
 17. Metallurgiya Ukrainy. Viziyi 2030. [Metallurgy of Ukraine. Vision of metallurgical sector development 2030]. *gmk.center*. Retrieved from <https://gmk.center/news/anons-viziya-rozvitku-metallurgijnogo-sektoru-2030> [In Russian].
 18. Bol'shina E.P. (2012). *Ekologiya metallurgicheskogo proizvodstva. [Ecology of metallurgical production]*. Novotroick: NF NITU «MISIS», 2012. 155. [In Russian].
 19. Ukraina obyazalas' otkazat'sya ot uglja k 2040 godu. [Ukraine pledged to phase out coal by 2040]. *dp.reporter.ua*. Retrieved from <https://dp.reporter.ua/articles/ukraina-objazalas-otkazatsja-ot-uglja-k-2040-godu> [In Russian].
 20. Promyshlennoe proizvodstvo «zelenoj stali». [Industrial production of «green steel» will begin no earlier than in 25-30 years]. *uaprom.info*. Retrieved from <http://uaprom.info/news/178749-promyshlennoe-proizvodstvo-zelenoj-stali-nachnetsya-ranshe-cherез-25-30-let-direktor-south32.html> [In Russian].
 21. Howarth R.W., Jacobson M.Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, 2021, Vol. 9, Issue 10, 1676-1687 <https://doi.org/10.1002/ese3>.
 22. BloombergNEF. *bnef.com*. Retrieved from <https://about.bnef.com/>
 23. The International Renewable Energy Agency (IRENA). *irena.org*. Retrieved from <https://www.irena.org/>
 24. L. fon Bogdandi, G.-YU. Engel'. (1971). *Vosstanovlenie zheleznyh rud [Recovery of iron ores]*. Moskva: Metallurgiya, 1971. 242. [In Russian].
 25. Simonov V.K., Grishin A.M., Ivashchenko V.P. (2006). *Raschety po teorii processov vosstanovleniya [Calculations according to the theory of recovery processes]*. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2006. 48. [In Russian].
 26. Pavlov M.A. (1945). *Metallurgiya chuguna [Iron metallurgy]*. Metallurgizdat, 1945. 350. [In Russian].
 27. Shapovalov M.A. (1958). O vduvanii vosstanovitel'nyh gazov v gorn domennoj pechi [Injection of reducing gases into the hearth of a blast furnace]. *Stal*. 1958, 5, 385-390. [In Russian].

28. Lyubav A.P. (1962). *Analiz yavlenij domennogo processa [Analysis of the phenomena of the blast-furnace process]*. Moskva: Metallurgizdat, 1962. [In Russian].
29. Krasavtsev N.I. Nekotorye teoreticheskie voprosy, svyazannye s vduvaniem v domennuyu pech' vosstanovitel'nyh gazov [Some theoretical issues related to the injection into the blast furnace of reducing gases]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1961, 112, 31-39. [In Russian].
30. Ostriuk P.N., Rostovcev S.T. (1962). Vliyanie sostava gazovoj fazy na kinetiku vosstanovleniya oflyusovannogo aglomerata [Influence of the composition of the gas phase on the kinetics of reduction of the fluxed agglomerate]. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1962, 9, 17-25. [In Russian].
31. Goldshtejn N.L. (1971). *Vodorod v domennom processe [Hydrogen in the blast furnace]*. Moskva: Metallurgiya, 1971. 208. [In Russian].
32. Roze F. (1975). Poluchenie gaza-vosstanovitelya dlya pryamogo vosstanovleniya rud [Obtaining a reducing gas for direct reduction of ores]. *Chernye metally [Ferrous metals]*. 1975, 21, 3-7. [In Russian].
33. Bigeev V.A., Vdovin K.N., Kolokolcev V.M. (2017). *Osnovy metallurgicheskogo proizvodstva [Fundamentals of metallurgical production]*. Sankt-Peterburg: Lan', 2017. 614. [In Russian].
34. Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. (2020). Vliyanie vodoroda prirodnoho gaza na izmenenie teplovogo i vosstanovitel'nogo processov po radiusu domЕННОj pechi [The influence of natural gas hydrogen on the change in thermal and reduction processes along the radius of the blast furnace]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information]*, 2020, Vol. 76, 1, 41-49. [In Russian]. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-1-41-49>
35. Kozub V.N., Andronov V.N., Bachinin A.A. (1971). Domennaya plavka s vduvaniem goryachih vosstanovitel'nyh gazov na zavode «Azovstal'» [Blast-furnace smelting with injection of hot reducing gases at the Azovstal plant]. *Stal' [Steel]*, 1971, 1, 12-15. [In Russian].
36. Voloshin V.S., Ruskij B.P., Zotov D.S. (2020). Tekhnichne pereozbroennya i vdoskonalennya tekhnologii domennogo virobництва metalurgijnogo kombinatu «Azovstal'» [Technical re-equipment and improvement of blast furnace production technology of Azovstal metallurgical plant]. *Metall i lit'e Ukrainy [Metal and casting of Ukraine]*, 2020, 3, 13-18. [In Russian].
37. Nekrasov Z.I., Strashnikov I.V., Homyakov E.S. (1973). Opytnaya domennaya plavka s primeneniem smesi koksovogo i prirodnoho gazov [Experimental blast furnace smelting using a mixture of coke and natural gases]. *Metallurgiya chuguna [Iron metallurgy]*, 1973, 1, 69-81. [In Russian].
38. Nekrasov Z.I., Strashnikov I.V., Homyakov E.S. (1973). Tekhnologicheskie i ekonomicheskie aspekty primeneniya koksovogo gaza v domennom proizvodstve CCCP [Technological and economic aspects of coke oven gas application in USSR blast furnace production]. *Metallurgiya chuguna [Iron metallurgy]*, 1973, 1, 81-84. [In Russian].
39. Bugaev K.M. (1977). Okislenie prirodnoho gaza v furmennoj zone domЕННОj pechi pri razlichnyh parametroh kombinirovannogo dut'ya [Oxidation of natural gas in the lance zone of the blast furnace at different parameters of the combined blast].

- Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 1977, 1, 5-7. [In Russian].
40. Didevich A.V. (1970). Nekotorye osobennosti teplovogo rezhima gorna pri rabote na kombinirovannom dut'e [Some features of a thermal mode of a furnace when working on the combined blowing]. *Collection of works DONNIICHM*, 1970. 68-74. [In Russian].
 41. Tovarovskij I.G., Gladkov N.A., Nesterov A.S. (1994). Osobennosti formirovaniya rasplava v usloviyah malokoksovoj domennoj plavki [Features of melt formation in the conditions of low-coke blast furnace melting]. *Stal' [Steel]*, 1994, 2, 9-12. [In Russian].
 42. Otchet NIR ICHM. (1984). "Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya koksovogo gaza v domennyh pechah Makeevskogo metallurgicheskogo kombinata za schet racional'nogo raspredeleniya ego mezhdru pechami i sovershenstvovaniya rezhima domennoj plavki s dovedeniem koefficienta zameny prirodnoho gaza koksovom do 2,7-3,0 m³/m³". [ICM R&D report "Improving the efficiency of coke oven gas use in blast furnaces of the Makeyevka Metallurgical Plant due to its rational distribution between furnaces and improving the blast furnace smelting regime with bringing the natural gas coke replacement rate to 2.7-3.0 m³/m³".] [In Russian].
 43. *Methods and systems for producing direct reduced iron and gaseous fuel for a steel plant*: US Pat. RU (11) 2 675 581 (13) C2. US [In Russian].
 44. Nekrasov Z.I., Gladkov N.A., Sidorova L.Ya. (1974). Primenenie hromatograficheskogo analiza pri issledovanii kinetiki vosstanovleniya i nakopleniya gazoobraznyh produktov reakcii. *Sbornik "Novye metody issledovaniya processov vosstanovleniya chernyh metallov"* [Application of chromatographic analysis in the study of the kinetics of reduction and accumulation of gaseous reaction products: Collection of scientific works "New methods of research of ferrous metals reduction processes"]. Moskva: Nauka. 1974. 76-77. [In Russian].
 45. Nekrasov Z.I., Sidorova L.YA., Gladkov N.A. (1975). Osobennosti vzaimodejstviya okislov zheleza s metanom. Soobshchenie 1 [Features of interaction of iron oxides with methane. Message 1]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1975, 11, 15-18. [In Russian].
 46. Gladkov N.A. (2009). Analiz opyta ispolzovaniya kombinirovannogo dutya [Analysis of the experience of using combined blowing]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2009, 20, 37-44. [In Russian].
 47. Nekrasov Z.I, Moskalina F.N. (1962). Sostav gaza v gorne domennoj pechi pri rabote na prirodnom gaze i obychnom dut'e [The composition of the gas in the furnace of the blast furnace when working on natural gas and conventional blasting]. *Stal' [Steel]*, 1962, 9, 773-776. [In Russian].
 48. Nekrasov Z.I, Moskalina F.N., Mozhareno N.M. (1973). Osobennosti processov vosstanovleniya v shahte domennoj pechi pri primenenii prirodnoho gaza i dut'ya s koncentraciej kisloroda do 30% [Features of reduction processes in the blast furnace mine with the use of natural gas and blast with an oxygen concentration of up to 30%]. *Metallurgiya chuguna [Iron metallurgy]*, 1973, 1, 56-69. [In Russian].
 49. Tovarovskiy I.G. (2003). *Domennaya plavka. Evolyuciya, hod processov, problemy i perspektivy [Blast furnace smelting. Evolution, course of processes, problems and prospects]*. Dnepropetrovsk: Porogi, 2003, 597. [In Russian].

O. I. Babachenko, Dr. Sci., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7501-4173

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

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

Iron and Steel Institute named after of Z. I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

LOW-CARBON TECHNOLOGIES IN BLAST-FURNACE PRODUCTION

Summary. In recent years more and more actively work has been carried out in the direction of decarbonization of metallurgical processes as part of an active «green» campaign to reduce energy intensity and harmful emissions. Metallurgy of the future is increasingly called hydrogen. The article presents an analysis of the main promising directions of the transition of the world ferrous metallurgy to waste-free and environmentally friendly technologies, carbon neutrality and the maximum reduction of greenhouse gas emissions. The advantages and problems of «green» steel production are analyzed. An overview of pilot projects for the transition to carbon-free steel production at the world's largest metallurgical plants by using hydrogen instead of fossil fuels is given. The advantages and problems of using «gray», «green» and «blue» «carbon-neutral» hydrogen are analyzed. It is shown how the ideas about the role of hydrogen as a reducing agent in the blast furnace process were deepened and refined in the historical context in accordance with changes in the technology of blast furnace smelting and the contribution of ISI scientists to these studies. The main directions of modern developments in the field of decarbonization of metallurgical processes are given. The most promising are two areas of obtaining «green steel» currently - the injection of hydrogen into a blast furnace and the process of direct reduction of iron using hydrogen instead of fossil fuel. Investigations to determine the physicochemical regularities of the reduction processes in a blast furnace with the participation of hydrogen continue at the ISI at the present time. The results of laboratory studies of the influence of a reducing gas with a variable hydrogen content on the nature of the reduction of agglomerate and pellets in the «dry» zone of a blast furnace are presented.

Key words: decarbonization of metallurgy, low-carbon technologies, blast furnace, «green» hydrogen, reduction processes, blast furnace gas, blast furnace gas, coke oven gas.

For citation: *Babachenko O.I., Nesterov O.S., Garmash L.I.* Nyzkovuhletsevi tekhnolohiyi u domennomu vyrobnytvstvi [Low-carbon technologies in blast-furnace production]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 34-54. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-34-54

*Стаття надійшла до редакції збірника 16.11.2021 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
«Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35*