

**І. Г. Муравйова**<sup>1</sup>, д.т.н., пров.н.с., ORCID 0000-0001-5926-7787  
**О.Л. Чайка**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., зав. лаб. ТЕТ, ORCID 0000-0003-1678-2580  
**М. Г. Іванча**<sup>1</sup>, с.н.с., ORCID 0000-0002-5366-9328  
**Б. В. Корнілов**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5544-3023  
**О. Є. Меркулов**<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659  
**О. С. Нестеров**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-0183-0327  
**Л. І. Гармаш**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-6873-6685  
**В. І. Вишняков**<sup>1</sup>, н.с., ORCID 0000-0002-5538-6962  
**В. Р. Щербачов**<sup>1</sup>, м.н.с., ORCID 0000-0002-6734-0451  
**К. П. Єрмоліна**<sup>1</sup>, пров. інж., ORCID 0000-0001-6819-9886

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

## УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ЗБІЛЬШЕННЯ ВМІСТУ ВОДНЮ В ДУТТІ ТА ЙОГО РОЗПОДІЛУ ПО РАДІУСУ ДОМЕННІЙ ПЕЧІ НА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ ДОМЕННІЙ ПЛАВКИ

**Анотація.** Перспективним шляхом досягнення вуглецевої нейтральності при збереженні традиційної доменної технології виробництва чавуну є розвиток та внесення нових проривних змін у технологію, зокрема, пов'язаних з використанням водню, як відновника та джерела тепла. Використання водневмісного палива при виробництві чавуну призводить до істотних змін у технології доменної плавки, зокрема, теплових та відновлюваних процесів, які протікають у печі. Поглиблення розуміння цих процесів при використанні в дутті водневмісних добавок, наукове обґрунтування раціональної їх кількості з метою забезпечення максимального ступеня використання водню є важливими задачами при розробці науково обґрунтованих технологічних положень використання водню у доменній печі. Розробка цих положень повинна бути заснована на результатах досліджень впливу збільшення вмісту водню в дутті та його розподілу по радіусу доменної печі на технологічний режим доменної плавки, які виконано вченими різних країн. Мета досліджень - узагальнення та систематизація результатів досліджень впливу збільшення вмісту водню в дутті та його розподілу по радіусу доменної печі на технологічний режим доменної плавки. Розглянуто досвід використання водневмісних газів у доменному процесі. Виконано аналіз результатів досліджень з вивчення характеру розподілу водню або водневмісних газів по перерізу печі та їх впливу на технологію доменної плавки, які класифіковані наступним чином: експериментальні дослідження на промислових об'єктах; дослідження на експериментальних доменних печах; чисельні дослідження за допомогою

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

математичних моделей. Результати виконаних експериментальних досліджень на промислових доменних печах та в лабораторних умовах, а також за допомогою математичних моделей показали, що вдудання водневмісних газів збільшує продуктивність доменної печі та зменшує витрату коксу. Уявлення про розподіл водню неоднозначні і часом суперечливі. Результати низки досліджень показують, що глибина проникнення  $H_2$  обмежена, він в основному концентрується в області стінки печі, піднімаючись з потоком газу, і газ, що вдудасться, може не досягати центру доменної печі. Для підвищення ефективності використання відновлювального газу в доменній печі необхідно збільшити глибину проникнення водневмісного газу та контролювати розподіл газового потоку в доменній печі. Згідно з альтернативними думками дослідників, кількість водню зменшується від осі (де значення  $H_2$  максимальне) до стінки печі. Процес доменної плавки внаслідок вдудання водню, або водневмісних газів зазнає значних змін порівняно з традиційним процесом виплавки чавуну. Тому робота доменної печі з використанням водню потребує оптимізації, одним із основних напрямків якої є програма завантаження шихти стосовно цих умов.

**Ключові слова:** доменна плавка, декарбонізація, водневмісні гази, розподіл водню або водневмісних газів по перерізу печі.

**Посилання для цитування:** Узагальнення результатів досліджень впливу збільшення вмісту водню в дугті та його розподілу по радіусу доменної печі на технологічний режим доменної плавки / І. Г. Муравйова, О. Л. Чайка, М. Г. Іванча, Б. В. Корнілов, О. С. Меркулов, О. С. Нестеров, Л. І. Гармаш, В. І. Вишняков, В. Р. Щербачов, К. П. Єрмоліна // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 59-102. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-59-102>.

**Постановка проблеми.** Перспективним шляхом досягнення вуглецевої нейтральності при збереженні традиційної доменної технології виробництва чавуну є розвиток та внесення нових проривних змін у технологію, зокрема, пов'язаних з використанням водню, як відновника та джерела тепла. Використання водню ( $H_2$ ), або водневмісних газів у якості відновлювачів у доменній печі, які сприяють зниженню викидів  $CO_2$ , має великі перспективи. Водень дійсно можливо використовувати для відновлення оксидів заліза, побічним продуктом при цьому є тільки  $H_2O$ . Темі ефективного використання водню в доменному виробництві приділяється все більше уваги як в теоретичному, так і в практичному плані. Ця стратегія у теперішній час є популярною темою у дослідженнях в області доменного виробництва, з якої опубліковано ряд оглядових статей [1- 3]. Використання водневмісного палива при виробництві чавуну призводить до істотних змін у технології доменної плавки, зокрема, теплових та відновлюваних процесів, які протікають у печі. Поглиблення розуміння цих процесів

при використанні в дутті водневмісних добавок, наукове обґрунтування раціональної їх кількості з метою забезпечення максимального ступеня використання водню є важливими задачами при розробці науково обґрунтованих технологічних положень використання водню у доменній печі. Розробка цих положень повинна бути заснована на результатах досліджень впливу збільшення вмісту водню в дутті та його розподілу по радіусу доменної печі на технологічний режим доменної плавки, які виконано вченими різних країн.

**Мета роботи.** Узагальнення та систематизація результатів досліджень впливу збільшення вмісту водню в дутті та його розподілу по радіусу доменної печі на технологічний режим доменної плавки.

**Переваги водню у якості відновника. Проблеми, які перешкоджають вдуванню більшої кількості водню.** У процесі доменної плавки близько 30% оксидів заліза відновлюються CO, близько 10% H<sub>2</sub>, решта вуглецем [1]. Метою використання водневмісних газів є підвищення долі відновлення H<sub>2</sub>, що дозволить зменшити витрату вуглецевого відновника.

До числа багатих воднем газів можна віднести: природний газ (NG), коксовий газ (COG), реформований коксовий газ (RCOG) та/або чистий H<sub>2</sub> [4]. Вдування природного газу вже давно використовується у ряді країн, однак його широке використання ускладнює його нестача та висока вартість. Вдування COG та RCOG є багатообіцяючими підходами, які використовують надлишок газів сталеливарного заводу, які відходять, та в останній час стали предметом великого інтересу.

Водень, як відновник, має значні переваги у кінетиці та термодинаміці, а його ефективність та ступінь відновлення вище ніж у вуглецевих відновників при високих температурах [5]. У статті [5] приведені результати високотемпературних експериментів, які проведені у лабораторних умовах. Результати цих досліджень показали, що в умовах вдування великої кількості водню існують дві основні проблеми: перша полягає в тому, що процес відновлення водню є ендотермічною реакцією, тому додаткове тепло підвищує споживання енергії. По-друге, хоча продукт відновлення H<sub>2</sub>O і представляє собою чисту енергію, він ускладнює газифікацію коксу по реакції Будуара у нижній високотемпературній зоні, що призводить до зниження високотемпературної міцності коксу, та в підсумку, може привести до несприятливих умов у печі.

Основною перевагою коксового газу у зрівнянні з природним є менша кількість вуглеводнів на одиницю відновлюваних компонентів, які утворюються у печі [6]. Іншою перевагою коксового газу є його більший початковий об'єм, який припадає на одиницю утворюючих в

печі відновників. Це визначає більш високу енергію витоку струменя коксового газу у потік дуття у зрівнянні зі струменем природного газу, що сприяє кращому впровадженню її у дуттьовий потік. Витрата дуття на спалювання біля фурм та кількість фурмених газів, що утворюються при цьому, на одиницю відновника для коксового газу нижче, ніж для природного та інших добавок. Таким чином, за відновним потенціалом фурмених газів, що утворюються, коксовий газ має суттєві переваги перед природним та іншими добавками. Поряд з цим, тепловий ефект його перетворень у фурм найнижчий, що визначає і низку тепловіддачу в печі у порівнянні з іншими дуттьовими добавками. Основним ефектом від вдування коксового газу є зменшення теплотребности процесу за рахунок зменшення ступеня прямого відновлення на відміну від пилувугільного палива.

Відомий ефект від вдування водневмісного газу, який полягає у зменшенні теоретичної температури горіння коксу (ТТГ).  $H_2$ , який присутній у водневмісному газі, швидко згорає, утворюючи пару [4]. Через високу температуру ця пара сприяє ендотермічній газифікації коксу. Крім того, кисень, споживаний при спалюванні  $H_2$ , знижує доступність кисню для сильно екзотермічного згорання коксу. Збільшення збагачення киснем у разі вдування водневмісного газу сприяє підтримці необхідної для згорання вугільного пилу температури. Однак, існує межа можливого збільшення кисню в дутті, яка пов'язана зі зниженням температури колошникового газу. Таким чином, щоб забезпечити здійсненність та безпеку процесу, двома основними експлуатаційними обмеженнями є теоретична температура та температура колошникового газу.

Через обмеження на мінімальну температуру колошникового газу та максимальний вміст кисню у дутті кількість водневмісних газів, яку можна вдувати на рівні дуття, обмежена [4]. Одним із можливих шляхів подолання цих обмежень, на думку авторів роботи, є реалізація паралельного вдування водню в шахту печі, що передбачають різні дослідницькі проекти, наприклад, ULCOS та COURSE50.

Водень як відновник має різні переваги перед вуглицем, такі як нижчі викиди  $CO_2$ , краща теплопровідність, нижча в'язкість та щільність, що призводить до менших втрат тиску, а також більший коефіцієнт дифузії, що сприяє відновленню залізної руди [7]. Як зазначають автори роботи, у процесі виробництва чавуну кокс необхідний для підтримки хорошої газопроникності стовпа шихти. Однак, незважаючи на переваги водню, як відновника, існують межі його максимального використання в доменній печі, що є предметом багатьох досліджень.

**Досвід використання водневмісних газів у доменному процесі.** Уваги заслуговують дослідження з використання коксового газу, які виконані на промислових доменних печах колишнього СРСР, результати яких представлені у монографії [6]. Коксовий газ має найбільшу теплоту згоряння зі всіх штучних (доменного, конвертерного та ін.). На необхідність його використання у металургійному виробництві вказував ще наприкінці XIX століття Д.І. Менделєєв. Перші досліди використання технології вдування у доменну піч коксового газу спільно з кисневим дуттям були проведені під керівництвом Б.Н. Жеребіна у 1957 – 1958 р. на Кузнецькому металургійному комбінаті. В дослідні періоди роботи печі витрата коксового газу змінювалася від 3000 до 8500 м<sup>3</sup>/год. При цьому відмічене більш рівний хід печі, деяке збільшення продуктивності при зменшенні витрати коксу, а також тенденція загарачення горна коксовим сміттям у міру збільшення витрати коксового газу.

В останні роки, як відмічають автори роботи [8], безліч випробувань було проведено у таких проектах, як HYBRIT (Швеція), SALCOS (Німеччина), H2FUTURE (Європа), COURSE50 (Японія), ROGESA (Німеччина), ULCOS (Європа), AISI (США) и AMLPC (Канада), де для відновлення заліза використовувався або чистий H<sub>2</sub>, або збагачений H<sub>2</sub> газ.

У 2008 році Японія запустила новий процес (COURSE50), спрямований на нейтралізацію вуглецю. Цей метод представляє собою екологічно чистий процес виробництва заліза, котрий знижує викиди CO<sub>2</sub> за рахунок підвищення долі відновленої воднем залізної руди у доменній печі [5]. У рамках японського проекту COURSE50 вдування COG та RCOG було випробувано в експериментальній доменній печі [9]. Кінцевою метою досліджень було зниження викидів CO<sub>2</sub> на 30 %. Випробування включає у себе загальне відновлення за допомогою вуглецю та водню, яке поєднує різні процеси та є модельним процесом перетворення виробництва чавуну у доменній печі в ефективний, чистий та низьковуглецевий процес. Проект поділено на три етапи. Наразі завершено перший етап досліджень, який довів, що викиди CO<sub>2</sub> можна знизити майже на 10%. Другий етап проекту Super-COURSE50 зараз знаходиться у розробці. Мета третього етапу – розширення застосування процесу водневого відновлення до 2050 р.

В огляді [1] наведено посилання на ряд експериментальних досліджень з вдування водню у доменні печі, виконаних різними світовими металургійними компаніями. Так, китайська компанія Baowu Steel провела промисловий експеримент з збагаченням воднем вуглецевим доменним паливом, досягнувши зниження співвідношення палива на 45 кг/т чавуну та зниження викидів CO<sub>2</sub> на 30%. Німецька

компанія ThyssenKrupp Steel також офіційно запустила експеримент з виробництва водневого чавуну: доменна піч використовує частину водню замість вугілля для плавки, цим знижуючи викиди  $\text{CO}_2$  на 20%. Центр водневої металургії Китайської групи науково-дослідних інститутів завершив НДДКР та промислове використання вдування водню в фурми двох доменних печей об'ємом  $1860 \text{ м}^3$ , середнє паливне завантаження доменних печей знижено на 32 кг/т чавуну, а також були досягнуті економічні, соціальні, екологічні ефекти та ефекти зі скорочення викидів вуглецю. Завод ArcelorMittal у Бремені в Німеччині підготовлює водень через електролізер та вприскує його у доменну піч, що дозволяє досягти мети щодо зниження споживання вуглецю та викидів  $\text{CO}_2$  в процесі виробництва чавуну. Крім того, у 2021 році завод ArcelorMittal в Астурії почав закачувати у доменну піч водень, який отримано з природного та коксового газу. Dillinger и Saartahl Steel у Німеччині спільно розробили процес вдування коксового газу у доменну піч та планували вдувати чистий водень у дві доменні печі з метою зменшення викидів  $\text{CO}_2$  на 40% до 2035 року. У той же час SSAB AB, POSCO, група HBIS, Jinghua risteel, Jianlong group, Jiuquan Iron and Steel Co., Ltd., Anshan Iron and Steel Co., Ltd., Baotou Iron and Steel Co., Ltd. та Шаньси. Zhongjin Steel Co., Ltd. також розробляють стратегію водневої енергетики. Приведені вище факти показують, що вчені та інженери повністю усвідомили необхідність та практичну цінність розробки технології виплавки чавуну з використанням водню у якості відновника.

**Результати дослідження з вивчення характеру розподілу водню або водневмісних газів по перерізу печі та їх впливу на технологію доменної плавки.** В роботі [4] відмічається, що вдування газу, збагаченого  $\text{H}_2$ , у фурми до сих пір не отримало широкого застосування, частково через відсутність розуміння його впливу на процес та внутрішній стан печі з метою встановлення особливостей поведінки водню у доменній печі вченими провадяться багаточисленні дослідження.

Дослідження з вивчення характеру розподілу водню або водневмісних газів по перерізу печі та їх впливу на технологію доменної плавки можна класифікувати наступним чином:

- експериментальні дослідження на промислових об'єктах;
- дослідження на експериментальних доменних печах;
- чисельні дослідження за допомогою математичних моделей.

**Експериментальні дослідження на промислових об'єктах.** Найбільш повно аспекти доменної технології при вдуванні водневмісних газів, зокрема коксового, розглянуті в монографії [6], що містить результати експериментальних досліджень, виконаних на ряді

промислових об'єктів. Експериментальним дослідженням на промислових доменних печах передували виконані авторами монографії [6] розрахункові дослідження з метою вивчення особливостей впливу природного та коксового газу на показники доменної плавки. При цьому передбачено можливість підтримання заданого значення теоретичної температури горіння при варіюванні одним або декількома параметрами комбінованого дуття – вмісту кисню, температури дуття та витрати добавки дуття. Основні висновки, які зроблені авторами з використання коксового газу:

1. Приріст ступеня непрямого відновлення вдвічі менше, ніж за вдунання природного газу та зменшується з підвищенням витрати коксового газу повільніше.

2. Теоретична температура горіння зменшується з підвищенням витрати коксового газу. Для підтримки її на заданому рівні потрібна добавка кисню або підвищення температури дуття. Тепловіддача коксового газу на порядок менша тепловіддачі природного газу. Коефіцієнт заміни коксу коксовим газом, у середньому, у 2,2 рази менший, ніж при заміні природним газом.

3. Приріст продуктивності становить  $0,05\%/m^3$  без добавки кисню та  $0,15\%/m^3$  при додаванні кисню  $0,53\%/m^3$  коксового газу.

4. Отримані розрахунком коефіцієнти заміни коксу та інші характеристики є теоретичними та можуть відрізнятися від фактичних у зв'язку з рядом умов, які не підлягають строгому розрахунку. Головним з цих умов є повнота перетворень деяких компонентів добавок (вуглеводнів та твердого вуглецю) біля фурм. Неповна газифікація цих компонентів приводить до відкладення твердих вуглецевих частинок з подальшим утворенням в'язких шлакових мас, які захаращують горн. Все це обмежує можливість збільшення витрати всіх дуттьових добавок.

Як відмічають автори, під керівництвом З.І. Некрасова раніше були проведені дослідницькі плавки з використанням суміші природного та коксового газів на комбінаті Запоріжсталь, в результаті яких встановлено, що при коефіцієнті заміни природного газу коксовим  $2 m^3/m^3$  спостерігається підвищення продуктивності печі на 3,4% та зниження витрати коксу на 1,2% [10]. Позитивні результати зумовлені більш рівним ходом печі та зниженням ступеня прямого відновлення за рахунок кращого протікання процесів у фурмених вогнищах.

Автори монографії [6] узагальнили досвід використання коксового газу на вітчизняних доменних печах. Аналіз використання коксового газу на печах Макіївського заводу із заміною природного газу коксовим у співвідношенні від 1:2 до 1:3 показав, що при заміні природного газу коксовим підвищується порізність коксової насадки. Розпушуванню

кокової насадки сприяє збагачення дуття киснем, а зменшенню порізністі – підвищенню температури дуття та витрати природного газу. Також в результаті досліджень встановлено, що при витраті коксового газу 283 м<sup>3</sup>/т чавуну продуктивність зростає на 0,3%, при витраті 345 м<sup>3</sup>/т чавуну на 0,7%. У той же час витрата коксу змінюється незначно, становлячи, відповідно, 478 и 445 кг/т чавуну при вихідному значенні 495 кг/т чавуну.

Представляє інтерес практика використання коксового газу на комбінаті Запоріжсталь. Дослідну плавку проводили на доменній печі об'ємом 1513 м<sup>3</sup>, яка працювала з вдуванням природного газу на шихті, що містить 98 – 100 % офлюсованого агломерату. У першому етапі досліджень витрата коксового газу склала 7000 м<sup>3</sup>/год. при зменшенні витрати природного газу від 8200 до 4000 м<sup>3</sup>/год. Продуктивність печі зросла на 2,8%, а витрата коксу підвищилась на 1,3%, що пояснюється зменшенням кількості відновлювачів у складі горнових газів в результаті недостатньої витрати коксового газу (для компенсації виведеного природного газу), а також скорочення приходу теплоти горіння вуглецю газів, що вдуваються. У другому періоді витрата коксового газу склала 8540 м<sup>3</sup>/год., витрата природного газу зменшилась з 7300 до 3300 м<sup>3</sup>/год. Така заміна природного газу коксовим забезпечила підвищення у горнових газах кількості відновників. Підвищення виходу горнових газів супроводжувалося покращенням ходу печі. З'явилась можливість підвантаження периферійної зони та розвантаження осьової, що сприяло більш раціональному розподілу газів по перерізу печі. При цьому спостерігалось зниження перепаду тиску по висоті печі.

Як впливає з аналізу основних показників відновлюваної та теплової роботи газів, а також техніко-економічних показників роботи доменної печі №4 Запоріжсталі з вдуванням природного та коксового газів, ступінь прямого відновлення заліза знизилася з 36% до 32,9, температура колошникового газу зменшилася, а інтенсивність ходу печі збільшилася. Фактична продуктивність печі збільшилася, а витрата коксу зменшилася.

Зондування на доменних печах Запоріжсталі виконувалося для умов роботи печі з підвантаженою периферією та розвантаженою осьовою зоною, що сприяло раціональному розподілу газу по перерізу печі, стабільності ходу печі, зменшенню перепаду тиску та покращенню використання енергії газів. Результати зондування фурменої зони показали збільшення вмісту водню у центральній ділянці горну (рис. 1).

В результаті досліджень на промислових об'єктах було виявлено низьку стійкість повітряних фурм, викликану ерозією вузла введення коксового газу під впливом високого вмісту сірки в коксовому газі, що потребувало удосконалень вузла введення дуттьової добавки. На



доменних печач Макіївського заводу Інститутом чорної металургії було реалізовано заходи, що забезпечують підвищення стійкості фурм для умов вдування коксового газу:

- вибір захисного покриття внутрішньої склянки фурми, стійкого до коксового газу;
- розробка конструкції вузла введення газу, який забезпечує виведення факелу горіння за межі фурми.

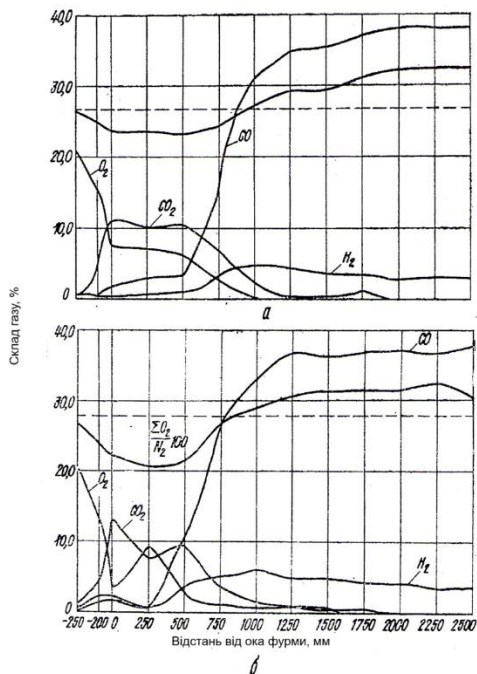


Рисунок 1- Склад газу за радіусом горна: а – порівняльний період; б– дослідний період

Дослідження особливості технології доменної плавки при заміні природного газу коксовим виконані на доменних печач Макіївки. Початкова витрата коксового газу була встановлена 4000 м<sup>3</sup>/год, природного – 6000 м<sup>3</sup>/год, потім витрату коксового газу довели до 8000 м<sup>3</sup>/год, при цьому природного скоротили до 4000 м<sup>3</sup>/год. Через 5 діб природний газ відключили та перевели роботу печі на коксовий газ, довівши його витрату до 18000 м<sup>3</sup>/год. Тривала робота декількох печей підтвердила висновки, отримані на дослідних плавках «Запоріжсталі»:

- еквівалентна заміна природного газу коксовим з точки зору

збереження сталості теплового стану та газодинаміки печі близька до 1:2;

- при дотриманні такої заміни рудне навантаження зберігається або дещо збільшується;

- через зменшення витрати дуття на неповне горіння при заміні природного газу коксовим у співвідношенні 1:2 з'являється можливість при збереженні того ж перепаду збільшити витрати дуття на 60 – 100 м<sup>3</sup>/год.

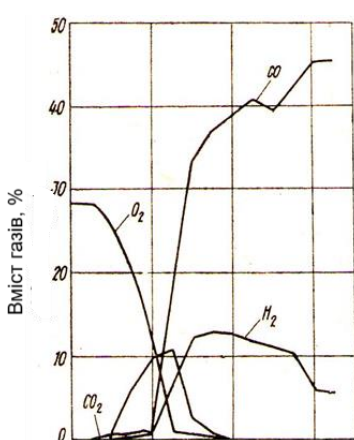
Подальше удосконалення технології проводилося у напрямку збільшення витрати коксового газу з доведенням коефіцієнту заміни природного газу коксовим до 2,5 – 3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. При такій заміні економія коксу зростала, дещо збільшився і приріст продуктивності.

При всіх режимах заміна природного газу коксовим сприяла активізації роботи фурмених вогнищ. Однією з причин цього є підвищення порозності насадки в результаті збільшення швидкості опускання коксу у фурмені вогнища та відповідного підвищення градієнту швидкості руху коксу в об'ємі горна. Для визначення інших причин активізації роботи фурмених вогнищ виконані дослідження шляхом відбору проб газу по радіусу горна за допомогою зондів, що охолоджуються..

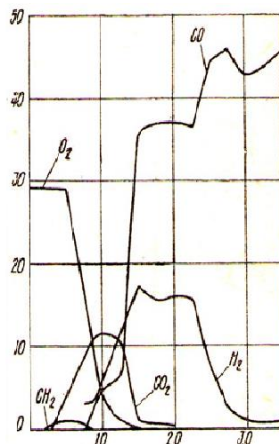
Всього на ДП №5 було виконано 20 зондувань по радіусу горна з відбором проб газу у трьох режимах плавки: 1 з використанням коксового газу, 2 з використанням природного газу, 3 – на атмосферному дутті. На рис. 2 а – в представлені криві зміни вмісту компонентів горнового газу за радіусом печі. Протяжність окислювальної зони у всіх трьох періодах практично однакова. Суттєві відмінності спостерігаються у характері розподілу водню за радіусом горна. При атмосферному дутті без вмісту вуглеводнів вміст водню у горновому газі невеликий (1,0 – 1,5%), однак глибина його проникнення висока (рис. 2). При роботі з природним газом загальний вміст водню перевищує 15% в окремих точках. У фокусі горіння він досягає 11%, збільшуючись за межами окислювальної зони до 17, 2%, а потім знижуючись до центру горна до 1,1%. Для роботи з використанням коксового газу (рис. 2 а) характерно повільніше порівняно з природним газом наростання вмісту водню на початку окислювальної зони з подальшим збільшенням його за межами цієї зони та більш плавним зниженням до центру горна у порівнянні з роботою на природном газі. Вміст водню у точці, відділеній на 3,25 м від торця фурми, складає 5,8%, що більше на 4,7% ніж у випадку природного газу.

Пояснювання характеру окислювальної зони при вдуванні вуглецевмісних добавок дано у роботі З.І. Некрасова та Ф. М. Москаліни [11], де показано, що регенерація водяної пари, що утворилася у фурм, відбувається повільніше, ніж діоксиду вуглецю,

внаслідок чого збільшується протяжність окислювальної зони з відповідним поширенням вологи та вуглецю вглиб горна. При подачі коксового газу в піч окислення його у фурм відбувається більш інтенсивно, ніж природного внаслідок наявності в ньому вільного водню та окису вуглецю. З цієї причини вміст водню у початку окислювальної зони при вдуванні коксового газу значно нижчий, ніж при природному газі, а за межами окислювальної зони, особливо у центрі горна – вище.



(а)



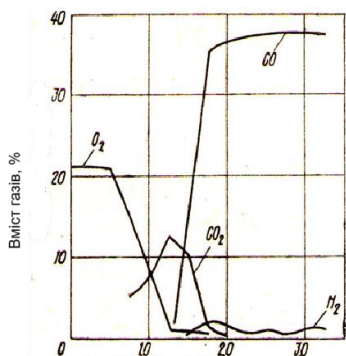
Відстань від торця фурми до центру печі по радіусу, м

(б)

Рисунок 2 – Хімічний склад горнового газу при вдуванні в горн печі № 5:

*a* – коксового газу (витрата коксового газу – 26 000 м<sup>3</sup>/год; витрата дуття – 2120 м<sup>3</sup>/хв; вміст кисню у дутті – 28,2%; температура дуття – 900°С);

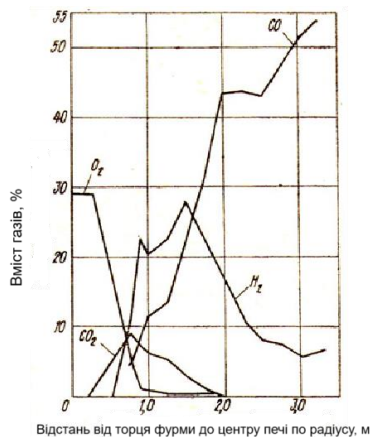
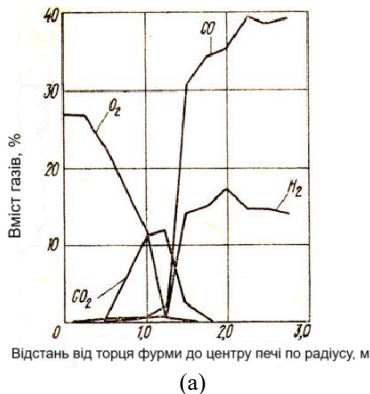
*б* – природного газу (витрата природного газу – 12 000 м<sup>3</sup>/год; витрата дуття – 2100 м<sup>3</sup>/хв; вміст кисню у дутті – 29%; температура дуття – 100°С); *в* – при роботі печі на атмосферному дутті без вдування відновлювальних газів (витрата дуття – 2200 м<sup>3</sup>/хв; вміст кисню у дутті – 21,5%; температура дуття – 800°С)



Відстань від торця фурми до центру печі по радіусу, м

(в)

Збільшення витрати коксового газу до 27000 м<sup>3</sup>/год при деякому зменшенні витрати дуття та вмісту в ньому кисню призводить до підвищення максимального вмісту водню в газі з 12,6 до 17,4% та зміщення цієї точки до центру печі (рис. 2 а, 3 а).



(б)

Рисунок 3 – Хімічний склад горнового газу при вдуванні в горн коксового газу:

а – витрата коксового газу – 27000 м<sup>3</sup>/год; витрата дуття – 2050 м<sup>3</sup>/хв; вміст кисню у дутті – 27%; температура дуття – 900°C;

б – витрата коксового газу – 27 500 м<sup>3</sup>/год; витрата дуття – 2250 м<sup>3</sup>/хв; вміст кисню у дутті – 29%; температура дуття – 900°C);

в – витрата коксового газу – 27 000 м<sup>3</sup>/год; витрата дуття – 2500 м<sup>3</sup>/хв; вміст кисню у дутті – 26%; температура дуття – 1030°C)

Дослідження показали, що збільшення витрат дуття та коксового газу зсуває процеси виділення водню та перенесення кисню за допомогою парів вологи у бік центру печі, що сприяє покращенню протікання теплообмінних процесів у горні та газодинамічних умов в печі. В цьому ж напрямі діє чинник виведення струменя коксового газу до осі потоку дуття.

З'ясування закономірностей роботи фурмених вогнищ при заміні природного газу коксовим дозволили виробити напрямки

удосконалення технології. Насамперед активізація роботи фурмених вогнищ, стабілізуючи хід процесу, сприяла створенню умов для кращого використання газів шляхом підвантаження периферії. Одночасно було зменшено діаметр фурм для підвищення швидкості витоку дуттьового потоку з метою переміщення зони інтенсивного горіння коксового газу вглиб фурменого вогнища.

Підвищення порізності коксової насадки при заміні природного газу коксовим відкрило можливість варіювання роботи фурмених вогнищ на різних доменних печах цеху. Оскільки збільшення температури дуття зменшує порізність коксової насадки, і збагачення дуття киснем збільшує її було прийнято рішення використовувати коксовий газ більшою мірою на печах з високою температурою дуття.

Використання коксового газу як вуглеводневмісної добавки забезпечує прискорений прогрів шихти шляхом скорочення витрати тепла в 3,5 – 4 рази на розкладання вуглеводнів за рахунок додаткового тепла від взаємодії водню коксового газу з киснем дуття та за рахунок використання максимального нагрівання дуття, що дозволяє додатково економити кокс.

При цьому водень коксового газу взаємодіє з киснем дуття та продукти цієї реакції відносяться струменем дуття за межі окислювальної зони. Ця взаємодія забезпечує зниження об'єму горнових газів на величину, рівну кількості пов'язаного в пари води кисню дуття, що дозволяє плавно збільшувати об'єм дуття на таку ж величину, причому перенесення продуктів цієї взаємодії (парів води) у середині та осьові ділянки печі та їх взаємодія з вуглецем коксу забезпечує більш активне, ніж у разі використання природного газу розпушення коксової насадки.

Представлені у монографії [6] результати експериментальних досліджень використання коксового газу в доменних печах, виконані на промислових об'єктах, є найбільш змістовними з відомих та можуть бути основою для подальших досліджень в цьому напрямку.

**Дослідження на експериментальних доменних печах.** Перші дослідження в рамках проекту COURSE50 були виконані на експериментальній доменній печі, яка розташована в Лулео, що належить LKAB (Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag) – шведській гірничодобувній компанії [9]. Основними завданнями експериментальних досліджень стала оцінка можливості заміни коксу та вугілля у якості відновників у доменній печі газом з високим вмістом  $H_2$  у вигляді COG або реформованого COG.

Робочий об'єм експериментальної доменної печі LKAB складає  $9,0 \text{ м}^3$ , діаметр колошнику та діаметр горну - 1,0 м и 1,4 м, відповідно.

Піч оснащена трьома дуттьовими фурмами, безконусною системою завантаження шихти, бункерами для руди та коксу, системою вдування. Температура гарячого дуття може досягати 1200°C. Піч оснащена двома горизонтальними зондами – верхнім та нижнім, за допомогою яких вимірюють температури та розподіл матеріалів. Рівні шихти, верхньої шахтної фурми, нижньої шахтної фурми та дуття складають 7,65 м, 6,20 м, 4,19 м та 1,95 м від рівня горну, відповідно А рівень верхнього шахтного зонду та нижнього шахтного зонду складає 6,75 м та 5,35 м від рівня горну, відповідно.

В ході досліджень COG подавався за допомогою дуттьових фурм, а RCOG – за допомогою трьох нижніх шахтних фурм, розташованих на висоті 2,24 м над дуттьовими фурмами. Склад газу COG становив 57% H<sub>2</sub> -31,3% CH<sub>4</sub> -11,7% N<sub>2</sub>, а його витрата складала 100 Нм<sup>3</sup>/т чавуну (150 Нм<sup>3</sup>/год). Інжектувалися два види газового складу для RCOG: 77,9% H<sub>2</sub> -22,1% N<sub>2</sub> та 77,9% H<sub>2</sub> -10% CO-12,1% N<sub>2</sub>. Витрата RCOG на першому етапі операції складала 150 нм<sup>3</sup>/т чавуну (225 нм<sup>3</sup>/год) з сумішею газів 77,9% H<sub>2</sub> -22,1% N<sub>2</sub>, потім витрата була збільшена до 200 нм<sup>3</sup>/т чавуну (300 нм<sup>3</sup>/год) та додавали CO.

У таблиці 1 показані експлуатаційні данні за базовий період вдування COG та період вдування RCOG (150 Нм<sup>3</sup>/т чавуну).

Таблиця 1 – Експлуатаційні данні за періоди вдування COG и RCOG

Показник	Розмірність	Базовий період	Вдування COG	Вдування RCOG
Виробництво	т/д	36,0	36,5	36,3
Витрата коксу	кг/т чавуну	450	432	435
Витрата ПВП	кг/т чавуну	130	123	128
Витрата COG, що вдувається	кг/т чавуну	0	99	0
Витрата RCOG, що вдувається	кг/т чавуну	0	0	149
Збагачення O <sub>2</sub>	%	5,9	7,8	6,9
Теоретична температура горіння	°C	2218	2202	2243
η CO	%	42,2	40,7	41,5
η H <sub>2</sub>	%	38,2	42,2	34,6

Як впливає з розгляду таблиці витрата коксу та витрата відновника знизилась як в період вдування COG, так і в період вдування RCOG. Ефективність використання газу CO (η CO) знизилася як у періоді вдування COG, так і в періоді вдування RCOG. Ефективність використання газу H<sub>2</sub> (η H<sub>2</sub>) збільшилася в період вдування COG та

знизилися у період вдування RCOG.

За допомогою модифікованої моделі RIST авторами було розраховано масовий та тепловий баланс між вхідними та вихідними умовами. Також був розрахований баланс прямого та непрямого відновлення. Як показали результати розрахунків у порівнянні з базовим періодом ступінь відновлення  $H_2$  збільшилася, у той час як ступінь прямого відновлення C та CO знизилися у обох періодах вдування.

В роботі [9] представлені також результати вимірювання радіального розподілу газу, що вдувається, глибину проникнення якого визначали за допомогою нижнього шахтного зонду над шахтною фурмою. Радіальний розподіл концентрації  $H_2$ , що вимірювався верхнім та нижнім шахтним зондом, показано на рис. 4 і 5 (COG або RCOG вводили з лівої сторони). Як випливає з розгляду рисунків, концентрація  $H_2$  у центрі є найвищою та найнижчою поблизу стінки печі як у базовому періоді, так і у періоді вдування COG. Розподіл концентрації  $H_2$  у періоді вдування COG був більш рівномірний, ніж у контрольний період. З іншої сторони, у період вдування RCOG концентрація  $H_2$  була високою тільки поблизу шахтної фурми.

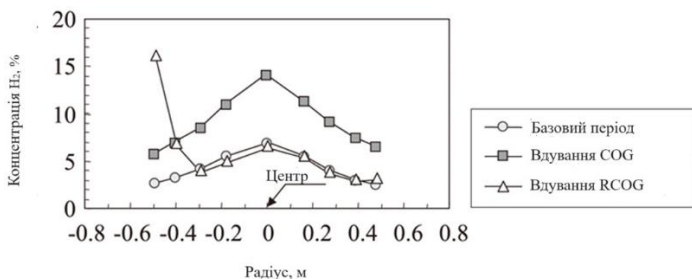


Рисунок 4 – Радіальний розподіл концентрації  $H_2$  в газі, виміряний верхнім зондом

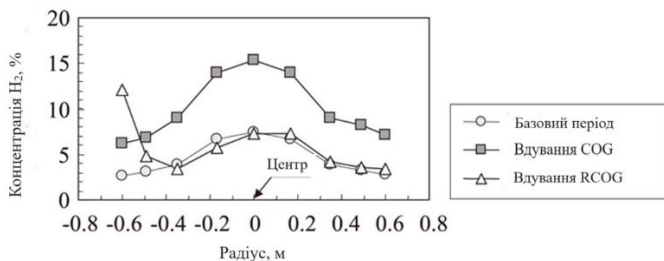


Рисунок 5 - Радіальний розподіл концентрації  $H_2$  в газі, виміряний нижнім зондом

За результатами експериментальних досліджень автори зробили висновок, що надходження С як у періоди вдування COG, так і RCOG зменшилося в порівнянні з базовим періодом через збільшення відновлення  $H_2$  замість прямого відновлення С. Однак мала глибина проникнення інжектваного газу з шахтної фурми погіршувала ефективність печі.

Відомі також виконані в останні роки в рамках проекту COURSE50 дослідження на експериментальній доменній печі об'ємом  $12 \text{ м}^3$ , результати яких представлені в роботі [2]. У якості об'єкту досліджень використана експериментальна доменна піч з однією льоткою та трьома фурмами, яка оснащена безконусним завантажувальним пристроєм. При виконанні досліджень у піч вдувався водневмісний газоподібний відновник, а також подавалося пилувугільне паливо.

У ході досліджень виконані вимірювання розподілу концентрації CO та  $H_2$  у трьох, розташованих на різній висоті поперечних перерізах доменної печі. Паралельно з експериментальними дослідженнями авторами виконані розрахункові дослідження за допомогою математичної моделі. Результати цих вимірювань, а також результати, отримані за допомогою математичної моделі, представлені на рис. 6. Як випливає з аналізу рис. 6 результати розрахунків практично збіглися з вимірними.

Також у ході досліджень за допомогою вертикального зонду вимірювалася концентрація CO та  $H_2$  по висоті печі. Зміни концентрації газів по висоті печі, отримані за результатами вимірів за допомогою зонду, узгоджуються з результатами моделювання (рис. 7).

Метою проведення експлуатаційних досліджень була оцінка впливу водневмісного газу, який вдувався у доменну піч, на викиди  $CO_2$ . Зіставлення результатів моделювання та експериментальних досліджень показало, що математична модель з досить високою точністю дозволяє прогнозувати викиди  $CO_2$ . В результаті моделювання отримано, що вдування водневмісного газу дозволяє зменшити викиди  $CO_2$  на 12% при максимальній витраті водню, що вдується –  $277 \text{ нм}^3/\text{т}$  чавуну.

Проведення випробувань на експериментальних та промислових печах утруднюється через їх високі витрати. Крім того, в ході проведення цих досліджень можливо контролювати обмежену кількість параметрів. Умови доменної плавки не дозволяють проводити експериментальні дослідження з визначенням параметрів, які характеризують її внутрішній стан. У зв'язку з цим, дослідники, зокрема, автори статті [4] віддають перевагу математичному моделюванню.



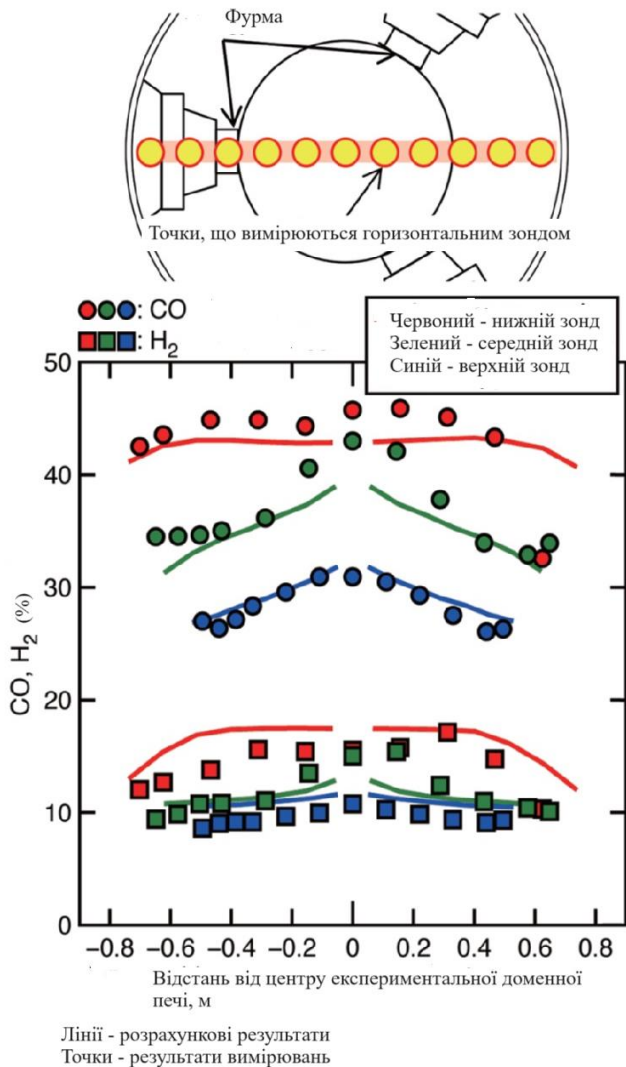


Рисунок 6 – Приклад порівняння концентрацій CO та H<sub>2</sub>, виміряними за допомогою горизонтальних зондів, з розрахунковими значеннями

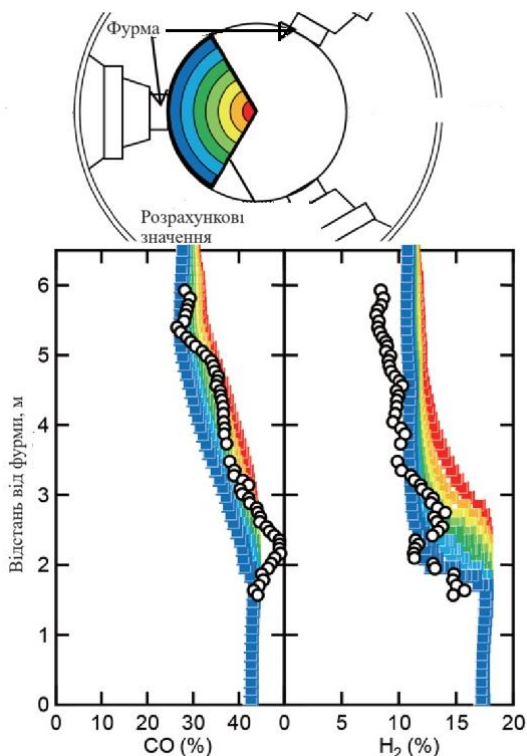


Рисунок 7 – Приклад порівняння концентрації CO та H<sub>2</sub>, виміряних за допомогою вертикального зонда, з розрахунковими значеннями

### ***Чисельні дослідження за допомогою математичних моделей***

Значний об'єм досліджень поведінки водню у доменній печі та встановлення особливостей його впливу на продуктивність печі, витрату коксу та ступінь використання виконані різними вченими за допомогою математичних моделей.

Як показано в роботі [12] при оцінці вдування водню у доменну піч використовується підхід Nogami та інш. [13], що передбачає підтримку високої швидкості подачі тепла у нижню зону майже постійною за рахунок постійної витрати газу та теоретичної температури горіння (ТТГ), що зазвичай досягається шляхом регулювання збагачення киснем та витратою потоку дуття [14 - 17]. Було показано, що підтримка цього стану при вдуванні водню збільшує продуктивність та знижує

температуру колошникового газу. Tang та інш. [14] пояснили ці зміни зменшенням часу перебування та збільшенням збагачення киснем, що дозволяє спалювати більше коксу та, тим самим, інтенсифікувати опускання шихти в печі. При оцінці подачі ненагрітого водню в умовах обмежень Castro та співавтори [16] визначили, що 20,25 кг H<sub>2</sub>/т чавуну замінює 27 кг коксу/т чавуну, а Tang та інш. [18] визначили, що 10,8 кг H<sub>2</sub>/т чавуну замінює 45 кг коксу/т чавуну, що відповідає коефіцієнтам заміщення 1,3 і 4,2 кг коксу/кг H<sub>2</sub> відповідно. Sato та інш. [19] визначили максимальну витрату водню, що вдувається, яка склала 26 кг H<sub>2</sub>/т чавуну при постійній ТТГ, замінює 66 кг коксу/т чавуну (коефіцієнт заміщення 2,5 кг коксу/кг H<sub>2</sub>).

В роботі [12] авторами за допомогою комплексної моделі тепломасового балансу, яка адаптована до діючої доменної печі, показники роботи якої представляють базовий варіант, виконана оцінка експлуатаційних обмежень на вдування водню у доменну піч. Були змодельовані різні варіанти для забезпечення експлуатаційних порівнянь з різними обмеженнями моделі, які пов'язані з продуктивністю, витратою газу та заміною коксу пиловугільним паливом (ПВП). Крім цих обмежень була оцінена чутливість моделі до підвищення ефективності відновлення при вдуванні водню в доменну піч. Умови експлуатації доменної печі в базовому періоді показані у таблиці 2.

Таблиця 2 – Робочі параметри базового варіанту та при максимальному вдуванні водню для усіх варіантів

Параметр	Базовий варіант	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Продуктивність т/добу	7748	7748	7195	7748	7748
Витрата водню, кг/т чавуну	0	19.54	18.82	18.98	14.29
Витрата коксу, кг/т чавуну	364	364	364	333	364
Витрата ПВП, кг/т чавуну	140	102.6	104.1	140	75.6
Кількість шлаку, кг/т чавуну	313	307	307	306	303
Витрата дуття, нм <sup>3</sup> /т чавуну	899	790	802	720	888
Збагачення киснем, %	2.14	4.03	3.65	6.18	0.49
Температура колошникового газу, °С	138	119	119	118	118
Теоретична температура горіння, °С	2251	2051	2051	2050	2051

Відомо, що вдування холодного водню знижує ТТГ, яку можна підтримувати за рахунок збагачення киснем. У зв'язку з цим у всіх досліджуваних періодах роботи печі були встановлена мінімальна температура колошникового газу на рівні 118°C, що перевищує точку роси газу, а мінімальна температура ТТГ була встановлена на 200°C нижче ТТГ базового варіанту (мінімум 2050°C).

Дослідження, які представлені в роботі [12], передбачали вирішення наступних завдань:

*Визначення меж вдування водню.*

На рисунку 8 показані зміни обмежених параметрів (температура колошникового газу та ТТГ) зі збільшенням витрати водню для варіантів 1, 2 та 3. Слід зазначити, що варіант 4 не показаний, оскільки він був розрахований тільки при максимально можливій витраті водню.

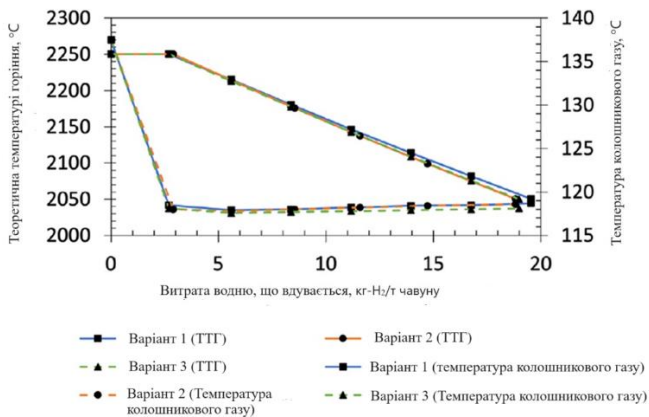


Рисунок 8 – Вплив підвищення витрати водню на обмежені параметри (температуру колошникового газу та ТТГ)

Як витікає з розгляду рис. 8 приблизно при 3 кг-Н<sub>2</sub>/т чавуну температура колошникового газу зменшується до обмеженої межі, яка дорівнює 118°C, у той час, як ТТГ підтримується постійною. При більшій витраті вдування водню ТТГ поступово зменшується до тих пір, поки, межу її падіння в 200°C не буде досягнуто, приблизно, при 19,5 кг-Н<sub>2</sub>/т чавуну (варіант 1) та 19 кг-Н<sub>2</sub>/т чавуну (для варіантів 2 та 3). Таким чином, межа вдування водню відрізнялася між трьома варіантами тільки на 2,5%, при цьому максимальна витрата водню складала 19,5 кг-Н<sub>2</sub>/т чавуну у варіанті 1 при постійній продуктивності. Встановлена в цих дослідженнях межа 19,5 кг узгоджується з результатами Sato та інш. (2015), які показали, що витрата водню повинна складати менше 26 кг Н<sub>2</sub>/т чавуну.

В таблиці 2 приведені робочі параметри усіх варіантів при максимальній витраті водню, що вдувається. Керуючі змінні параметри, на які не накладені обмеження, виділені сірим цвітом.

*Умови гарячого дуття.*

У якості впливів, які компенсують тепловій вплив водню, використані витрата гарячого дуття та збагачення киснем. В усіх варіантах при вдуванні водню менш  $\sim 3$  кг- $H_2$ /т чавуну, де ТТГ підтримується за рахунок збільшення збагачення киснем, видно, що загальний об'єм дуття зменшується, що призводить до зниження температури колошникового газу, як показано на рис. 8. По мірі збільшення кількості водню, що вдувається, коли ТТГ може зменшуватися (рис. 8), загальний об'єм інжектваного газу збільшується. Таке збільшення загальної кількості газу, що вдувається, нейтралізує негативний вплив збагачення киснем на температуру колошникового газу.

*Умови у горні.*

В результаті досліджень встановлено, що коли ТТГ більше не підтримується за рахунок збагачення киснем, продуктивність знижується через збільшення питомої витрати газу. Це співвідношення означає, що для печей, які працюють ближче до температурних меж колошникового газу (і, таким чином, обмежених у використанні збагачення киснем), може бути важче підтримувати постійну продуктивність при вдуванні водню в міру збільшення витрати потоку газу. Однак варто зазначити, що вплив цього збільшення об'єму газу буде, принаймні, частково компенсовано зниженням щільності і в'язкості газу. Крім цього, очікується, що вплив водню на розм'якшення та плавлення шихти покращить параметри пластичної зони. [20].

*Заміна палива воднем.*

Авторами також виконані дослідження з визначення можливості використання водню для заміни ПВП. Встановлено, що при умові підтримки постійної продуктивності печі максимальна витрата водню, що вдувається, склала 19,5 кг  $H_2$ /т чавуну, замінюючи 37,2 кг ПВП/т чавуну (коефіцієнт заміни 1,9 кг ПУТ/кг  $H_2$ ) або 19 кг  $H_2$ /т чавуну, замінюючи 31 кг-коксу/т-чавуну (коефіцієнт заміни 1,64 кг коксу/кг  $H_2$ ). Коефіцієнт заміни ПВП воднем виявився вище, ніж у коксу, на 9% в перерахунку на чистий вуглець.

В роботі [4] приведені результати виконаних за допомогою математичної моделі досліджень впливу водневмісного газу на доменний процес. Авторами проаналізовано результати чисельних досліджень вдування водню в фурму, які виконано різними вченими. Wang та інш. [21] вивчали доменний процес з вдуванням COG та рециркуляцією колошникового газу. При вдуванні COG в фурму ними

прогнозувалося потенційне зменшення викидів вуглецю на 6,5%. Li та інш. досліджували оптимальний розподіл рудного навантаження для доменного процесу з вдунням COG. Liu та інш. досліджували вплив поєднання COG з завантаженням гарячої шихти на процес плавки. Показано, що вдуння чистого H<sub>2</sub> супроводжується зниженням температури колошникового газу та перепаду тиску в печі. Переваги використання водню в доменній печі та його вплив на навколишнє середовище та викиди CO<sub>2</sub> представлено у дослідженнях, які виконано Tang та інш. [22]. Okosun та інш. [23] досліджували нестабільність процесу, яка викликана високою витратою H<sub>2</sub>, що вдувається, та знижує теоретичну температуру горіння. У комплексному дослідженні вдуння водню на рівні фурм Li та інш. [24] встановили оптимальну величину вмісту водню в газі на рівні 33,3%.

Дослідження різних технологій зниження викидів CO<sub>2</sub>, які представлені в роботі [4], виконано авторами за допомогою розробленої в останній час двумірної осесиметричної математичної моделі доменної печі - модель BFiner. Модель описує перебіг, теплообмін та хімічні реакції як для газової, так і для твердої фази. В роботі [25] Baniasadi та інш. представили попередні результати моделювання. У статті [4] BFiner адаптована до експлуатаційних даних конкретного об'єкту – доменної печі Rogesa 5, яка експлуатується компанією Dillinger в Діллінгені, Німеччина. Компанія вже почала свій шлях до декарбонізації, впровадив помірну кількість COG. Вибраний для досліджень період роботи печі вважався стабільним, оскільки умови експлуатації, такі як витрата дуття та продуктивність, залишалися практично постійними.

Підтвердженням достовірності моделі є зіставлення отриманих з її допомогою результатів з результатами вимірювань, виконаних за допомогою зондів, що вводяться в піч на відстані 5,5 м нижче за рівень засипу. На рис.9 прогнозований склад газу та температура по радіусу печі представлені разом із шістьма вимірами, виконаними через рівні проміжки часу протягом п'яти днів стабільного періоду. Як впливає з розгляду графіків загалом спостерігається близькість розрахункових та вимірних параметрів. Винятком є деяка їх розбіжність (рис. 9 (а)–(с)) для перших двох метрів радіусу печі (які становлять менше 15% від загального об'єму печі), які можуть бути пов'язані з неможливістю точного розрахунку розподілу шихти в осьовій зоні печі. З аналізу рис. 9 (б) видно, що максимальний вміст CO спостерігається в осі доменної печі через завантаження коксу в осьову зону. Під час руху до стінки CO знижується і поблизу неї дещо збільшується, що ймовірно, пов'язано з завантаженням в цю зону коксу – горіху. Характер зміни CO<sub>2</sub> має протилежну тенденцію. Для поведінки водню (рис. 9 (г)) характерно

більше відхилення розрахункових значень від вимірених, що може бути пов'язано з неточністю аналізу вмісту  $H_2$ . В цілому, як показали дослідження, модель дозволяє задовільно прогнозувати розподіл водню.

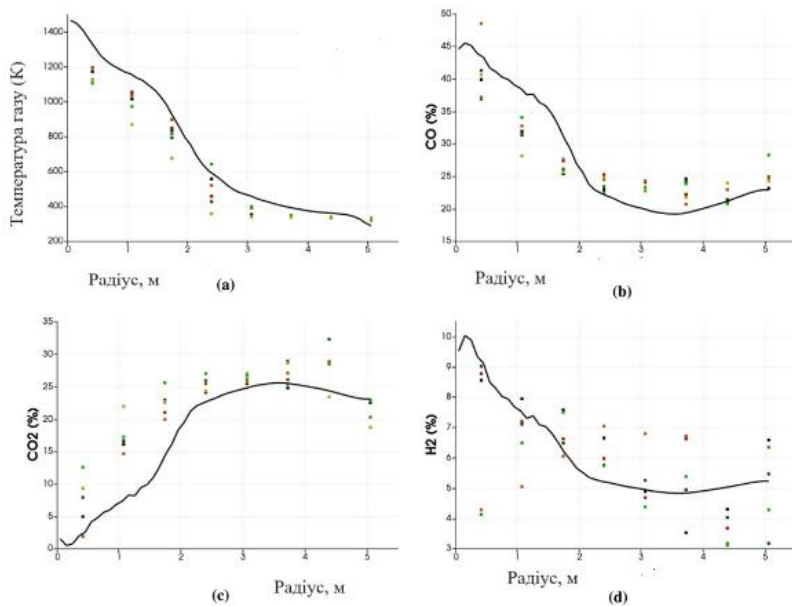


Рисунок 9 – Порівняння вимірювань у шарі по радіусу печі з прогнозованою поведінкою для: (a) температури газу, (b) CO, (c) CO<sub>2</sub> та (d) H<sub>2</sub>

Приведений на рис. 9 d графік зміни  $H_2$  по радіусу печі в вимірювальному перерізі свідчить про зменшення його від осі (де значення  $H_2$  максимально) до стінки печі. Представлений авторами роботи характер зміни водню по радіусу печі є однією з альтернативних думок про характер розподілу водню в доменній печі.

Авторами також виконано дослідження при різному характері розподілу шихтових матеріалів на колошнику печі, який оцінюється по показнику об'ємної доли коксу у шихті (відношення коксу до суми коксу та руди у зонах колошнику). Відмінності у розподілу шихти показані на рис. 10, з яких видно, що для всіх досліджень характер зміни завантаження шихти ідентичний, за винятком варіанту інтенсивного вдування газу, збагаченого  $H_2$ , для якого об'ємна доля коксу зменшується.

Встановлено, що розподіл  $H_2$  по радіусу відображає розподіл коксу в доменній печі – вищий вміст  $H_2$  виявляється у центрі, де об'ємна доля

коксу максимальна (рис. 10). Потім вміст водню поступово знижується по радіусу з невеликою зміною тенденції поблизу стінки, оскільки в цю область завантажувався кокс – горіх. Як показано на рис. 10, об’ємна доля коксу нижче по усьому радіусу доменної печі для трьох нових процесів, що відображає зменшення витрати коксу. Це зниження збільшується до осі печі, що призводить до зниження газопроникності у цієї області та зменшенню висоти пластичної зони та швидкості газу у зрівнянні з поточним процесом.

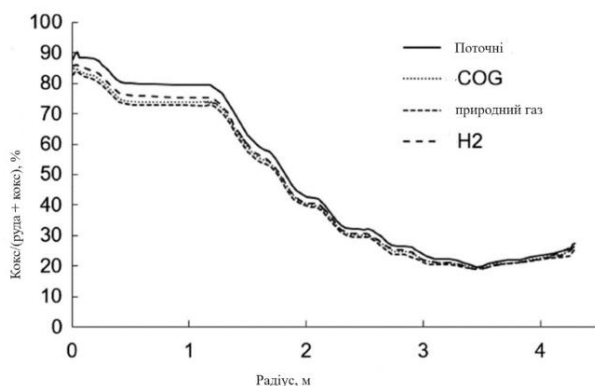


Рисунок 10 – Радіальна зміна об’ємної доли коксу в шихті для поточних процесів, COG, NG та H<sub>2</sub>

На рис. 11, що ілюструє зміну розподілу газів при вдуванні водневмісних газів, показані профілі потоку газів та пластичної зони для різних досліджуваних варіантів. Східні гази, що вдуваються через фурми, рухаються вгору і проходять через коксові вікна пластичної зони, після чого повертаються на висхідну траєкторію. У нижній частині доменної печі, через тотерман (який характеризується низькою проникністю), швидкість газу зменшується.

Як видно з рис. 12, температура газу в значній частині пристінкової області верхньої частини доменної печі низька, що викликано випаровуванням вологи з шахти та меншою кількістю енергії, доступної у цій області через більш низьку витрату газу, яка викликана високим співвідношенням руди та коксу. Для випадків вдування водневмісних газів характерна та ж динаміка температури газу, але з меншими її значеннями. Причинами цього є менші об’єми газу і витрати коксу при незмінній продуктивності печі. Крім того, часткова заміна непрямого відновлення CO на непряме відновлення H<sub>2</sub> також зменшує температуру в печі. Відновлення вюстити H<sub>2</sub> є ендотермічною реакцією, а відновлення його CO - екзотермічною. Що стосується магнетиту,



відновлення водню є більш ендотермічним, ніж відновлення монооксиду вуглецю. Гематит, відновлений CO, виділяє значну кількість тепла, тоді як відновлення  $H_2$  в залежності від температури буде виділяти або споживати невелику кількість тепла.

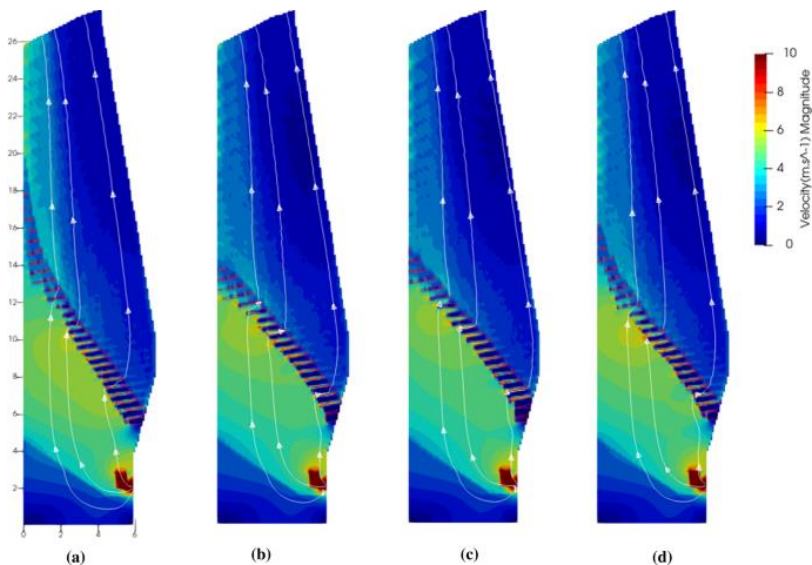


Рисунок 11 - Величина швидкості газу та профілі пластичної зони для поточних (а), COG (б), NG (в) та  $H_2$  (г) процесів

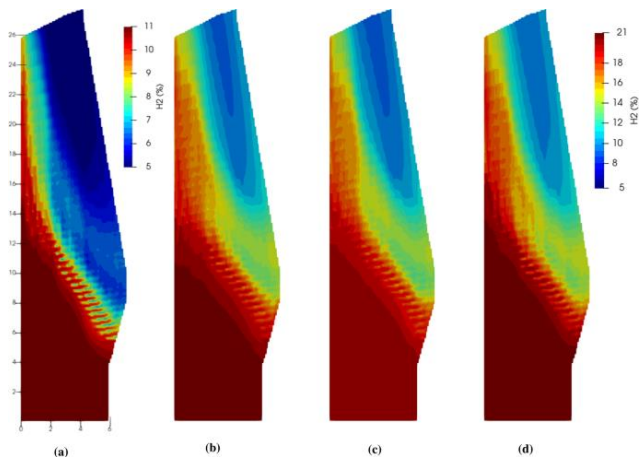


Рисунок 12 – Вміст водню для поточних (а), COG (б), NG (в) та  $H_2$  (г) процесів

Авторами статті прогнозується, що ддування COG та чистого H<sub>2</sub> в фурму дозволить зменшити викиди CO<sub>2</sub>, відповідно, на 8 і 6 відсотків, у порівнянні з традиційним доменним процесом. Проте, на думку авторів зменшення викидів на 8% є недостатнім для досягнення екологічних цілей. Збільшення інтенсивності ддування водневмісних газів не дозволить вирішити цю задачу, оскільки температура колошникового газу повинна підтримуватися вище точки роси, а теоретичні температура горіння не може опускатися нижче за заданий поріг для гарного згорання пиловугільного палива. Одним з можливих варіантів подальшого зменшення викидів автори вважають паралельне ддування водневмісних газів через повітряні фурми та в шахту доменної печі.

Заслуговують на увагу дослідження впливу ддування водню на процеси в доменній печі, результати яких представлені в роботі [24]. Як зазначено в роботі переваги, пов'язані з H<sub>2</sub>, в порівнянні з традиційним відновним газом (CO) в доменній печі включають більш високий ступінь прямого відновлення, більш високий коефіцієнт дифузії, що забезпечує більш швидку доставку реагенту до місця реакції, більшу провідність, що полегшує міжфазний теплообмін, нижчу в'язкість та щільність, зниження тиску у стовпі шихти та екологічність. Однак, як відмічають автори роботи, існує ряд обмежень з використання великої витрати водню в доменній печі. Водень не може замінити увесь вуглець, оскільки певна кількість коксу потрібна для підтримки відповідної проникності печі. Крім того, відновлення оксидів заліза воднем представляє собою ендотермічну реакцію, проведення якої потребує додаткового тепла. З цього витікає, що повинна існувати межа використання водню в доменній печі.

У статті представлені результати чисельного дослідження впливу збагачення дуття воднем на внутрішній стан та загальну продуктивність промислової доменної печі об'ємом 380 м<sup>3</sup> за допомогою трьохмірної 3D CFD моделі доменного процесу. При цьому вміст водню варіювався від 3% до 49,5%, а температура чавуну, об'єм горнового газу та теоретична температура залишалися постійними. Чисельні результати (рис. 13) вказують, що зі збільшенням збагачення воднем витрата коксу спочатку знижується до мінімуму, а потім збільшується, при цьому продуктивність збільшується, а потім зменшується. Авторами показано, що збільшення збагачення воднем підсилює непряме відновлення H<sub>2</sub> та ускладнює реакцію розчинення вуглецю. Однак це також знижує ступінь непрямого відновлення CO, який більш значний, ніж ступінь прямого відновлення H<sub>2</sub> в умовах, що розглядаються. Крім того, збагачення воднем вимагає додаткового спалювання коксу, щоб компенсувати тепло від зниження витрати гарячого дуття. Як вважають

автори, загалом, збагачення воднем підвищує енергоефективність доменної печі.

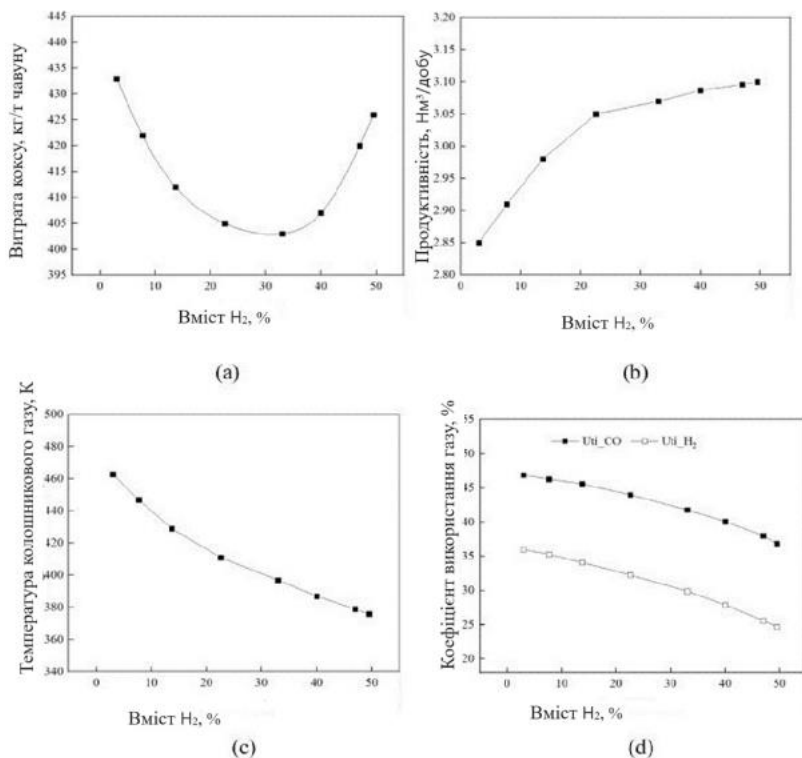
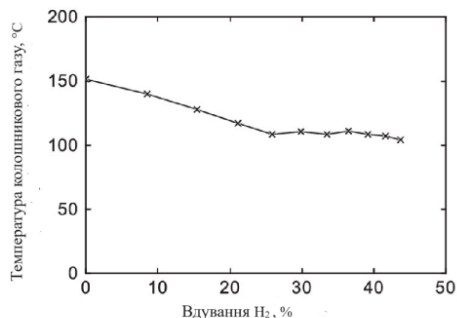


Рисунок 13 – Мінімальна витрата коксу при інтенсифікації збагачення воднем

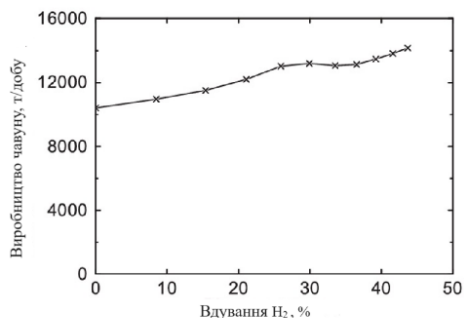
В роботі [26] авторами виконано чисельне моделювання роботи доменної печі з вдуванням водню через фурму. Моделювання проводилося в умовах постійної витрати горнового газу, теоретичної температури горіння та температури чавуну. Результати моделювання, які представлені на рис. 14 а, показали, що збільшення кількості водню, що вдувається, призводить до зниження температури колошникового газу та уповільнює відновлення оксиду заліза, особливо магнетиту. Зі збільшенням витрати водню, що вдувається, продуктивність печі збільшується (рис. 14 б). Вдування водню значно знизило витрату коксу, що негативно позначилося на газопроникності стовпа шихти, проте, незважаючи на це втрати тиску в печі зменшилися.

Результати емпіричних досліджень впливу водню на показники доменної плавки, які виконано за допомогою математичної моделі,

представлені у звіті консалтінгової компанії Cassotis Consulting [27]. Дослідження показали, що кожен кілограм спожитого  $H_2$  замінює близько 3,9 кілограмів коксу. На рисунку 15 показано вплив водню на витрату палива та викиди  $CO_2$ .



а) Температура колошникового газу



б) Виробництво чавуну

Рисунок 14 – Вплив витрати водню на продуктивність печі та температуру колошникового газу

У звіті також розглядається вплив водню на ступінь використання  $CO$  і  $H_2$  (рис. 16), теоретичну температуру горіння (рис. 17) та на продуктивність доменної печі (рис. 18). Збільшення витрати  $H_2$  збільшує зниження  $CO$  (що означає, що вуглець краще використовується), а також продуктивність доменної печі. Однак при цьому зменшується непряме відновлення  $H_2$ , теоретична температура горіння та проникність (за рахунок зниження витрати коксу). Саме теоретичні температура та проникність лімітують збільшення витрат водню, що вдувається.

З метою підвищення ефективності вдування водню в доменні печі рядом вчених виконано дослідження впливу спільного вдування водню через фурму та в шахту доменної печі. Як показано в роботі [8], на відміну від зменшеного температурного поля, яке спостерігалось після

подачі  $H_2$  через фурми, термічні умови поблизу точок подачі водню у шахту печі покращуються. Це є слідством того, що різні схеми подачі водню у доменну піч можуть викликати різні внутрішньопічні явища, які потребують подальшого вивчення.

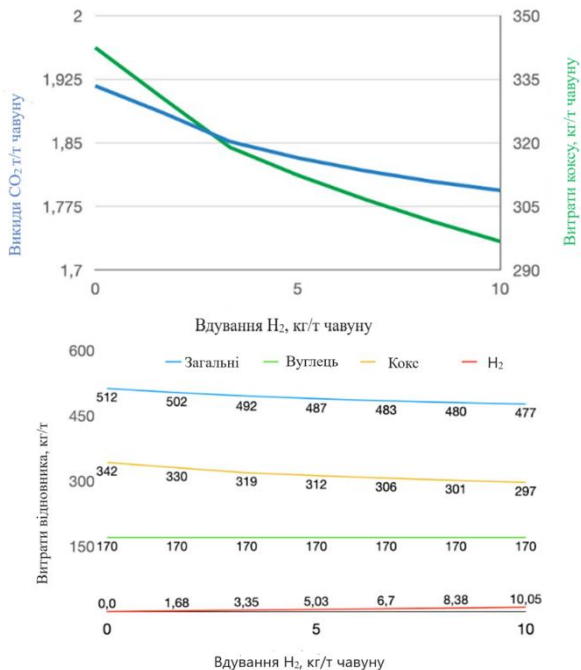


Рисунок 15 – Вплив водню на витрату палива та викиди  $CO_2$

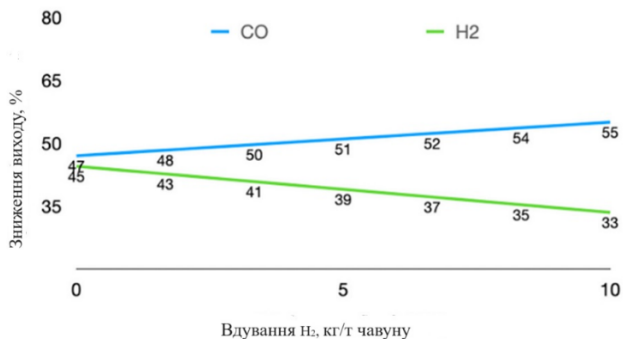


Рисунок 16 – Зниження виходу  $H_2$  та  $CO$

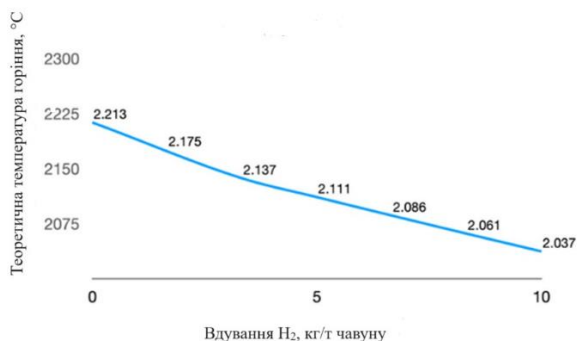


Рисунок 17 – Вплив витрати Н<sub>2</sub> на теоретичну температуру горіння

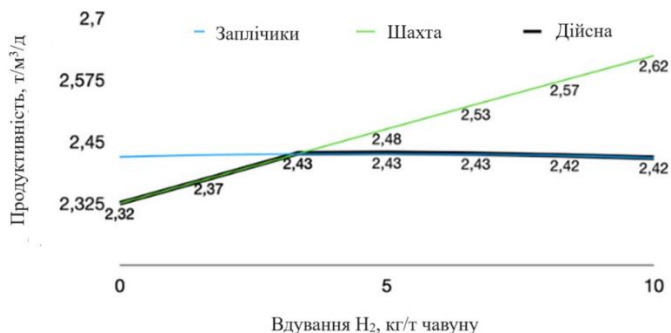


Рисунок 18 – Вплив витрати Н<sub>2</sub> на продуктивність печі

Аналізуючи результати досліджень, виконані різними вченими з впливу водню на процес плавки, автори відмічають відмінність кількості вдуваного Н<sub>2</sub> в різних дослідженнях, що змінюється, приблизно, від 10 до 60 кг-Н<sub>2</sub>/т чавуну, а коефіцієнт заміщення вуглецю коливається приблизно від 0,1 до 4 кг-С/кг-Н<sub>2</sub>. На думку дослідників кількість Н<sub>2</sub>, що вдувається, та коксу повинні відповідати певним вимогам для забезпечення достатньої теплової енергії відновлюючого газу та проникної структури стовпа шихти. Наприклад, на думку Nogami найменша витрата коксу складає 266,7 кг/т чавуну в доменній печі, яка одночасно використовує СО та Н<sub>2</sub>, беручи до уваги обмеження рівноваги та теплові вимоги для виробництва чавуну та розплавленого шлаку. Лі та інші встановили, що мінімальна витрата коксу становить приблизно 403 кг/т чавуну, при цьому вміст Н<sub>2</sub> у горновому газі складає 33%. Це показує, що різні схеми роботи можуть мати різні необхідні значення витрати коксу і коефіцієнти його заміщення. На думку авторів

необхідне подальше вивчення зміни витрати коксу при подачі  $H_2$  через фурми та шахту печі.

У дослідженнях, представлених в [8], для вивчення впливу запропонованого одночасного вдування  $H_2$  через фурму та шахту на роботу доменної печі з точки зору внутріпічних процесів та загальної продуктивності доменної печі отримала подальший розвиток багаторідинна математична модель, яка враховує шари шихти, утворені в результаті її завантаження в піч. Розроблено декілька схем спільного вдування, включаючи вдування через фурму, в шахту та декілька випадків спільного вдування з варіюванням витрати  $H_2$ , який вдувається в фурму (при цьому загальна кількість  $H_2$  підтримується на рівні умов доменної печі промислового масштабу). Досліджуються внутрішньопічні явища, які включають температурне поле, швидкість відновлення  $H_2$  та  $CO$ , вміст пари та взаємопов'язане використання  $CO$  та  $H_2$ , їх вплив на продуктивність доменної печі, включаючи витрату коксу, температуру колошника та т.п. Авторами статті підкреслюється необхідність проведення подальших досліджень з вивчення впливу спільної подачі водню через фурми та в шахту доменної печі на процес плавки.

Автори роботи [20] представили результати досліджень, які виконано в межах японського національного проекту з скорочення викидів  $CO_2$  (COURSE50). Зокрема, однією з технологій проекту є використання реформованого коксового газу (COG), який має високу концентрацію  $H_2$ . Як показано в роботі, відновлення  $H_2$  може замінити відновлення  $CO$  в доменних печах, хоча воно є ендотермічною реакцією, яка викликає дефіцит тепла та гранулометричний розпад аглоруди через утворення низькотемпературної терморезервної зони у шахті. Більш того, через більш високу швидкість реакції відновлення  $H_2$ , у порівнянні з відновленням  $CO$ , можна очікувати досягнення більш високого непрямого відновлення, що призведе до більш низького прямого відновлення. На думку авторів, оскільки  $H_2$  має менший потенціал відновлення у нижній частині доменної печі, вдування  $H_2$  через допоміжні фурми у нижній частині шахти є найбільш привабливим методом отримання максимального непрямого відновлення.

**Особливої уваги заслуговують дослідження впливу розподілу шихти, показником якого є рудне навантаження на колошнику доменної печі, на процес плавки з використанням у дутті водневмісних газів.**

Як показано в роботі [7] корегування розподілу рудного навантаження є звичайною операцією зі зміни розподілу газу для досягнення необхідної продуктивності доменної печі. Виконав аналіз

відомих методів експериментального визначення рудного навантаження та встановлення його впливу на продуктивність доменної печі, автори роботи резюмують, що для вирішення цього завдання єдиним виходом є використання чисельних (математичних) моделей. Проаналізувавши відомі моделі визначення рудного навантаження на колошнику печі, автори роблять висновок, що більшість з них засновано на методі дискретних елементів (DEM), який потребує значних витрат часу при моделюванні промислових об'єктів.

З метою вивчення впливу характеру розподілу рудного навантаження на продуктивність печі використовується комбінований підхід - DEM та CFD (обчислювальна гідродинаміка). Така комбінація двох моделей дозволяє досліджувати нові процеси в доменній печі, зокрема, з використанням у дутті водню. Наприклад, Nogami та інш. [26] прийняли модель процесу CFD для дослідження доменної печі, яка працює зі змінним від 0 до 43,7 % збагаченням воднем, який вдувається через подові фурми. З використанням тієї ж моделі Tang та інш. [11] виявили вплив вдування водню зі збагаченням його до 15,23%. Chu та ін. [28] порівняли подачу водневмісних матеріалів (вдування природного газу та пластикових відходів) з повністю коксовими операціями. Li та інш. [29] оцінили вплив вдування реформованого коксового газу (RCOG), завантаження гарячої шихти та їх комбінації на продуктивність доменної печі з використанням 2D-моделі процесу. З використанням аналогічної моделі Yu та Shen [30] досліджували вплив подачі чистого водню в шахту печі на її продуктивність.

Автори роботи [7] удосконалили свою тривимірну (3D) CFD модель для моделювання доменного процесу, який передбачує вдування від 3 до 49,5% водню через фурми [24]. Як показали результати чисельних досліджень зі збільшенням збагачення воднем витрата коксу знижується до мінімуму, потім збільшується, при цьому продуктивність збільшується, а потім сповільнюється. Таким чином, на думку авторів, оптимальне збагачення воднем визначається по мінімальній витраті коксу.

Особливу увагу автори приділили дослідженню впливу розподілу шихти на глибину проникнення у стовп шихти водню, що вдувається в шахту печі, а також ефективність використання водню в печі. Зокрема, в роботі [7] приведені дослідження за допомогою 3D-моделі процесу, яка заснована на обчислювальній гідродинаміці (CFD), впливу периферійної віддушини на термохімічні процеси та продуктивність доменної печі, яка працює з вдуванням водню, як у шахту, так і в повітряні фурми. Віддушина – це область перерізу колошнику, яка має кращу газопроникність шару у зв'язку з підвищеним вмістом коксу. При виконанні досліджень приймалося, що розподіл шихтових матеріалів на



колошнику відповідає осьовому ходу доменної печі. На рис. 19 представлений графік, який ілюструє розподіл рудного навантаження при різних значеннях периферійної віддушини. Авторами умовно периферійна віддушина позначена параметром РОЕ, негативні значення якого відповідають завантаженню великої кількості руди в периферійну зону печі, а позитивні – більшої кількості коксу. Зміни в межах 20% радіусу периферійної області приводять до різних кривих зміни рудного навантаження. Значення РОЕ, яке дорівнює куту між кривою рудного навантаження та горизонтальною лінією, змінюється від  $-90$  до  $90$  градусів. Більше значення означає, що в периферійну область завантажено більше коксу. РОЕ від'ємний, коли периферійна область має більш товстий рудний шар, ніж проміжна зона радіусу, в іншому випадку - позитивний. При цьому витрата коксу залишається постійною.

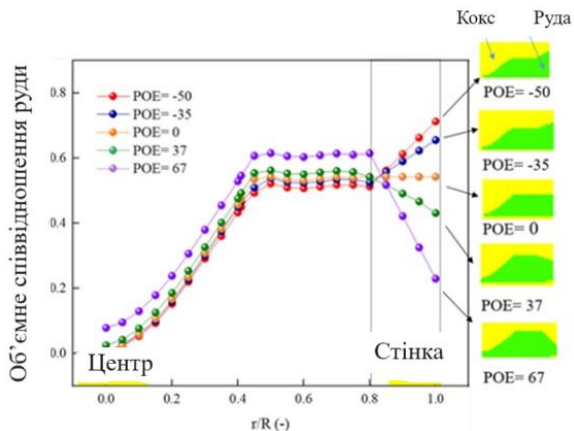


Рисунок 19 – Розподіл рудного навантаження при різних значеннях периферійної віддушини

На рис. 20 представлені графіки, які ілюструють вплив розподілу шихти, яке оцінюється за величиною РОЕ, на загальні показники роботи доменної печі, включаючи температуру чавуну, продуктивність та перепад тиску в печі, температуру колошникового газу, викиди  $\text{CO}_2$  та коефіцієнти використання. Витрата  $\text{SiH}$  (водень, який вдувається через шахту) складає  $3 \text{ Нм}^3/\text{с}$ . При збільшенні РОЕ від  $-50$  до  $67$  температура чавуну спочатку плавно підвищується до максимуму (при РОЕ = 0), а потім різко падає (рис.20, а). З іншої сторони, продуктивність (рис. 20 (б)) спочатку знижується, а потім збільшується, маючи протилежну температурі чавуну тенденцію зміни. Крім того, більший РОЕ

призводить до зменшення перепаду тиску у доменній печі (рис. 20 (б)) та більш низькій температурі колошникового газу (рис. 20 (в)). Збільшення РОЕ покращує газопроникність шару шихти у пристінковій зоні, у зв'язку з чим перепад тиску зменшується. Зміну викидів CO<sub>2</sub> на тону чавуну представлено на рис. 20 (в), з розгляду якого випливає, що викиди зростають при збільшенні РОЕ. При цьому у міру збільшення РОЕ коефіцієнти використання СО та Н<sub>2</sub> демонструють протилежні тенденції – перший збільшується, а другий зменшується (рис. 20 (г)).

Оптимальна величина периферійної віддушини (РОЕ = 0), на думку авторів, визначається по максимальній температурі чавуну, відносно низькому перепаду тиску у шарі та хорошему використанню газу, що крім інших факторів, забезпечує високі значення ефективності використання водню та продуктивності доменної печі.

Отримані авторами роботи результати досліджень свідчать про те, що надмірна периферійна віддушина не дозволяє забезпечити глибоке проникнення водню в стовп шихти. Не допустити різке збільшення перепаду тиску в печі при відносно рівномірному розподілу рудного навантаження дозволяє осьова віддушина.

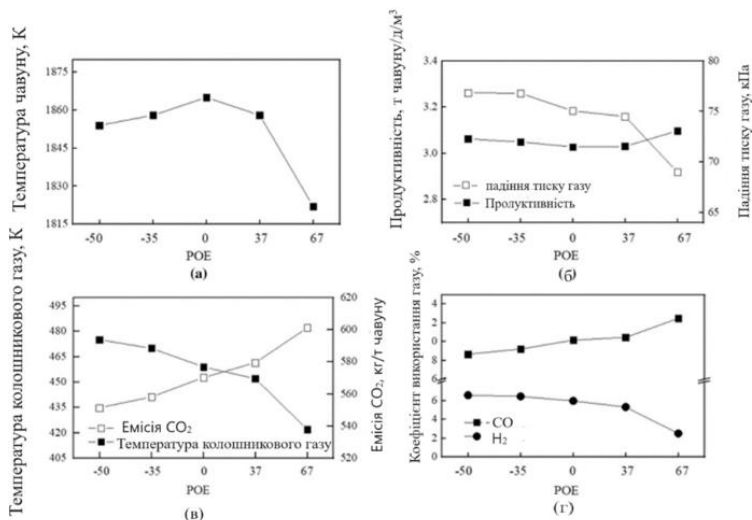


Рисунок 20 – Загальні показники ефективності в залежності від РОЕ: (а) температура чавуну, (б) продуктивність та перепад тиску у шарі, (в) температура колошникового газу та викиди CO<sub>2</sub> і (г) коефіцієнти використання газу

Авторами роботи також виконано дослідження впливу величини РОЕ на формування пластичної зони в доменній печі. Як показано на

рис. 21 а у міру збільшення вершина пластичної зони значно опускається, а корінь трохи піднімається. Внаслідок цього зменшується перепад тиску. На рис. 21 б показано зміну пластичної зони за різними характеристиками розподілу рудного навантаження.

З аналізу рис. 21 б видно, що при збільшенні РОЕ залізна руда перерозподіляється в зонах радіусу колошника, що призводить до більш інтенсивного перебігу газу в області стінки печі. Автори роблять висновок, що водень, що вдувається в шахту печі, в основному, обмежується периферійною областю і зміна РОЕ не покращує його проникнення в стовп шихтових матеріалів.

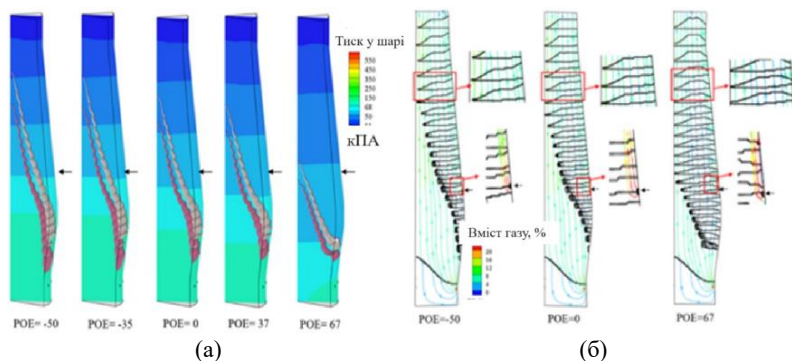


Рисунок 21 – Пластична зона (а), розподіл тиску в шарі та поля течії газу (б)

Підвищені тепловтрати та зниження газопроникності шару в результаті перерозподілу частини рудних матеріалів з периферійної області в інші радіальні зони призводять до розширення низькотемпературної зони у верхній частині доменної печі. Низькотемпературна область та менший контакт залізної руди та водню, що вдувається в шахту, знижують ступінь непрямого відновлення  $H_2$ . Результат протилежний ступеню непрямого відновлення  $CO$ , який збільшується зі збільшенням РОЕ через зниження пластичної зони. При цьому температура чавуну спочатку підвищується до максимуму, а потім різко падає зі збільшенням РОЕ, що протилежно тенденції зміни продуктивності. Таким чином, визначається оптимальний ступінь периферійної віддушини при максимальній температурі чавуну, відповідній найбільшій економії коксу, відносно низькому перепаді тиску та хорошій ефективності використання  $H_2$  та  $CO$ . Оптимальний розподіл шихти при умовах, що розглядаються, має рівномірну товщину шару коксу та руди у стінки печі.

Авторами також виконана оцінка ступеня непрямого відновлення для різних газів -  $CO$ , що генерується в горні, водень, що вдувається в шахту

печі, і водень, що вдувається в горн (рис. 22). З рис. 22 видно, що в міру збільшення РОЕ загальний ступінь непрямого відновлення спочатку збільшується до максимуму, а потім зменшується, демонструючи аналогічну тенденцію зміни температури чавуну (рис. 20 (а)). На відміну від цього, характер зміни прямого відновлення, що відбувається в пластичній зоні та в області нижче за неї, протилежний зміни непрямого відновлення. При більшому ступені прямого відновлення витрачається більше коксу, отже збільшується кількість залізної руди, що підвищує продуктивність. Ступінь непрямого відновлення та температура чавуну характеризуються однаковою тенденцією зміни. На рис. 22 також показано, що ступінь непрямого відновлення воднем, що вдувається через фурму та в шахту печі, мають таку ж тенденцію, що і загальний коефіцієнт непрямого відновлення. Ця тенденція протилежна тенденції непрямого відновлення СО при відносно великих значеннях РОЕ. Ці результати добре узгоджуються з ефективністю використання газу, яка показана на рис. 20 (г). Таким чином, велике РОЕ покращує периферійний потік газу та ослаблює центральний потік газу, зменшуючи висоту пластичної зони і, таким чином, збільшуючи суху зону. Ця ситуація посилює непряме відновлення СО та перешкоджає непрямому відновленню Н<sub>2</sub>. З аналізу витікає, що надмірна периферійна віддушина знижує ступінь непрямого відновлення, що накладає обмеження на її розміри. У сукупності з периферійною віддушиною на межі використання водню в доменній печі впливає також величина осьової віддушини. Оптимізація величини осьової віддушини дозволить збільшити витрату водню, що вдувається в піч.

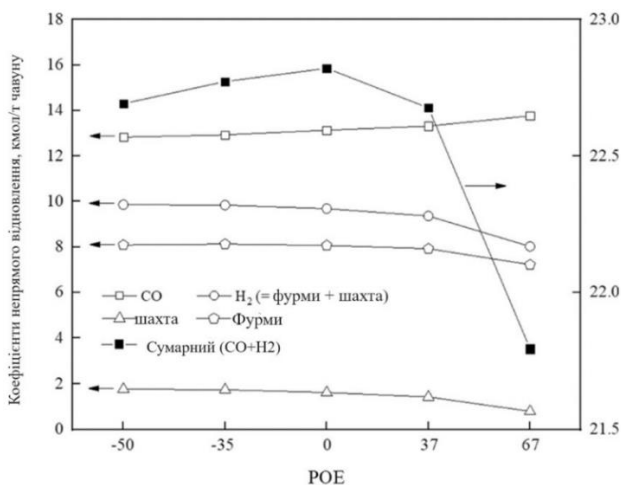


Рисунок 22 – Коефіцієнти непрямого відновлення в залежності від РОЕ

В результаті виконаних авторами за допомогою математичної моделі досліджень встановлено, що на ефективність використання  $H_2$  впливає РОЕ, а не витрата водню, що вдувається в шахту печі. Збільшення витрати водню, що вдувається в шахту, покращує проникнення водню в стовп шихти, однак у меншій мірі, ніж збільшення РОЕ.

### **Висновки**

За результатами досліджень особливостей поведінки водню, що вдувається в доменну піч, або водневмісних газів та їх впливу на технологічний режим доменної плавки, які виконані різними вченими, можна зробити наступні висновки:

1. Дослідження з вивчення характеру розподілу водню або водневмісних газів по перерізу печі та їх впливу на технологію доменної плавки можна класифікувати наступним чином:

- експериментальні дослідження на промислових об'єктах;
- дослідження на експериментальних доменних печах;
- чисельні дослідження за допомогою математичних моделей.

2. Водень, як відновник, має різні переваги у зрівнянні з вуглецем. Крім зниження викидів  $CO_2$ , переваги, пов'язані з  $H_2$  порівняно з традиційним відновлювальним газом ( $CO$ ) в доменній печі, включають більш високий ступінь непрямого відновлення, більш високий коефіцієнт дифузії, що забезпечує більш швидку доставку реагенту до місця реакції, більшу провідність, що полегшує міжфазний теплообмін, більш низьку в'язкість та щільність, зниження тиску у стовпі шихти та екологічність. Однак існує низка обмежень щодо використання великих витрат водню в доменній печі. Водень не може замінити весь вуглець, оскільки певна кількість коксу необхідна для підтримки відповідної проникності печі. Крім того, відновлення оксидів заліза воднем представляє собою ендотермічну реакцію, проведення якої потребує додаткового тепла. З цього випливає, що повинна існувати межа використання водню в доменній печі, що є предметом досліджень вчених.

3. Через обмеження на мінімальну температуру колошникового газу та максимальний вміст кисню у дутті кількість водневмісних газів, яку можна вдувати через повітряні фурми, обмежено. Реалізація паралельного вдування в шахту буде сприяти збільшенню використання водню в доменній печі, що потребує проведення подальших досліджень.

4. Як показали результати виконаних експериментальних

досліджень на промислових доменних печах та в лабораторних умовах, а також за допомогою математичних моделей вдування водневмісних газів збільшує продуктивність доменної печі та зменшує витрату коксу.

5. Як показали результати досліджень, еквівалентна заміна природного газу коксовим з точки зору збереження сталості теплового стану та газодинаміки печі близька до 1:2. При заміні природного газу коксовим збільшується порізність коксової насадки, розпушуванню якої сприяє збагачення дуття киснем, а зменшенню порізності – підвищення температури дуття та витрати природного газу.

6. Уявлення про розподіл водню неоднозначні і часом суперечливі. Результати низки досліджень показують, що глибина проникнення  $H_2$  обмежена, він в основному концентрується в області стінки печі, піднімаючись з потоком газу, і газ, що вдувається, може не досягати центру доменної печі. Для підвищення ефективності використання відновлювального газу в доменній печі необхідно збільшити глибину проникнення водневмісного газу та контролювати розподіл газового потоку в доменній печі. Згідно з альтернативними думками дослідників, кількість водню зменшується від осі (де значення  $H_2$  максимально) до стінки печі.

7. Процес доменної плавки внаслідок вдування водню, або водневмісних газів зазнає значних змін порівняно з традиційним процесом виплавки чавуну. Тому робота доменної печі з використанням водню потребує оптимізації, одним із основних напрямків якої є програма завантаження шихти стосовно цих умов.

#### **Перелік посилань**

1. Lan Chenchen, Hao Yuejun, Shao Jiannan, Zhang Shuhui, Liu Ran and Lyu Qing. Effect of  $H_2$  on Blast Furnace Ironmaking. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 11, 1864. <https://doi.org/10.3390/met12111864>

2. Yanbiao Chen, Haibin Zuo. Review of hydrogen-rich ironmaking technology in blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*. 2021. Vol. 48, Iss. 6. P. 749-768. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1909992>

3. Xinyu Zhang, Kexin Jiao, Jianliang Zhang, Ziyu Guo. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. *Cleaner Production*. Vol. 306, 127259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259>.

4. Florent Mauret, Mehdi Baniasadi, Henrik Saxe'n, Andreas Feiterna, Stephan Hojda. Impact of Hydrogenous Gas Injection on the Blast Furnace Process: A Numerical Investigation. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. Vol. 54, P. 2137–2158.

5. Li H., Chen J. An Analysis of Long-Process Ironmaking in a Reduction Smelting Furnace with Hydrogen-Enriched Conditions. *Metals* 2023. Vol. 13, 1756. <https://doi.org/10.3390/met13101756>

6. Доменная плавка с вдуванием коксового газа /В. Ф. Пашинский, И. Г. Товаровский, П. Е. Коваленко, Н. Г. Бойков. К. :Техника. 1991. 104 с.

7. Li J., Kuang S., Zou R. et al. Numerical Investigation of Burden Distribution in Hydrogen Blast Furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022. Vol. 53, P. 4124–4137. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02672-6>.

8. Ziguang Zhao, Xiaobing Yu, Yuntao Li, Jinming Zhu, Yansong Shen. CFD study of hydrogen co-injection through tuyere and shaft of an ironmaking blast furnace. *Fuel*. 2023. Vol. 348, 128641.

9. Shiro Watakabe, Kazuya Miyagawa, Shinroku Matsuzaki, Takanobu Inada, Yukio Tomita, Koji Saito, Masao Osame, Peter Sikström, Lena Sundqvist Ökvist, Jan-Olov Wikstrom. Operation Trial of Hydrogenous Gas Injection of COURSE50 Project at an Experimental Blast Furnace. *ISIJ International*. 2013. Vol. 53. Iss. 12. P. 2065–2071. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.2065>

10. Su Y. H. Development status and suggestions of hydrogen metallurgy in China's iron and steel industry. *China Metall. News*. 2021.

11. Tang J., Chu M. S., Li F., Feng C., Liu Z. G., Zhou Y. S. Development and progress on hydrogen metallurgy. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2020, Vol. 27. No. 6. P. 713–723. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>

12. Nathan Barrett, Subhasish Mitra, Hamid Doostmohammadi, Damien O'dea, Paul Zulli, Sheng Chew, Tom Honeyands. Assessment of Blast Furnace Operational Constraints in the Presence of Hydrogen Injection. *ISIJ International*. 2022, Vol. 62. Iss. 6. P. 1168-1177. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-574>.

13. Nogami H., Kashiwaya Y., Yamada D. Simulation of Blast Furnace Operation with Intensive Hydrogen Injection. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52 Iss. 8. P. 1523-1527. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1523>

14. Mathematical simulation and life cycle assessment of blast furnace operation with hydrogen injection under constant pulverized coal injection / J. Tang, M. Chu, F. Li, Z. Zhang, Y. Tang, Z. Liu, J. Yagi. *J. Clean. Prod.* 2021. Vol. 278, 123191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123191>

15. Long H. M., Wang H., Zhao W., Li J. X., Liu Z., Wang P. Mathematical simulation and experimental study on coke oven gas injection aimed to low carbon blast furnace ironmaking. *Ironmaking Steelmaking*. 2016. Vol. 43, Iss. 6. P. 450–457. <https://doi.org/10.1080/03019233.2015.1108480>

16. Castro J. A., Takano C., Yagi J.-i. A theoretical study using the multiphase numerical simulation technique for effective use of H<sub>2</sub> as blast furnaces fuel. *Mater. Res. Technol.* 2017. Vol. 6, Iss. 3, P. 258-270. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.05.007>

17. Wang H., Chu M., Bi C., Liu Z., Dai W. Effects of Hydrogen-Enriched Reduction on Metallurgical Properties of Iron-Bearing Burdens Under BF Operation with COG Injection. *8th Int. Symp. on High-Temperature Metallurgical Processing*. Springer, Cham, 2017, 21. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51340-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51340-9_3)

18. Tang J., Chu M., Li F., Feng C., Liu Z.-g., Zhou Y.-s. Development and progress on hydrogen metallurgy. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2020. Vol. 27. No. 6. P. 713–723. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>

19. Sato Michitaka, Takahashi Koichi, Nouchi Taihei, AriyamaTatsuro. Prediction of Next-Generation Ironmaking Process Based on Oxygen Blast Furnace Suitable for CO<sub>2</sub> Mitigation and Energy Flexibility. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55. Iss. 10. P. 2105–2114. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-264>

20. Higuchi S., Matsuzaki K., Saito K., Nomura S. Improvement in Reduction Behavior of Sintered Ores in a Blast Furnace through Injection of Reformed Coke Oven Gas. *ISIJ Int.* 2020. Vol. 60. Iss. 10. P. 2218–2227. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-063>

21. Wang H., Chu M., Guo T., Zhao W., Feng C., Liu Z., Tang J. Mathematical Simulation on Blast Furnace Operation of Coke Oven Gas Injection in Combination with Top Gas Recycling. *Steel Res. Int.* 2016. Vol. 87. No. 5. P. 1611–3683. <https://doi.org/10.1002/srin.201500372>

22. Tang J., Chu M., Li F., Zhang Z., Tang Y., Liu Z., Yagi J. Mathematical simulation and life cycle assessment of blast furnace operation with hydrogen injection under constant pulverized coal injection: *Journal of Cleaner Production.* 2021. Vol. 278, 123191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123191>

23. Okosun T., Nielson S., Zhou C. Blast Furnace Hydrogen Injection: Investigating Impacts and Feasibility with Computational Fluid Dynamics. *JOM.* 2022. Vol. 74. P. 1521–1532. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05177-4>

24. Jing Li, Shibo Kuang, Lulu Jiao, Lingling Liu, Ruiping Zou, Aibing Yu. Numerical modeling and analysis of hydrogen blast furnace ironmaking process. *Fuel.* 2022. Vol. 323, 124368.

25. Investigating hydrogenous gas injection into the blast furnace shaft and tuyere / M. Baniasadi, F. Mauret, K.-P. Kinzel, P. Bermes, M. Baniasadi, C. Castagnola, H. Saxén, S. Hojda, R. Lin // 8th ECIC & 9th ICSTI Conferences, August 2022, Bremen, Germany.

26. Hiroshi Nogami, Yoshiaki Kashiwaya and Daisuke Yamada. Simulation of Blast Furnace Operation with Intensive Hydrogen Injection. *ISIJ International.* 2012. Vol. 52. No. 8. P. 1523–1527.

27. Martino Guilherme, Marchal Emmanuel. The environmental impacts of hydrogen injection in a blast furnace. Консалтинговая фирма, Бразилия. October 07, 2021. <https://www.cassotis.com/insights/environmental-impacts-hydrogen-blast-furnace>

28. Chu Mansheng, Nogami Hiroshi, Yagi Jun-ichiro. Numerical Analysis on Injection of Hydrogen Bearing Materials into Blast Furnace. *ISIJ International.* 2004. Vol. 44. Iss. 5. P. 801-808

29. Li, Z., Kuang, S., Yu, A. et al. Numerical Investigation of Novel Oxygen Blast Furnace Ironmaking Processes. *Metall Mater Trans B.* 2018. Vol. 49. P. 1995–2010. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1259-y>

30. Yu X., Shen Y. Numerical Study of the Influence of Burden Batch Weight on Blast Furnace Performance. *Metall Mater Trans B.* 2020. Vol. 51. P 2079–2094. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01924-7>.

## References

1. Chenchen, L., Yuejun, H., Jiannan, S., Shuhui, Z., Ran, L., & Qing, L. (2022). Effect of H<sub>2</sub> on blast furnace ironmaking. *Metals*, 12(11), 1864. <https://doi.org/10.3390/met12111864>

2. Yanbiao, C. & Haibin, Z. (2021). Review of hydrogen-rich ironmaking technology in blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*, 48(6), 749–768. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1909992>

3. Zhang, X., Jiao, K., Zhang, J., & Guo, Z. (2021). A review on low carbon



emissions projects of steel industry in the world. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259>

4. Mauret, F., Baniyasi, M., Saxén, H., Feiterna, A., & Hojda, S. (2023). Impact of hydrogenous gas injection on the blast furnace process: A numerical investigation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 54, 2137–2158

5. Li, H., & Chen, J. (2023). An analysis of long-process ironmaking in a reduction smelting furnace with hydrogen-enriched conditions. *Metals*, 13, 1756. <https://doi.org/10.3390/met13101756>

6. Pashynskiy, V. F., Tovarovskyi, I. H., Kovalenko, P. Ye., & Boikov, M. H. (1991). *Domennaya plavka s vduvaniem koksovogo haza*. Tekhnika.

7. Li, J., Kuang, S., Zou, R., et al. (2022). Numerical investigation of burden distribution in hydrogen blast furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 53, 4124–4137. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02672-6>

8. Zhao, Z., Yu, X., Li, Y., Zhu, J., & Shen, Y. (2023). CFD study of hydrogen co-injection through tuyere and shaft of an ironmaking blast furnace. *Fuel*, 348, 128641

9. Watakabe, S., Miyagawa, K., Matsuzaki, S., Inada, T., Tomita, Y., Saito, K., Osame, M., Sikström, P., Ökvist, L. S., & Wikstrom, J.-O. (2013). Operation trial of hydrogenous gas injection of COURSE50 project at an experimental blast furnace. *ISIJ International*, 53(12), 2065–2071. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.2065>

10. Su, Y. H. (2021). Development status and suggestions of hydrogen metallurgy in China's iron and steel industry. *China Metall. News*.

11. Tang, J., Chu, M. S., Li, F., Feng, C., Liu, Z. G., & Zhou, Y. S. (2020). Development and progress on hydrogen metallurgy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(6), 713–723. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>

12. Barrett, N., Mitra, S., Doostmohammadi, H., O'dea, D., Zulli, P., Chew, S., & Honeyands, T. (2022). Assessment of blast furnace operational constraints in the presence of hydrogen injection. *ISIJ International*, 62(6), 1168–1177. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-574>

13. Nogami, H., Kashiwaya, Y., & Yamada, D. (2012). Simulation of blast furnace operation with intensive hydrogen injection. *ISIJ International*, 52(8), 1523–1527. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1523>

14. Tang, J., Chu, M., Li, F., Zhang, Z., Tang, Y., Liu, Z., & Yagi, J. (2021). Mathematical simulation and life cycle assessment of blast furnace operation with hydrogen injection under constant pulverized coal injection. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123191>

15. Long, H. M., Wang, H., Zhao, W., Li, J. X., Liu, Z., & Wang, P. (2016). Mathematical simulation and experimental study on coke oven gas injection aimed to low carbon blast furnace ironmaking. *Ironmaking Steelmaking*, 43(6), 450–457. <https://doi.org/10.1080/03019233.2015.1108480>

16. Castro, J. A., Takano, C., & Yagi, J. (2017). A theoretical study using the multiphase numerical simulation technique for effective use of H<sub>2</sub> as blast furnace fuel. *Materials Research Technology*, 6(3), 258–270. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.05.007>

17. Wang, H., Chu, M., Bi, C., Liu, Z., & Dai, W. (2017). Effects of hydrogen-enriched reduction on metallurgical properties of iron-bearing burdens under BF operation with COG injection. *8th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51340-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51340-9_3)
18. Tang, J., Chu, M., Li, F., Feng, C., Liu, Z. G., & Zhou, Y. S. (2020). Development and progress on hydrogen metallurgy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(6), 713–723. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>
19. Sato, M., Takahashi, K., Nouchi, T., & Ariyama, T. (2015). Prediction of next-generation ironmaking process based on oxygen blast furnace suitable for CO<sub>2</sub> mitigation and energy flexibility. *ISIJ International*, 55(10), 2105–2114. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-264>
20. Higuchi, S., Matsuzaki, K., Saito, K., & Nomura, S. (2020). Improvement in reduction behavior of sintered ores in a blast furnace through injection of reformed coke oven gas. *ISIJ International*, 60(10), 2218–2227. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-063>
21. Wang, H., Chu, M., Guo, T., Zhao, W., Feng, C., Liu, Z., & Tang, J. (2016). Mathematical simulation on blast furnace operation of coke oven gas injection in combination with top gas recycling. *Steel Research International*, 87(5), 1611–3683. <https://doi.org/10.1002/srin.201500372>
22. Tang, J., Chu, M., Li, F., Zhang, Z., Tang, Y., Liu, Z., & Yagi, J. (2021). Mathematical simulation and life cycle assessment of blast furnace operation with hydrogen injection under constant pulverized coal injection. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123191>
23. Okosun, T., Nielson, S., & Zhou, C. (2022). Blast furnace hydrogen injection: Investigating impacts and feasibility with computational fluid dynamics. *JOM*, 74, 1521–1532. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05177-4>
24. Jing Li, Shibo Kuang, Lulu Jiao, Lingling Liu, Ruiping Zou, & Aibing Yu. (2022). Numerical modeling and analysis of hydrogen blast furnace ironmaking process. *Fuel*, 323, 124368.
25. Baniyadi, M., Mauret, F., Kinzel, K.-P., Bermes, P., Castagnola, C., Saxén, H., & Hojda, S. (2022). Investigating hydrogenous gas injection into the blast furnace shaft and tuyere. *8th ECIC & 9th ICSTI Conferences. Bremen, Germany*.
26. Nogami, H., Kashiwaya, Y., & Yamada, D. (2012). Simulation of blast furnace operation with intensive hydrogen injection. *ISIJ International*, 52(8), 1523–1527.
27. Martino, G., & Marchal, E. (2021). *The environmental impacts of hydrogen injection in a blast furnace*. Consulting Report. Brazil: Cassotis.
28. Chu, M., Nogami, H., & Yagi, J.-I. (2004). Numerical analysis on injection of hydrogen-bearing materials into blast furnace. *ISIJ International*, 44(5), 801–808.
29. Li, Z., Kuang, S., Yu, A., et al. (2018). Numerical investigation of novel oxygen blast furnace ironmaking processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 49, 1995–2010. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1259-y>
30. Yu, X., & Shen, Y. (2020). Numerical study of the influence of burden batch weight on blast furnace performance. *Metallurgical and Materials Transactions B*,

51, 2079–2094. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01924-7>

**I. H. Muravyova**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Leading Researcher, ORCID 0000-0001-5926-7787

**O. L. Chaika**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-1678-2580

**M. H. Ivancha**<sup>1</sup>, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5366-9328

**B. V. Kornilov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5544-3023

**O. Ye. Merkulov**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

**O. S. Nesterov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0183-0327

**L. I. Harmash**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6873-6685

**V. I. Vishnyakov**<sup>1</sup>, Researcher, ORCID 0000-0002-5538-6962

**V. R. Shcherbachov**<sup>1</sup>, Junior Researcher, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-6734-0451

**K. P. Yermolina**<sup>1</sup>, Lead Engineer, ORCID 0000-0001-6819-9886

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

### **SUMMARY OF RESEARCH RESULTS ON THE EFFECT OF INCREASING HYDROGEN CONTENT IN THE BLAST AND ITS DISTRIBUTION ACROSS THE BLAST FURNACE RADIUS ON THE TECHNOLOGICAL MODE OF BLAST FURNACE SMELTING**

**Abstract.** A promising pathway to achieving carbon neutrality while preserving the traditional blast furnace technology for pig iron production lies in the development and implementation of breakthrough innovations in technology, particularly involving the use of hydrogen as a reducing agent and heat source. The use of hydrogen-containing fuel in pig iron production results in significant changes in blast furnace smelting technology, especially in the thermal and reduction processes occurring in the furnace. Enhancing the understanding of these processes when using hydrogen-enriched blast additives and scientifically justifying their optimal quantities to ensure the maximum utilization of hydrogen are critical tasks in developing scientifically substantiated technological principles for using hydrogen in blast furnaces. The development of these principles must be based on research results that examine the effect of increasing hydrogen content in the blast and its distribution across the blast furnace radius on the technological mode of blast furnace smelting. These studies have been conducted by researchers from various countries. The purpose of this research is to summarize and systematize the results of studies on the effect of increasing hydrogen content in the blast and its distribution across the blast furnace radius on the technological mode of blast furnace smelting. The experience of using hydrogen-containing gases in the blast furnace process is reviewed. An analysis of research results regarding the distribution of hydrogen or hydrogen-containing gases across the furnace cross-section and their impact on blast furnace smelting technology is conducted. These studies are categorized as follows: experimental studies on industrial facilities, studies on experimental blast furnaces, numerical studies using mathematical models. The results of experimental studies conducted on industrial blast furnaces and in laboratory conditions, as well as through mathematical modeling, have demonstrated that injecting hydrogen-containing gases increases blast furnace productivity and reduces coke consumption. However, the understanding of hydrogen distribution is ambiguous and sometimes contradictory. The results of some studies

indicate that the penetration depth of H<sub>2</sub> is limited, with hydrogen primarily concentrating in the furnace wall region, rising with the gas flow, and the injected gas may not reach the furnace center. To enhance the efficiency of hydrogen gas utilization in the blast furnace, it is necessary to increase the penetration depth of hydrogen-containing gas and control the distribution of the gas flow within the furnace. According to alternative viewpoints, the amount of hydrogen decreases from the furnace axis (where H<sub>2</sub> levels are highest) toward the walls. The blast furnace smelting process undergoes significant changes compared to the traditional pig iron production process when hydrogen or hydrogen-containing gases are injected. Therefore, operating a blast furnace with hydrogen requires optimization, with one of the key focus areas being the burden charging program tailored to these conditions.

**Key words:** blast furnace smelting, decarbonization, hydrogen-containing gases, hydrogen or hydrogen-containing gas distribution across the furnace cross-section.

**For citation:** Muravyova, I. H., Chaika, O. L., Ivancha, M. H., Kornilov, B. V., Merkulov, O. Ye., Nesterov, O. S., Harmash, L. I., Vishnyakov, V. I., Shcherbachov, V. R., Yermolina, K. P. (2024). Summary of research results on the effect of increasing hydrogen content in the blast and its distribution across the blast furnace radius on the technological mode of blast furnace smelting. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 59-102. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-59-102>

Стаття надійшла до редакції збірника 29.09.2024 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)