

**Ю.С. Семенов**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2299-5742>, Web of Science ResearcherID: S-4494-2017

**В.В. Горупаха**, наук. співр., e-mail: viktor.horupakha@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0531-1871>, Web of Science ResearcherID: HKV-9399-2023

**С.В. Ващенко**, канд. техн. наук, ст. дослідник, ст. наук. співр., e-mail: sergeyvaschenko.sv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8344-961X>, Web of Science ResearcherID: ABC-8515-2021

**Є.І. Шумельчик**, канд. техн. наук, ст. дослідник, ст. наук. співр., e-mail: ievgen.shumelchik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5350-6425>, Web of Science ResearcherID: ABC-8657-2021

**О.Ю. Худяков**, канд. техн. наук, ст. дослідник, ст. наук. співр., e-mail: khudyakovsashko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6507-1120>, Web of Science ResearcherID: ABC-8381-2021

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

## Досвід спільного вдування пиловугільного палива і природного газу в горн доменної печі в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

У статті наведено аналіз практичних і аналітичних результатів способів спільного вдування пиловугільного палива (ПВП) та природного газу (ПГ) в горн доменних печей американських дослідників і практиків. Аналіз показує перевагу подачі природного газу, як і пиловугільного палива, через спис у дуттєвий канал фурменого приладу. Представлено вперше отримані в Україні практичні результати спільного вдування в горн доменної печі пиловугільного палива та природного газу в нестабільних шихтових та паливних умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Практичними експериментами доведено ефективність такого вдування, коли паливні добавки вдуваються на відокремлені списи в дуттєвий канал фурменого приладу, причому спис природного газу відводиться так, що його згоряння відбувається перед початком вдування пиловугільного палива в дуттєвий канал. Ефективність практичного застосування способу спільного вдування пиловугільного палива та природного газу виражена у зниженні питомої витрати коксу на 10,3 кг/т (або 2,85 %) при витратах ПВП — 153,4 кг/т та ПГ — 24,5 м<sup>3</sup>/тонну чавуну. Отримані результати дозволяють рекомендувати такий спосіб вдування паливних добавок за прийнятних цінових умов, а також на інших підприємствах, що працюють з кращими умовами забезпечення високої температури гарячого дуття — понад 1050 °С. В результаті виконаних аналітичних досліджень встановлено, що: сопла з двома підводами для природного газу та пиловугільного палива, які забезпечують введення природного газу у дуттєвий канал раніше пиловугільного палива, сприяють максимальній швидкості вигорання останнього у потоці дуття; при такому способі вдування відбувається згоряння більшої кількості метану природного газу, виділяється більше тепла внаслідок реакції горіння, що призводить до збільшення температури дуття на виході з фурми.

**Ключові слова:** доменна піч, пиловугільне паливо, природний газ, питома витрата коксу, температура гарячого дуття.

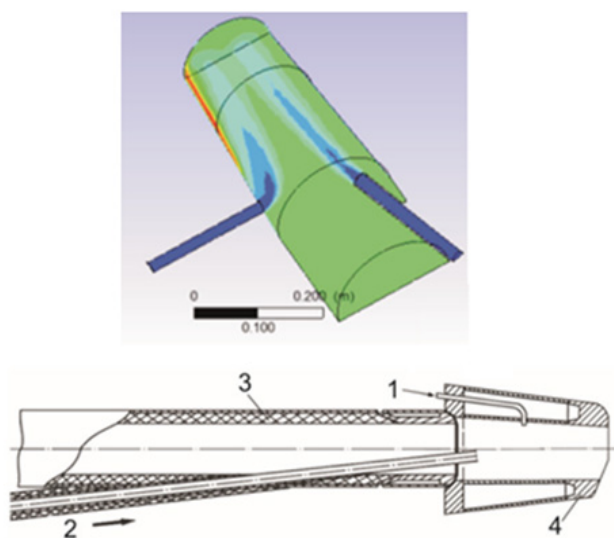
**Вступ.** Нестабільність шихтових та паливних умов доменного виробництва, особливо в Україні, останнім часом зумовлює розробку нових та вдосконалення відомих технологічних та технічних рішень [1—8]. Традиційною цільовою функцією при виробництві чавуну є скорочення питомої витрати коксу шляхом часткової його заміни природним газом (ПГ), пиловугільним паливом (ПВП), а також спільним використанням цих палив.

Як показує аналіз літературних даних, практичних спостережень і результатів математичного

моделювання, ефективність технології спільного вдування ПГ і ПВП в доменну піч (ДП) полягає або в економії коксу, або коксового еквівалента за рахунок збільшення коефіцієнтів заміни коксу паливними реагентами [9, 10]. У гіршому випадку можуть зберігатися витрати коксу та коксового еквівалента зі зміною (перерозподілом) коефіцієнтів заміни (КЗ) коксу у ПГ та ПВП. Це пояснюється, насамперед тим, що ПГ виконує роль летючих складових, займаючись раніше ПВП, він сприяє прискоренню прогріву частинок вугілля з підвищенням швидкості згоряння ву-

глецю. Спільне вдування ПВП і ПГ набуло широкого застосування у США. При цьому, як мінімум, останні 15 років ПВП і ПГ вдуваються у США у фурму через відокремлені списи [11].

Традиційне підведення ПГ через патрубок у порожнину фурми використовується нині лише на комбінатах пострадянського простору. Конструктивні особливості такого способу подачі ПГ особливо при малих (до 50 м<sup>3</sup>/т чавуну) його кількостях забезпечують низьку швидкість ПГ в потоці дуття, не сприяють достатньому перемішуванню ПГ з ПВП в порожнині повітряної фурми і створюють умови для піролізу метану вздовж поверхні внутрішньої стінки охолоджуваної фурми, а процес окислення-горіння відбувається лише в поверхневих шарах, що розвиваються (дифузійний режим горіння), див. рис. 1: приклад спільного вдування на ДП [12]. При такому підведенні ПГ і ПВП всередині фурми частково встигають пройти процеси нагрівання частинок ПВП, виділення і, можливо, часткового горіння летючих речовин, а також неповного нагріву коксового залишку (без його горіння).



**Рис. 1.** Спільне вдування ПГ та ПВП на підприємствах пострадянського простору [12]: 1 — подача ПГ; 2 — подача ПВП; 3 — сопло; 4 — повітряна фурма

Відомі результати спільного вдування ПГ та ПВП на відокремлені списи на ДП великого об'єму кампанії АрселорМіттал (США, Чикаго, 2012 р.). Вдування здійснювалося на 40 повітряних фурм (ПФ). Розташування списів у фурмі здійснювалося без зсувів у горизонтальному перерізі один щодо одного (рис. 2) [11].

Відповідно до матеріалів публікації [11] були досягнуті оптимальні співвідношення витрат паливних добавок, виходячи із цін кожного в цей період: витрата природного газу — 35 кг/т, коксу спільно з коксовим горіхом — 300 кг/т, ПВП — 160 кг/т. У статті [11] також зазначено, що напередодні спільного вдування ПВП та ПГ при роботі з високою витратою ПВП (до 190 кг/т) на ДП температура колошникового газу досягала 700—900 °С у центрі печі та 60—70 °С біля стінки. При зменшенні величини осьової коксової

віддушини при сумісному вдуванні ПВП і ПГ температура колошникового газу в центрі печі зменшилася до ~ 350 °С. Фахівці ДЦ АрселорМіттал Чикаго роблять твердження, що «при спільному вдуванні ПВП і ПГ створюються умови для рівномірного окружного розподілу теоретичної температури горіння, викликані більш рівномірним відновленням заліза в печі, що дозволяє працювати при більш менших температурах колошникового газу та, як наслідок, з меншою нестабільністю ходу печі» [11].

Інші відомі публікації присвячені лише результатам математичного моделювання спільного вдування ПГ та ПВП без надання відповідних практичних напрацювань [13, 14]. Для умов роботи ДП із спільним вдуванням ПВП та ПГ на заводі АК Steel Dearborn Works (США) авторами статті методом моделювання [13] досліджено 3 варіанти способу підведення ПГ та ПВП на відокремлені списи: 1-й варіант — без зміщення списів, 2-й — зміщений в осьовому напрямку спис ПВП, розташований далі від зовнішнього торця фурми, ніж спис ПГ на 50 мм (подовжений спис ПГ) і 3-й — зміщений в осьовому напрямку спис ПВП, розташований ближче до зовнішнього торця фурми, ніж спис ПГ на 50 мм (втягнутий спис ПГ) (рис. 3).

Авторами даної статті зазначено, що всі 3 варіанти забезпечують введення ПГ поруч із введенням ПВП, що генерує значну кількість тепла від згорання та забезпечує швидше видалення летючих речовин з ПВП за рахунок швидкого його нагрівання та перетворення вуглекислого газоподібного СО. При цьому, як показано авторами статті — діаметр списа введення ПГ має більший діаметр, однак не вказана мета цієї особливості, імовірно, це або для наочності ілюстрування результатів моделювання, або для зменшення швидкості струменя ПГ.

Відзначено також, що спалювання ПГ у фурмі сприяє швидшому нагріванню ПВП, ніж від температури гарячого дуття. Температури газу та пилоподібних частинок вугілля швидко підвищуються нижче потоку від місця введення в фурму, причому більш високі температури спостерігаються в областях з високим вмістом ПГ в газовому потоці. Додаткове надходження імпульсу від введення ПГ служить для розсіювання шлейфу ПВП, коли він потрапляє в зону гарячого дуття через значне збільшення масової витрати газу. Підвищена дисперсія також служить для покращення змішування з доступним киснем у фурмі та дуттьовому каналі.

Також авторами досліджується видалення летючих частинок вугілля під час їх проходження через фурму. Відзначено, що видалення летючих компонентів ПВП посилюється зі збільшенням температури газу через горіння ПГ. Загальне видалення летючих речовин усередині фурми досягає 62,0 %, що значно вище значення 13,2 %, яке спостерігається при використанні стандартного підведення ПГ у фурму, що використовується на печах пострадянського простору та США у ХХ столітті.

Як зазначено також авторами [13] при вдуванні ПГ і ПВП на списи, споживання O<sub>2</sub> значно вище в центрі струменя, оскільки шлейф ПГ/ПВП споживає значну

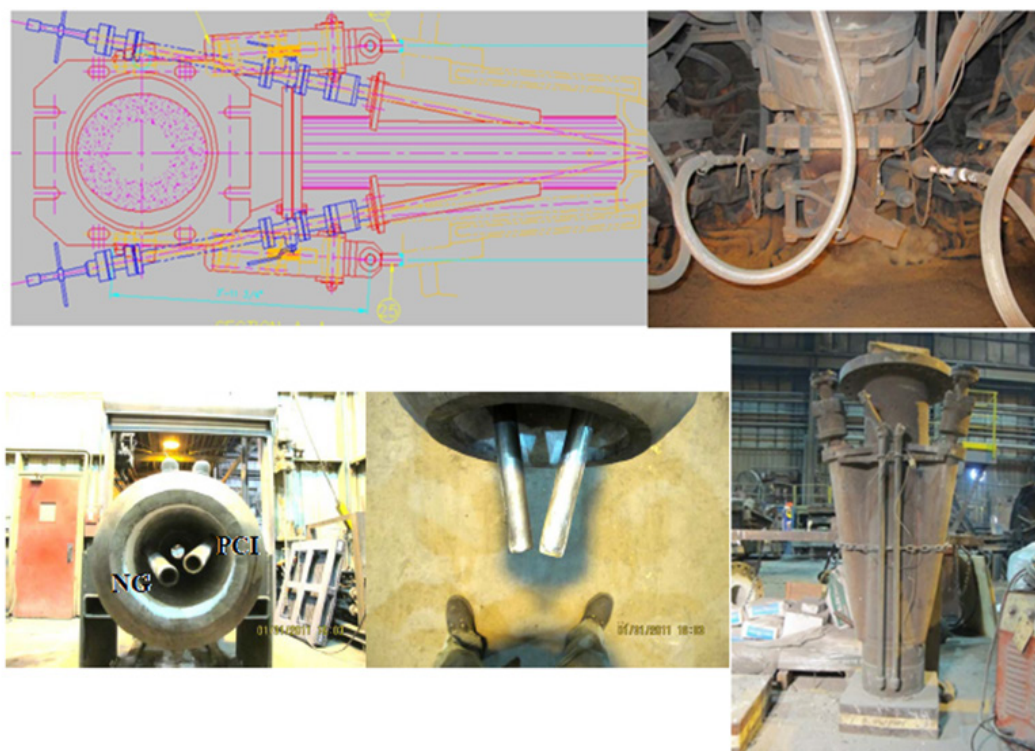


Рис. 2. Подача ПВП (PCI) та ПГ (NG) до фурм ДП великого об'єму компанії ArcelorMittal (США, Чикаго) [11]

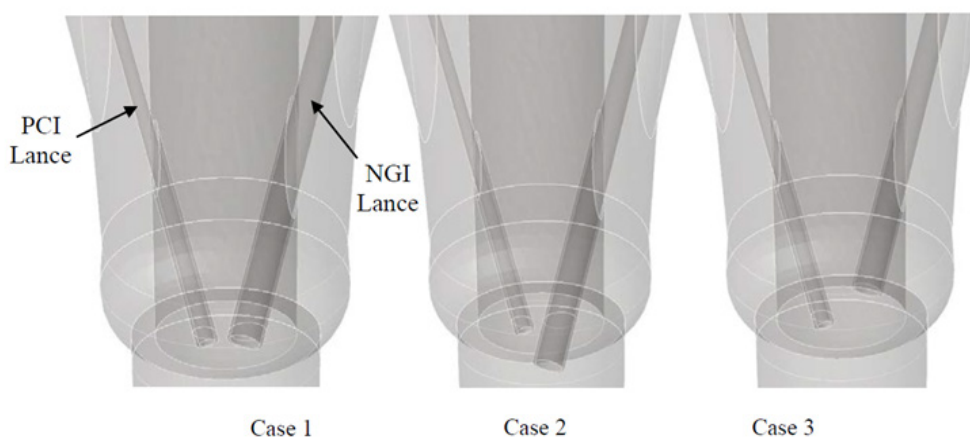


Рис. 3. Геометрія трьох варіантів подачі ПГ (NG) та ПВП (PCI) для умов експлуатації АК Steel Dearborn Works (USA) GP [13]

кількість  $O_2$ , доступного в гарячому дутті. Кисень, що залишився, проходить через верхню і нижню частини фурменого струменя і споживається ПВП, ПГ і спалюванням коксу в фурменій зоні. При спалюванні ПГ як у фурмі, так і у фурменій зоні, утворюється  $H_2O$ , яка, своєю чергою, реагує з вуглецем у шарі коксу з утворенням  $CO$  і  $H_2$ . Значна кількість  $CH_4$  залишається у струмені фурми, коли він надходить у фурмену зону, що призводить до утворення  $CO_2$  на межах фурменної зони через горіння.

Як зазначено авторами [13], за результатами моделювання, розподіл температур і загальне виділення летючих всередині фурми близький як для варіанта 1 зі списами без зсувів, так і для конструкції з «втягнутим» списом ПВП (варіант 2), проте змінюється більш значно у конструкції «подовженого» списа ПВП

(варіант 3). У варіанті 2 — 73,2 % доступної летючої речовини вивільняється всередині фурми порівняно з 62,0 % — для варіанта 1 та 60,9 % — для варіанта 3.

Проте летючі, що вивільняються всередині фурми, безпосередньо не корелюють із загальним вигоранням в області фурменної зони. Варіант 3 забезпечує найкраще повне вигорання палива у фурменій зоні зі значенням 96,7 %. Це вигідно відрізняється від варіанта 1 (89,7 %) та варіанта 2 (76,8 %). У конструкції з двома симетричними списами, ПВП більш плавно горить по краях фурменної зони, і вигорання закінчується після того, як витратиться кисень гарячого дуття. І в другому, і в третьому варіантах вигорання спочатку відбувається швидше. Однак у варіанті 2 через сегрегацію ПГ і нестачу реагентів ПВП, максимальне значення вигорання нижче. У варіанті 3 — загальне

вигорання палива покращується за рахунок збалансованої доступності кисню як для ПГ, так і для ПВП. Це призводить до більш швидкого споживання доступного кисню у фурменій зоні [13].

Таким чином, при вивченні розташувань списів ПГ та ПВП, встановлено перевагу способу, при якому відводиться спис ПГ так, що згорання ПГ відбувається перед ділянкою ПВП. Таке підведення забезпечило поліпшення загальної швидкості вигорання на 7 % за стандартних робочих умов з використанням азоту в якості газу-носія для ПВП. Також видається, що подовження списа ПГ (варіант 2) значно знижує швидкість вигорання через погане змішування ПВП та ПГ у струмені фурми. Американськими дослідниками зазначено, що це відносно невеликі зміни положення списа ПГ можуть призвести до значних змін характеристик горіння всередині ДП [13].

Отже, при вивченні перспективних розташувань списів ПГ і ПВП у дуттьовому каналі, для практичного застосування у 2021 р. на комбінаті ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» був обраний спосіб, при якому спис ПГ відводиться так, що згорання ПГ відбувається перед ділянкою ПВП.

**Результати досліджень.** Виготовлені за спільним проєктом з ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» сопла з двома підведеннями для вдування ПГ та ПВП зі зміщенням підведення для ПГ для забезпечення його вдування в робочий простір фурми раніше ПВП (на 110 мм відповідно до проєкту та за умови знаходження списів ПГ та ПВП у гаражному положенні) з метою максимального нагріву ПВП у потоці газу-повітряного дуття повною мірою відповідають уявленням про ефективність горіння паливних добавок (рис. 4—6). Подібна конструкція сопла повітряної фурми вперше була застосована на доменній печі в Україні [15].

В процесі встановлення експериментальних сопл на ДП № 1М ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» здійснювався контроль зміни перепадів температур охолоджувальної води на фурмах з експериментальними соплами, який показав, що перепади відповідали діапазонам

зміни перепадів температур фурм з соплами з одним підведенням для вдування ПВП та становили, у середньому, 10 °С. Слід зазначити, що при встановленні першого експериментального сопла з дзеркально розташованими підведеннями (без зсуву) для вдування ПГ та ПВП на ДП № 9 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» відзначалося підвищення перепадів температур води системи охолодження на фурмах до 15–18 °С. Це свідчить про перегрівання сопла при дзеркальному розташуванні підведень та призвело до прийняття рішення на користь розташування підведень зі зміщенням. У подальшому з метою експериментальних випробувань щодо наближення списа ПГ до списа ПВП у дуттьовому каналі необхідна наявність списів більшої довжини для дотримання умови їх знаходження, як для ПГ так і для ПВП, у гаражному положенні.

Слід зазначити, що відстань менше 80 мм між висхідними торцями списів з різним видом палива сприятиме зниженню ступеня його вигорання в фурменій зоні ДП через більш інтенсивне вивільнення летючих речовин, а за умови, коли ця відстань більше 200 мм — відбуватиметься незадовільне змішування ПВП та ПГ у газу-повітряному струмені дуттьового каналу фурменого приладу [15].

Дослідний період тривалістю 15 діб із спільним вдуванням ПГ та ПВП на сопла 30.05—15.06.2021 р. характеризувався такими особливостями:

— вдування ПГ здійснювалося через 16 з 20 сопл фурмених приладів, на решту ПФ подавалося лише ПВП;

— стан повітрянагрівачів дозволяв витримувати температуру гарячого дуття — 904 °С, в середньому, і нижче;

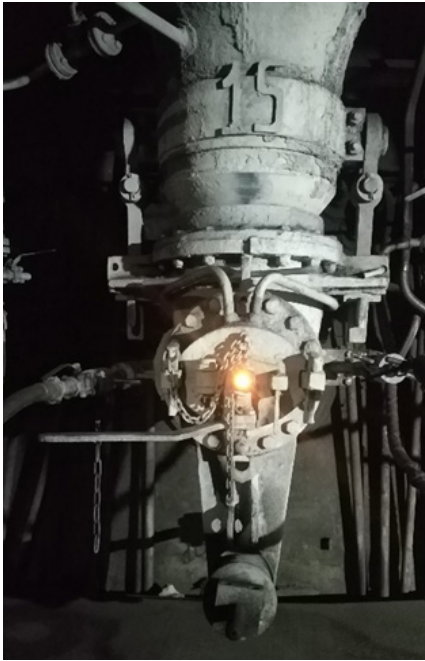
— спільне вдування ПГ та ПВП при низькій температурі гарячого дуття сприяло низькій теоретичній температурі горіння — 1967 °С, у середньому, у дослідному періоді, що обмежувало дії із заміщення коксу природним газом;

— робота з низькою температурою гарячого дуття (у тому числі напередодні дослідного періоду) і, отже,



Рис. 4.

Конструкція сопла для підведення ПГ (верхнє підведення на рис.) та ПВП (нижнє підведення на рис.) на списи для ДП № 1М ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» із забезпеченням введення ПГ у робочий простір фурми раніше за ПВП]



**Рис. 5.** Приклад встановлення сопел нової конструкції (див. рис. 4) на повітряній фурмі № 15 та повітряній фурмі № 4 ДП № 1М

з низькою теоретичною температурою горіння негативно позначилася на дренажній здатності горна, що зумовило необхідність скорочення кількості коксового горіха в шихті та застосування промивок горна;

— збільшення середньоквадратичного відхилення показника коксу (CSR) та вмісту фракції більше 80 мм негативним чином сприяло стабілізації теплового стану.

Порівняння дослідного періоду здійснювалося з двома базовими періодами, тривалістю також по 15 діб:

— базовий період № 1, що передує дослідному — 06–20.05.2021;

— базовий період № 2, після дослідного — 16.06–02.07.2021.

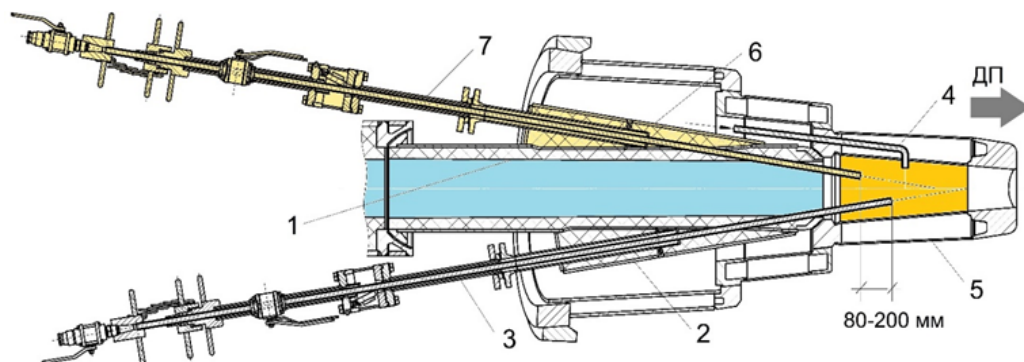
У дослідному та базових періодах виключалися періоди з тривалими простоями. Базовий період № 2 поступається періоду № 1 початковим етапом стабілізації температури гарячого дуття. У табл. 1 та 2 представлено результати порівняння дослідного періоду з двома базовими при максимальному обліку всіх технологічних факторів та при використанні коефіцієнтів заміни (КЗ) коксу для ПГ = 0,8 од. та для ПВП = 0,9 од. [16, 17].

Відповідно до результатів порівняльного аналізу (табл. 1 та табл. 2) слідє, що при використанні КЗ ПГ = 0,8 од. та КЗ ПВП = 0,9 од. при зіставленні дослідного періоду з базовим періодом № 1 отримано економію коксу 12,9 кг/т — за умови роботи базового періоду № 1 в умовах дослідного. При зіставленні дослідного періоду з базовим періодом № 2 отримано економію коксу 7,7 кг/т — за умови роботи базового періоду № 2 в умовах дослідного.

Отримана економія коксу пояснюється, перш за все, збільшенням повноти спалювання ПВП. Слід зазначити також, що при проходженні ПГ через сопло має місце його підігрів (на ~50 °С), у зв'язку з відсутністю водяного охолодження сопел, що також сприятливим чином сприяє збільшенню повноти спалювання ПВП за рахунок збільшення швидкості та температури газо-дуттєвої суміші та не вимагає додаткових заходів щодо підігріву ПГ [18].

Наступним етапом досліджень було виконання математичного моделювання з використанням сучасних програмних продуктів [19—21] та моделей досліджуваного періоду роботи ДП № 1М з вдуванням ПГ та ПВП на відокремлені списи (варіант III) у порівнянні зі способом вдування ПГ на фурму традиційним способом (варіант I) і з вдуванням тільки ПВП (варіант II) для однакових (близьких) технологічних умов. Згідно з отриманими результатами було зроблено наступні висновки:

- у традиційному варіанті подачі ПГ він притискається до холодної стінки фурми потоком гарячого дуття, тоді як при подачі ПГ на спис він прямує до осі фурми, створюючи умови для кращого змішування з дуттям;
- при спільному вдуванні ПВП та ПГ на відокремлені списи відбувається згорання більшої кількості  $\text{CH}_4$ , виділяється більше тепла в результаті реакції горіння, що призводить до збільшення температури дуття на виході з фурми;
- більш інтенсивне тепловиділення при горінні ПГ і краще перемішування продуктів горіння з потоком дуття у варіанті III (з подачею ПГ на спис) призводять до того, що в цьому варіанті, по-перше, температура дуття на виході з фурми перевищує температуру дуття на вході більш ніж на 200 °С, а по-друге — на нагрівання частинок витрачається більша кількість теплоти порівняно з іншими варіантами;
- для варіанта II (без подачі ПГ) температура дуття на виході нижче за вхідну температуру практично на 100 °С, оскільки частина його ентальпії пішла на нагрівання частинок ПВП;



**Рис. 6.** Конструкція підведення ПГ та ПВП на списи для ДП № 1М: 1 — сопло; 2 — підведення для спису вдування ПВП; 3 — спис вдування ПВП; 4 — трубка підведення природного газу у повітряну фурму; 5 — повітряна фурма; 6 — підведення для спису вдування природного газу; 7 — спис вдування природного газу. Блакитним кольором виділений дуттєвий канал сопла, жовтим кольором — дуттєвий канал повітряної фурми

- при традиційному способі подачі ПВП (варіант I) кількість теплоти, що витрачається на нагрівання частинок, має проміжне значення, проте горіння газу в пристінковій ділянці призводить до того, що теплові втрати через «рильну» частину дуттєвого каналу і внутрішню «склянку» в цьому варіанті виявилися більшими, ніж у III варіанті;
- виділення летючих із ПВП у всіх розглянутих варіантах відбувається приблизно однаково; температурне поле виходить більш однорідним у варіанті III порівняно з варіантом I (за рахунок кращого перемішування) незважаючи на більш високі значення теплоти, що виділилася при горінні ПГ.

Отже, отриманий позитивний практичний ефект, підтверджено результатами моделювання, що дозволяє зробити висновок про доцільність застосування технології введення ПГ на сопло за прийнятних цінових умов, а при сприятливих факторах за стабільністю якості коксу та температури гарячого дуття — не менше 1000 °С ефективність даного способу мала бути вищою.

Слід також зазначити, що скорочення витрати коксу при заміні його спільним вдуванням ПВП і ПГ на сопло доцільно здійснювати виходячи з вимог до мінімально допустимого розміру коксових вікон на вході у в'язко-пластичну зону — не менше 0,15 м, що сприяє задовільній газопроникності стовпа шихти [22], зокрема для українських сировинних умов.

### Висновки

В умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» отримано ефективність вдування природного газу спільно з пиловугільним паливом на відокремлені списи через сопло в дослідному періоді № 1. При традиційних коефіцієнтах заміни коксу природним газом — 0,8 та пиловугільним паливом — 0,9, при наведенні дослідного періоду № 1 та базових № 1 та № 2 отримано, в середньому, економію коксу — 10,3 кг/т.

Отримані результати дозволяють рекомендувати такий спосіб вдування ПГ за прийнятних цінових умов, а також на інших підприємствах України, особливо на працюючих з кращими умовами забезпечення високої температури гарячого дуття — понад 1050 °С. Застосування вперше в Україні такого спо-

субу підведення паливних добавок до дуття дозволили у нестабільних та перехідних періодах роботи — в умовах зниження температури гарячого дуття при обрушенні футерування повітрянагрівача, отримати стабільність ходу ДП та економічну ефективність у дослідних періодах.

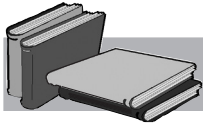
Порівняння за факторами дослідного періоду з базовим періодом №1 при використанні коефіцієнтів заміни відповідно до керівного документа

| Параметри ДП № 1М  | ↓ 15 діб - Періоди - 15 діб ↓       |                                     | Відхилення параметрів | Зміни витрати коксу за факторами, кг/т |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|
|  | Базовий № 1 «Б1»<br>(06-20.05.2021) | Дослідний «Д»<br>(30.05-15.06.2021) | $\Delta = Д-Б1$       |  |
| Виробництво, т/добу  | 2823                                | 2583                                | -240                  |  |
| Витрата коксу, кг/т чав.   | 353,0                               | 361,2                               | 8,2                   |  |
| Витрата коксового горіха, кг/т чав.  | 51,1                                | 46,6                                | -4,5                  | 3,59                                   |
| Витрата ПВП, кг/т чав.   | 156,4                               | 153,5                               | -2,9                  | 2,66                                   |
| Вихід шлаку, кг/т чав.   | 482                                 | 453                                 | -29                   | -4,73                                  |
| Витрата вапняку (доломіту), кг/т чав.  | 0,2                                 | 0,0                                 | -0,2                  | -0,04                                  |
| Витрата вапняку (сирого доломіту), кг/т чав.                                       | 3,5                                 | 8,6                                 | 5,1                   | 1,27                                   |
| Зменшення вмісту фракції 5-0 мм у залізородній шихті на кожний 1 %                 | 11,0                                | 11,7                                | 0,7                   | 1,78                                   |
| Температура дуття (ТГД), °С  | 1017                                | 904                                 | -113                  | 24,13                                  |
| Вміст кисню (O <sub>2</sub> ), %   | 24,34                               | 25,33                               | 0,98                  | 2,33                                   |
| Вологість дуття, г/м <sup>3</sup>  | 14,93                               | 15,72                               | 0,79                  | 0,75                                   |
| Витрата природного газу (QПГ), м <sup>3</sup> /т чав.                              | 8,6                                 | 24,5                                | 15,9                  | -12,73                                 |
| Тиск колошникового газу (Ркол), аті  | 1,43                                | 1,34                                | -0,09                 | 0,65                                   |
| Tf, °С   | 2046                                | 1967                                | -79                   |  |
| Хімічний склад чавуну:   |                                     |                                     |                       |  |
| [Si], %  | 0,54                                | 0,54                                | 0,00                  | 0,22                                   |
| [Mn], %  | 0,35                                | 0,26                                | -0,09                 | -0,86                                  |
| [S], %   | 0,024                               | 0,032                               | 0,007                 | -3,36                                  |
| [P], %   | 0,060                               | 0,056                               | -0,004                | -0,10                                  |
| Показники коксу:   |                                     |                                     |                       |  |
| M10, %   | 7,77                                | 7,88                                | 0,11                  | 1,40                                   |
| M25, %   | 86,71                               | 86,47                               | -0,23                 | 0,66                                   |
| зола   | 11,39                               | 11,24                               | -0,15                 | -0,94                                  |
| +80 мм   | 7,99                                | 8,14                                | 0,15                  | 0,14                                   |
| Сірка  | 0,54                                | 0,53                                | -0,01                 | -0,14                                  |
| CSR  | 52,03                               | 51,56                               | -0,47                 | 1,16                                   |
| Простої, %   | 2,50                                | 3,89                                | 1,39                  | 3,28                                   |
| Зміни витрати коксу за факторами (сумарно), кг/т                                   |                                     |                                     |                       | 21,14                                  |
| Очікувана витрата коксу в дослідному періоді, кг/т                                 |                                     | 374,1                               |                       |  |
| Економія коксу, кг/т чав. (різниця витрат коксу $\Delta$ = очікуваний — фактичний) |                                     | 12,9                                |                       |  |
| Економія коксу, %  |                                     | 3,6                                 |                       |  |

Порівняння за факторами дослідного періоду з базовим періодом № 2 при використанні коефіцієнтів заміни відповідно до керівного документа

| Параметри ДП № 1М   | ↓15 діб - Періоди - 15 діб↓            |                                     | Відхилення параметрів | Зміни витрати коксу за факторами, кг/т |
|---|--|-------------------------------------|-----------------------|--|
|   | Базовий № 2 «Б2»<br>(16.06-02.07.2021) | Дослідний «Д»<br>(30.05-15.06.2021) | $\Delta = Д-Б2$       |  |
| Виробництво, т/добу   | 2708                                   | 2583                                | -125                  |  |
| Витрата коксу, кг/т чав.  | 380,7                                  | 361,2                               | -19,5                 |  |
| Витрата коксового горіха, кг/т чав.   | 47,2                                   | 46,6                                | -0,6                  | 0,49                                   |
| Витрата ПВП, кг/т чав.  | 150,3                                  | 153,5                               | 3,2                   | -2,88                                  |
| Вихід шлаку, кг/т чав.  | 443                                    | 453                                 | 10                    | 1,72                                   |
| Витрата вапняку (доломіту), кг/т чав.   | 0,5                                    | 0,0                                 | -0,5                  | -0,09                                  |
| Витрата вапняку (сирого доломіту), кг/т чав.                                      | 8,9                                    | 8,6                                 | -0,3                  | -0,06                                  |
| Зменшення вмісту фракції 5-0 мм у залізорудній шихті на кожний 1 %                | 12,8                                   | 11,7                                | -1,1                  | -2,75                                  |
| Температура дуття (ТГД), °С   | 949                                    | 904                                 | -45                   | 10,28                                  |
| Вміст кисню (O <sub>2</sub> ), %  | 25,24                                  | 25,33                               | 0,09                  | 0,22                                   |
| Вологість дуття, г/м <sup>3</sup>   | 23,66                                  | 15,72                               | -7,94                 | -8,16                                  |
| Витрата природного газу (QПГ), м <sup>3</sup> /т чав.                             | 0,4                                    | 24,5                                | 24,1                  | -19,30                                 |
| Тиск колошникового газу (Pкол), аті   | 1,36                                   | 1,34                                | -0,02                 | 0,17                                   |
| Tf, °С  | 2029                                   | 1967                                | -62                   |  |
| Хімічний склад чавуну:  |  |                                     |                       |  |
| [Si], %   | 0,52                                   | 0,54                                | 0,02                  | 1,33                                   |
| [Mn], %   | 0,22                                   | 0,26                                | 0,05                  | 0,45                                   |
| [S], %  | 0,031                                  | 0,032                               | 0,001                 | -0,57                                  |
| [P], %  | 0,054                                  | 0,056                               | 0,002                 | 0,06                                   |
| Показники коксу:  |  |                                     |                       |  |
| M10, %  | 7,80                                   | 7,88                                | 0,08                  | 1,19                                   |
| M25, %  | 86,68                                  | 86,47                               | -0,21                 | 0,63                                   |
| зола  | 11,29                                  | 11,24                               | -0,04                 | -0,30                                  |
| +80 мм  | 8,33                                   | 8,14                                | -0,19                 | -0,20                                  |
| Сірка   | 0,55                                   | 0,53                                | -0,01                 | -0,15                                  |
| CSR   | 52,27                                  | 51,56                               | -0,72                 | 1,91                                   |
| Простої, %  | 2,22                                   | 3,89                                | 1,67                  | 4,25                                   |
| Зміни витрати коксу за факторами (сумарно), кг/т                                  |  |                                     |                       | -11,77                                 |
| Очікувана витрата коксу в дослідному періоді, кг/т                                |  | 368,9                               |                       |  |
| Економія коксу, кг/т чав.(різниця витрат коксу $\Delta$ = очікуваний — фактичний) |  | 7,7                                 |                       |  |
| Економія коксу, %   |  | 2,1                                 |                       |  |



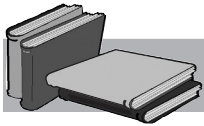


## ЛІТЕРАТУРА

1. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik E.I., Alter M.A. Blast Furnace Operation Improvement by Forming Uniform Circular Distribution of Raceway's Thermal Mode. AISTech 2021 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 29 June—1 July 2021, Nashville, Tenn., USA. P. 184—192. <https://doi.org/10.33313/382/018>
2. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Alter M.A., Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu., Shumelchik E.I. Efficiency of Washing Blast Furnace Hearth in Case of Pulverized Coal Injection. AISTech 2022 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 16—18 May 2022, Pittsburgh, Pa., USA. P. 219—230. <https://doi.org/10.33313/386/025>
3. Semenov Yu.S. Temperature distribution of the gas flux in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. Iss. 7. P. 473—477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>
4. Semenov Yu.S., Gorupakha V.V., Kuznetsov A.M., Semion I.Yu., Schumel'chik E.I., Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu. Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast-Furnace Charge. *Metallurgist*. 2020. Vol. 63. Iss. 9—10. P. 1013—1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>
5. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik Ye.I. Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. No. 2. P. 100—106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>
6. Podkorytov A.L., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V., Semenov Yu.S., Nesterov A.S., Shumelchik E.I. Introduction of pulverized-coal injection at Yenakieve Iron and Steel Works. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. Iss. 5, P. 313—319. <https://doi.org/10.3103/S0967091217050102>
7. Семенов Ю.С., Подкоритов О.Л., Горупаха В.В., Семіон І.Ю., Оробцев А.Ю., Нестеров О.С., Шумельчик Є.І., Пустовой С.М., Гапоненко О.А., Соловійов В.В. Нові наукові і прикладні результати досліджень ефективності використання пиловугільного палива при виробництві чавуну і випалі вапняку. *Метал та лиття України*. 2020. № 2 (321). С. 15—26. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.02.015>
8. Семенов Ю.С., Вергун О.С., Нестеров О.С., Кисляков В.Г., Горупаха В.В. Шляхи поліпшення ефективності аглодоменого виробництва в сировинних та енергетичних умовах роботи металургійних підприємств України. *Метал та лиття України*. 2021. № 4 (327). С. 8—15. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.008>
9. Frühling R., Weber A., Rafi M. Co-Injection of Pulverized Coal and Natural Gas into Blast Furnace. AISTech 2005 — Proceedings. P. 481—489.
10. Gu M., Li J. Study of CO-injection of natural gas and pulverized coal in blast furnace under pure oxygen environment. Heat Transfer Summer Conference. 2008. P. 169—178. <https://doi.org/10.1115/HT2008-56256>
11. Holmes D.J., Trenkinshu S., Zuke D.A. Co-Injection of Pulverized Coal and Natural Gas on IH7 Blast Furnace.
12. Титов В.Н., Радюк А.Г., Левицкий И.А., Терновых А.И., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Исследование процессов в дутьевом канале воздушной фурмы доменной печи при использовании пылеугольного топлива. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020. Т. 76. № 5. С. 449—456. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-5-449-456>
13. Okosun T., Street S.J., Zhao J., Wu B., Zhou C. Investigation of Dual Lance Designs for Pulverized Coal and Natural Gas Co-Injection. AISTech 2016 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 16—19 May 2016, Pittsburgh, Pa., USA. P. 581—594.
14. Nurni V.N., Hari A., Biswas T., Rajagopalan S. Optimizing the Coinjection of Natural Gas and Pulverized Coal for Indian Blast Furnaces Toward Productivity Gains and Lower-Carbon Emissions. *Steel research international*. 2022. Vol. 93. Iss. 9. 2200091. <https://doi.org/10.1002/srin.202200091>
15. Семенов Ю.С., Семіон І.Ю., Горупаха В.В. та ін. Патент України на винахід. Пристрій для введення паливних добавок у доменну піч. Заяв. № а202203463, 26.09.2022 р.
16. Tovarovskiy I.G. Normative Estimation of Parameters of the Blast-Furnace Smelting. *Advances in Materials*. 2017. Vol. 6. Iss. 4. P. 38—44. <https://doi.org/10.11648/j.am.20170604.12>
17. Tovarovskii I.G. Influence of blast-furnace parameters on coke consumption and productivity. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. Iss. 5. P. 350—358. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050155>
18. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Lizunov B.N., Lapshin A.A., Soveiko K.N., Loginov V.N., Vasil'ev L.E. Making blast-furnace smelting more efficient through the injection of heated natural gas. *Metallurgist*. 2007. Vol. 51. Iss. 11—12. P. 605—611. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0110-5>
19. Saifullaev S.D., Albul S.V., Kobelev O.A., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Study of the Effect of Design Parameters on the Thermal Processes in a Blast Furnace Tuyere Using the ANSYS Software. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. Iss. 12. P. 879—885. <https://doi.org/10.3103/S096709122112010X>
20. Xu H., Sun C., Liao Z., Xu J., Kou M. Numerical Simulation of Temperature and Stress Distributions Inside the Furnace Tuyere. Proceedings for the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM 2019), Warrendale, PA: Assoc. Iron Steel Technol. 2019. P. 51—55. <https://doi.org/10.33313/503/005>
21. Liu X., Tang G., Okosun T., Silaen A.K., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of Heat Transfer Phenomena in Blast Furnace Tuyere/Blowpipe Region. Proc. ASME 2017 Heat Transfer Summer Conf., Washington. 2017. <https://doi.org/10.1115/HT2017-4961>

22. Geerdes M., Chaigneau R., Lingiardi O., Molenaar R., Opbergen R., Sha Y., Warren P. Modern blast furnace ironmaking: an introduction (Fourth Edition, 2020), 2020. 274 p. <https://doi.org/10.3233/STAL9781643681238>. ISBN: 978-1-64368-122-1 (print) | 978-1-64368-123-8 (online).

Надійшла 18.03.2024



## REFERENCES

1. Semenov, Yu.S., Horupakha, V.V., Shumelchik, E.I., Alter, M.A. (2021). Blast Furnace Operation Improvement by Forming Uniform Circular Distribution of Raceway's Thermal Mode. AISTech 2021 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 29 June—1 July 2021, Nashville, Tenn., USA, pp. 184-192. <https://doi.org/10.33313/382/018>
2. Semenov, Yu.S., Horupakha, V.V., Alter, M.A., Vashchenko, S.V., Khudyakov, A.Yu., Shumelchik, E.I. (2022). Efficiency of Washing Blast Furnace Hearth in Case of Pulverized Coal Injection. AISTech 2022 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 16—18 May 2022, Pittsburgh, Pa., USA, pp. 219-230. <https://doi.org/10.33313/386/025>
3. Semenov, Yu.S. (2017). Temperature distribution of the gas flux in blast furnaces. *Steel in Translation*, 47(7), 473-477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>
4. Semenov, Yu.S., Gorupakha, V.V., Kuznetsov, A.M., Semion, I.Yu., Schumel'chik, E.I., Vashchenko, S.V., Khudyakov, A.Yu. (2020). Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast-Furnace Charge. *Metallurgist*, 63(9-10), 1013-1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>
5. Semenov, Yu.S., Horupakha, V.V., Shumelchik, Ye.I. (2020). Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*, 50(2), 100-106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>
6. Podkorytov, A.L., Kuznetsov, A.M., Zubenko, A.V., Semenov, Yu.S., Nesterov, A.S., Shumelchik, E.I. (2017). Introduction of pulverized-coal injection at Yenakieve Iron and Steel Works. *Steel in Translation*, 47(5), 313-319. <https://doi.org/10.3103/S0967091217050102>
7. Semenov, Yu.S., Podkorytov, A.L., Horupakha, V.V., Semion, I.Yu., Orobtssev, A.Yu., Nesterov, O.S., Shumelchik, E.I., Pustovoi, S.M., Gaponenko, O.A., Solovyov, V.V. (2020). New scientific and applied results of studies efficiency use of pulverized coal in the production of cast iron and lime burning. *Metal and Casting of Ukraine*, 2(321), 15-26. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.02.015> [in Ukrainian].
8. Semenov, Yu.S., Vergun, O.S., Nesterov, O.S., Kislyakov, V.G., Horupakha, V.V. (2021). Ways to improve the efficiency of sinter-blast furnace production in the raw materials and energy conditions of the metallurgical enterprises of Ukraine. *Metal and Casting of Ukraine*, 4(327), 8-15. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.008> [in Ukrainian].
9. Frühling, R., Weber, A., Rafi, M. (2005). Co-Injection of Pulverized Coal and Natural Gas into Blast Furnace. AISTech 2005 — Proceedings, pp. 481-489.
10. Gu, M., Li, J. (2008). Study of CO-injection of natural gas and pulverized coal in blast furnace under pure oxygen environment. Heat Transfer Summer Conference, pp. 169-178. <https://doi.org/10.1115/HT2008-56256>
11. Holmes, D.J., Trenkinshu, S., Zuke, D.A. Co-Injection of Pulverized Coal and Natural Gas on IH7 Blast Furnace.
12. Titov, V.N., Radyuk, A.G., Levitskii, I.A., Ternovykh, A.I., Titlyanov, A.E., Sidorova, Y.Yu. (2020). Study of processes in the blast channel of blast furnace air tuyere when using PCI. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 76(5), 449-456. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-5-449-456> [in Russian].
13. Okosun, T., Street, S.J., Zhao, J., Wu, B., Zhou, C. (2016). Investigation of Dual Lance Designs for Pulverized Coal and Natural Gas Co-Injection. AISTech 2016 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 16—19 May 2016, Pittsburgh, Pa., USA, pp. 581-594.
14. Nurmi, V.N., Hari, A., Biswas, T., Rajagopalan, S. (2022). Optimizing the Coinjection of Natural Gas and Pulverized Coal for Indian Blast Furnaces Toward Productivity Gains and Lower-Carbon Emissions. *Steel research international*, 93(9), 2200091. <https://doi.org/10.1002/srin.202200091>
15. Semenov, Yu.S., Semion, I.Yu., Horupakha, V.V. et al. (2022). Patent of Ukraine for invention. Device for introducing fuel additives into a blast furnace. Declared № a202203463, 09/26/2022 [in Ukrainian].
16. Tovarovskiy, I.G. (2017). Normative Estimation of Parameters of the Blast-Furnace Smelting. *Advances in Materials*, 6(4), 38-44. <https://doi.org/10.11648/j.am.20170604.12>
17. Tovarovskii, I.G. (2014). Influence of blast-furnace parameters on coke consumption and productivity. *Steel in Translation*, 44(5), 350-358. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050155>
18. Feshchenko, S.A., Pleshkov, V.I., Lizunov, B.N., Lapshin, A.A., Soveiko, K.N., Loginov, V.N., Vasil'ev, L.E. (2007). Making blast-furnace smelting more efficient through the injection of heated natural gas. *Metallurgist*, 51(11-12), 605-611. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0110-5>
19. Saifullaev, S.D., Albul, S.V., Kobelev, O.A., Levitskii, I.A., Radyuk, A.G., Titlyanov, A.E. (2021). Study of the Effect of Design Parameters on the Thermal Processes in a Blast Furnace Tuyere Using the ANSYS Software. *Steel in Translation*, 51(12), 879-885. <https://doi.org/10.3103/S096709122112010X>
20. Xu, H., Sun, C., Liao, Z., Xu, J., Kou, M. (2019). Numerical Simulation of Temperature and Stress Distributions Inside the Furnace Tuyere. Proceedings for the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM 2019), Warrendale, PA: Assoc. Iron Steel Technol., pp. 51-55. <https://doi.org/10.33313/503/005>

21. Liu, X., Tang, G., Okosun, T., Silaen, A.K., Street, S.J., Zhou, C.Q. (2017). Investigation of Heat Transfer Phenomena in Blast Furnace Tuyere/Blowpipe Region. Proc. ASME 2017 Heat Transfer Summer Conf., Washington. <https://doi.org/10.1115/HT2017-4961>
22. Geerdes, M., Chaigneau, R., Lingardi, O., Molenaar, R., Opbergen, R., Sha, Y., Warren, P. (2020). Modern blast furnace ironmaking: an introduction (Fourth Edition, 2020), 274 p. <https://doi.org/10.3233/STAL9781643681238>. ISBN: 978-1-64368-122-1 (print) | 978-1-64368-123-8 (online).

Received 18.03.2024

## Summary

**Yu.S. Semenov**, Senior Research Scientist, Head of the Department,  
e-mail: [yuriy.semenov.isi@gmail.com](mailto:yuriy.semenov.isi@gmail.com),

<https://orcid.org/0000-0003-2299-5742>,

Web of Science ResearcherID: S-4494-2017

**V.V. Horupakha**, Research Scientist, e-mail: [viktor.horupakha@gmail.com](mailto:viktor.horupakha@gmail.com),

<https://orcid.org/0000-0003-0531-1871>,

Web of Science ResearcherID: HKV-9399-2023

**S.V. Vashchenko**, PhD (Engin.), Senior Researcher, Senior Research Scientist, e-mail: [sergeyvaschenko.sv@gmail.com](mailto:sergeyvaschenko.sv@gmail.com),

<https://orcid.org/0000-0001-8344-961X>,

Web of Science ResearcherID: ABC-8515-2021

**Ye.I. Shumelchik**, PhD (Engin.), Senior Researcher, Senior Research Scientist, e-mail: [ievgen.shumelchik@gmail.com](mailto:ievgen.shumelchik@gmail.com),

<https://orcid.org/0000-0001-5350-6425>,

Web of Science ResearcherID: ABC-8657-2021

**O.Yu. Khudyakov**, PhD (Engin.), Senior Researcher, Senior Research Scientist, e-mail: [khudyakovsashko@gmail.com](mailto:khudyakovsashko@gmail.com),

<https://orcid.org/0000-0002-6507-1120>,

Web of Science ResearcherID: ABC-8381-2021

*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

## Experience of co-injection of pulverized coal and natural gas into blast furnace hearth under the conditions of PJSC "KAMET-STEEL"

*The article provides an analysis of the practical and analytical results of the methods of co-injection of pulverized coal and natural gas into the hearth of blast furnaces by American researchers and practitioners. The analysis shows the advantage of supplying natural gas, as well as pulverized coal, through the lance into the blow channel of the tuyere device. Practical results obtained for the first time in Ukraine of co-injection of pulverized coal and natural gas into the hearth of a blast furnace in unstable charge and fuel conditions of PJSC "KAMET-STEEL" are presented. Practical experiments have proven the efficiency of such injection when fuel additives are injected onto separate lances into the blow channel of the tuyere device, and the natural gas lance is withdrawn so that its combustion occurs before the injection of pulverized coal into the blow channel. The effectiveness of the practical application of the method of co-injecting pulverized coal and natural gas into the hearth of a blast furnace is expressed in a reduction in the specific coke consumption by 10.3 kg/ton of cast iron (or 2.85 %) at a consumption of pulverized coal – 153.4 kg/ton of cast iron and natural gas – 24.5 m<sup>3</sup>/ton of cast iron. The results obtained allow us to recommend this method of injecting fuel additives under acceptable price conditions, as well as at other metallurgical plants, especially those operating with better conditions for ensuring high temperatures of hot blast – more than 1050 °C. As a result of the analytical studies performed, it was established that: nozzles with two inlets for natural gas and pulverized coal, ensuring the introduction of natural gas into the blast channel before pulverized coal, contribute to the maximum burnout rate of the latter in the blast flow; with this injection method, more methane natural gas is burned, more heat is released due to the combustion reaction, which leads to an increase in the blast temperature at the outlet of the tuyere.*

## Keywords

*Blast furnace, pulverized coal, natural gas, specific coke consumption, temperature of hot blast.*