

10. BUILD INDUSTRIAL PAKISTAN. URL: <http://buildindustrialpakistan.blogspot.com/2014/01/water-cooled-oxygen-blowing-lance-vital.html> (дата обращения: 13.01.2020).
11. tradeKOREA. All Categories. URL: <https://www.tradekorea.com/product/detail/P636834/Good-quality-Converter-Oxygen-Lance-Nozzle-for-water-cooled-.html> (дата обращения: 13.01.2020).
12. Пат. 40296 Украина, МПК<sup>7</sup> С 21 С 5/48. Головка к верхней кислородной фурме с центральным подводом воды / С.П.Пантейков, В.В.Несвет, Л.М.Учитель и др.; заявители и патентообладатели Днепродзерж. госуд. техн. ун-т и ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат». № 2000116633; заявл. 23.11.2000; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.
13. Пантейков С.П. Пути совершенствования систем охлаждения наконечников верхних дутьевых фурм для крупнотоннажных конвертеров. *Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки)*: В 2 т. Днепропетровск: Системные технологии, 2000. Т.1. С.25-32.
14. Пат. 38980 Украина, МПК<sup>7</sup> С 21 С 5/48. Фурменная головка повышенной жёсткости / С.П.Пантейков, Л.М.Учитель, В.В.Ивко и др.; заявитель и патентообладатель Днепродзерж. госуд. техн. ун-т. № 2000127287; заявл. 18.12.2000; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.
15. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С., Кадацкий Л.В., Старкова Е.А. Упрочнение сварных швов в фурменных головках. *Сталь*, 2017. № 12. С.28-35.

Поступила в редколлегию 03.03.2020.

УДК 669.162

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.2

КРЯЧКО Г.Ю., к.т.н., доцент  
КУЗНЕЦОВ М.С.\*, співшукач  
ЧУБИНА О.А., к.т.н., доцент  
СТЕПАНЧЕНКО С.М., магістр

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське  
\*ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»

## ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ПРИ ЗБЕРЕЖЕННІ РІВНОГО ХОДУ ДОМЕННІ ПЕЧІ

**Вступ.** Оскільки головною метою застосування пиловугільного палива (ПВП) в доменній плавці є максимально можлива заміна дефіцитного коксу, то практика використання ПВП в умовах недостатньої компенсації його впливу зазвичай зводиться до наступного. Як правило, технологи встановлюють раніше випробуваний дутьєвий режим з максимальною витратою ПВП, за яким піч працює певний відрізок часу до перших ознак порушення рівного ходу. Затим витрата вугільного паливу скорочується, застосовуються традиційні засоби досягнення рівності ходу. Нормальна робота печі відновлюється, далі слідує чергова спроба підняття витрати ПВП. Тобто на нестационарність доменного процесу, обумовлену періодичністю випусків чавуну [1], накладається нестационарність, що створюється технологіями в пошуках оптимізації вдування пиловугільного палива. Це, в свою чергу, призводить до зниження як результативності, так і ефективності плавки.

Оскільки додаткове паливо, що слугує заміником коксу (пиловугільне паливо, природний газ, мазут, тощо), подається в горн доменної печі разом із дуттям, то його витрата є важливим параметром дутьєвого режиму. Зазвичай використовують відносну

витрату замітника до одиниці виплавленого чавуну [2], до одиниці дуття [3, с. 494] або кисню [4]. Також використовують витрату замітника в часі [5]. Оцінку впливу додаткового палива на доменний процес проводять також за допомогою більш складних комплексних критеріїв – теоретичної температури [4, 6], потужності дуттьового струменя [4] або повної потужності утвореного горнового газу [7], або довжини фурменної зони [8].

Аналізуючи викладене, можна зазначити, що існують більш менш два головних питання, відповідь на які потребує додаткового вивчення.

По-перше, відкритим постає питання про придатність окремих критеріїв дуттьового режиму для оперативного контролю і регулювання доменного процесу при використанні додаткового палива. По-друге, неясно скільки цього палива, зокрема ПВП, можна подавати в доменну піч в конкретних сировинних і експлуатаційних умовах, не порушуючи рівність її ходу.

**Постановка задачі.** Метою роботи є розробка методики визначення витрати ПВП, за якої можливе збереження рівного ходу доменної плавки. Задача дослідження полягає в оцінці придатності відомих критеріїв дуттьового режиму з вдуванням ПВП для поточного регулювання ходу печі.

**Результати роботи.** Для оцінки інформативності і придатності деяких широко використовуваних критеріїв для ведення доменної печі проаналізували ступінь узгодженості витрати ПВП з витратою дуття на трьох доменних печах ПАТ «ДМК» в період відпрацювання технології плавки з вдуванням пиловугільного палива (ПВП), а саме у 2015-2018 р.р. В якості одиничного періоду використовували один календарний місяць роботи печі (не менше 26 діб за місячний період). В якості параметрів вдування ПВП прийняли відносну витрату до тони чавуну, до кубічного метру дуття і до одиниці часу. Інформативність критеріїв оцінювали за сумою кореляційних відношень, що характеризують тісноту зв'язків між досліджуваними параметрами по трьох печах ( $\square R^2$ ).

Результати аналізу наведено на рис.1, з якого видно, що найменш придатним виявився критерій, віднесений до  $m^3$  дуття ( $\square R^2 = 0,53$ ; рис.1, а). На заводі інформативності цього показника стає різна якість дуття за температурою, тиском, вмістом кисню. Не зовсім придатний для поточного регулювання дуттьового режиму і критерій, віднесений до вихідного показника плавки  $\square$  виплавленого чавуну ( $\square R^2 = 0,66$ ; рис.1, б), оскільки критерій містить вхідний та вихідний показники процесу. Найбільш придатним для ведення печі виявилася часова витрата ПВП ( $\square R^2 = 1,26$ ; рис.1, в).

Залежність, представлена на рис.1, в, свідчить про закономірне прагнення технологів збільшити витрату ПВП пропорційно зростанню інтенсивності плавки за дуттям. Однак невідомою при цьому прагненні залишається межа, за якою додавання вугільного пилу в дуття буде порушувати рівний хід печі – запоруку досягнення високих техніко-економічних показників плавки. Запропонована нами методика вибору дуттьового режиму базується на спробі визначення цієї межі.

Для перевірки реакції доменної печі, більш конкретно – зміни газопроникності стовпа шихти, при зміні витрат пиловугільного палива в якості критерія газопроникності використали відношення витрати дуття  $Q_d$  до його тиску  $P_d$ . Новим в підході до перевірки було наступне. Оскільки і витрата, і тиск дуття залежать в значній мірі від наповнення горна розплавами, то відношення їх величин фіксували для всіх вимірів в момент відкриття чавунної льотки (ВЧЛ):  $(P_d/Q_d)_{вчл}$ , в одиницях виміру  $kPa/m^3 \cdot s$ . Було проведено виміри на 133 випусках продуктів плавки на ДП № 9 при різних рівнях формування ходу печі. Момент вимірів був визначений як той, що відповідає найбільш напруженому періоду роботи печі перед випуском продуктів плавки, коли різко погіршуються умови розвитку прифурменної порожнини і відповідно горіння коксу і ПВП. В період дослідження (01.12 - 30.12.2016) діапазон змін витрати дуття перед випуском складав в залежності від сировинних та експлуатаційних умов  $1400-3100 m^3/хв.$ , а витрати вугільного пилу –  $8-24 т/год$ .

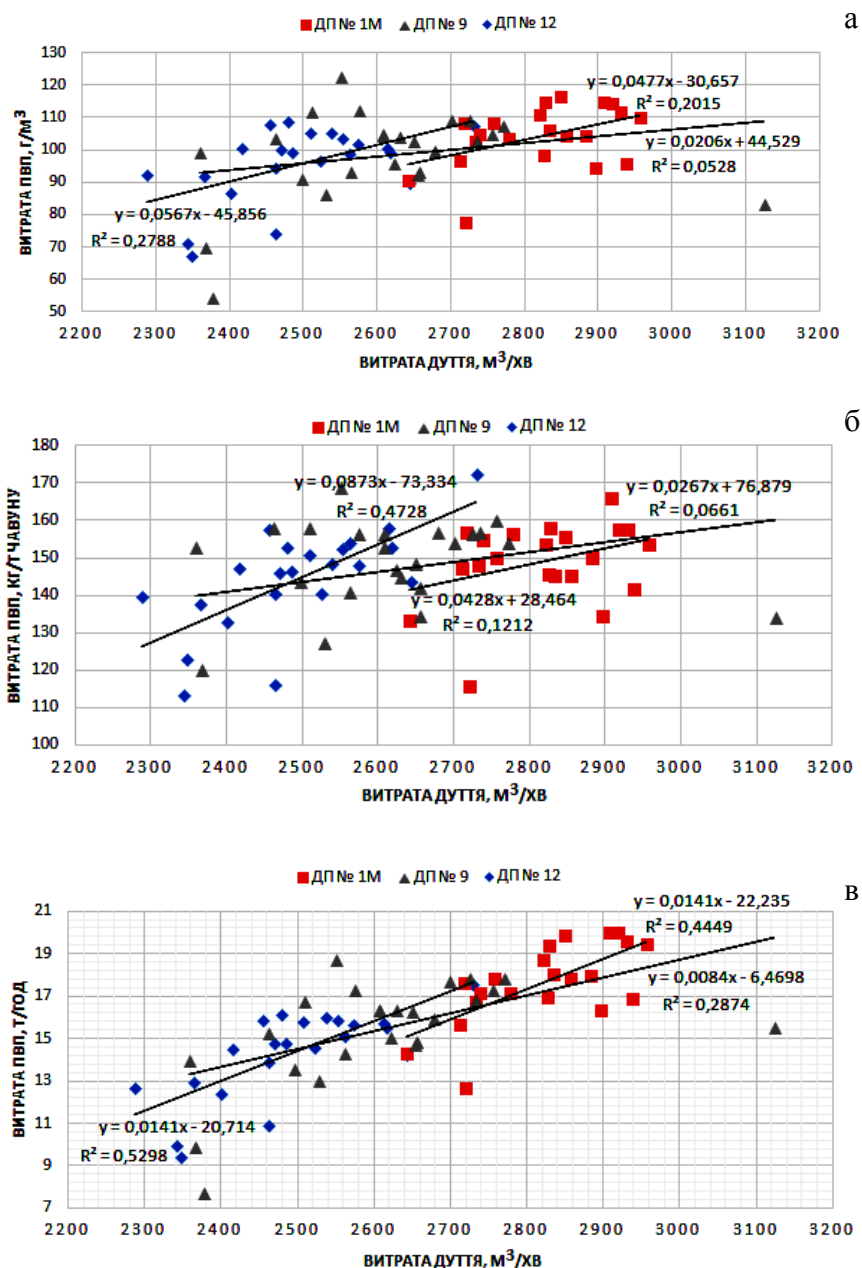


Рисунок 1 – Зв'язок між витратами дуття і пиловугільного палива (ПВП), віднесеними до одиниці дуття (а), чавуну (б) і часу (в)

В якості показника витрати ПВП запропоновано густину потоку, відносну витрату пилу до кубічного метра дуття, що подавалося в горн печі за одну секунду в одиницях  $г/м^3 \cdot с$ . На відміну від широко вживаного критерію відносної витрати ПВП в часі [5] запропонований показник враховує часову густину пилового потоку в одиниці дуття, що подається в горн в одиницю часу. Тобто новий критерій пов'яже витрату ПВП з інтенсивністю дуття.

Залежності газопроникності стовпа шихти при зміні витрат дуття і ПВП наведено на рис.2. Результати аналізу свідчать про те, що в конкретних сировинних та експлуатаційних умовах досліджуваної печі більш менш стабільним відносним опором стовпа шихти при відкритті чавунної льотки є величина опору, яка складає близько  $5 \text{ кПа}/м^3 \cdot с$ .

Як і слід було сподіватись, тісний зв'язок між витратою дуття і відносним опором ( $R^2 = 0,5913$ ) обумовлений залежністю втрат тиску в шарі від швидкості потоку га-

зу в квадраті. Однак характер цієї залежності знаходиться в протиріччі з теоретичними поглядами на газодинаміку шару шихти, оскільки зі зростанням витрати дуття в середньому з 30 до 40 м<sup>3</sup>/с відносний опір зменшується (рис.2, а). Раніше це явище пояснювали утворенням еліпсоїдів розпушення над фурменними вогнищами [9]. Зважаючи на те, що над фурменою зоною знаходяться зони з різним агрегатним станом шихтових матеріалів, зокрема зона когезії, утворення еліпсоїдів може мати обмежену по висоті область рухомого коксу під когезійною зоною. Більш вірогідним поясненням зменшення відносного опору стовпа шихти зі зростанням витрати дуття є розширення об'єму біляфурмених порожнин, зміна розподілу газу з утворенням периферійно-осьових віддушин і збільшення порознуватості шихти в результаті прискорення її руху.

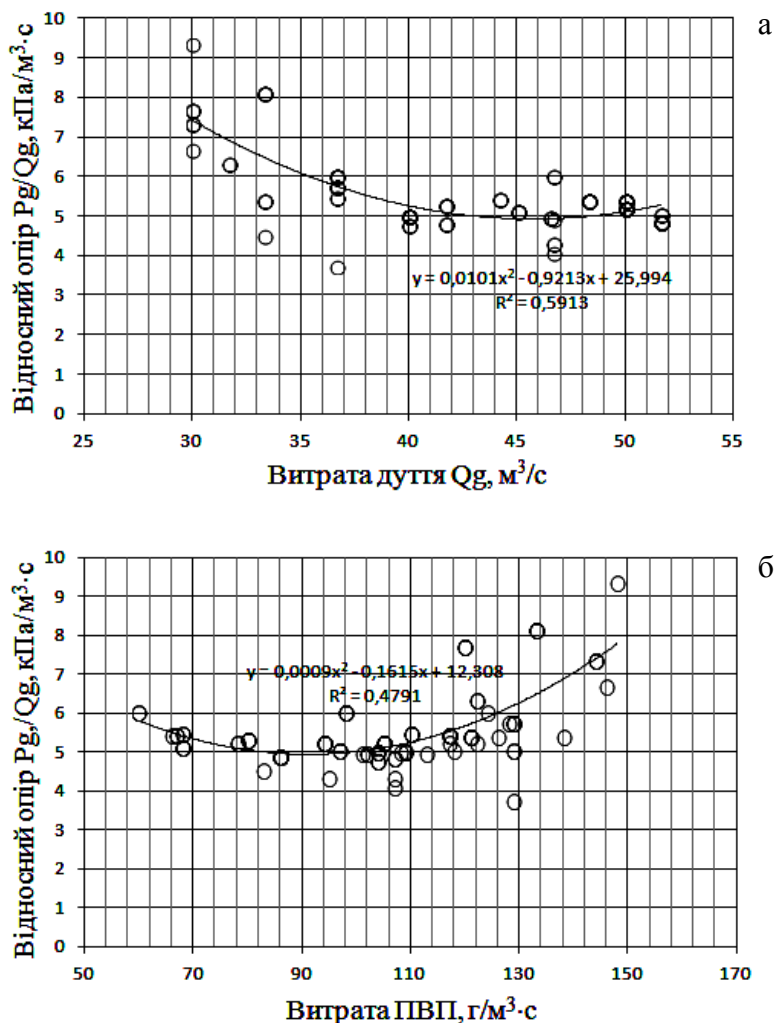


Рисунок 2 – Залежність відносного опору стовпа шихти від витрати дуття (а) і пилувугільного палива (б) в досліджуваний період

Слід також зазначити, що зменшення опору стовпа шихти перед відкриттям чавунної льотки і збереженням підвищеної витрати дуття може бути наслідком покращення гарячої міцності коксу – показника, який в динаміці доменного процесу є практично неконтрольованим.

Таким чином, в сировинних та експлуатаційних умовах досліджуваної печі витрата ПВП до 110 г/м<sup>3</sup>·с не викликала значних змін відносного опору (рис.2, б). Подальше зростання витрати ПВП до 150 г/м<sup>3</sup>·с викликало різке збільшення опору з 5 до 8 кПа/м<sup>3</sup>·с, тобто на 60%. Можливо, що цьому збільшенню сприяли процеси в об'ємі

прифурмених порожнин і їх «оболонках» – надмірна газифікація пилю, зашлакування золою ПВП міжкускових пустот на межі порожнини із сипучим коксом, тощо.

Викладена вище методика визначення критичного опору стовпа шихти при варіюванні витрат дуття і ПВП з дотриманням рівного ходу є універсальною для будь-якої доменної печі і умов її експлуатації. Зважаючи на доцільність підтримання рівного ходу печі при заданій інтенсивності дуття, для кожної печі в конкретних сировинних та експлуатаційних умовах слід встановлювати межу газодинамічного опору і, по можливості, визначити засоби його зниження.

**Висновки.** Показано, що параметр відносної витрати ПВП, побудований на часовій залежності, є найбільш придатним для оперативного регулювання дуттьового режиму. Однак подальші підвищення результативності та ефективності регулювання дуттьового режиму пов'язані з оперативним визначенням певних обмежень у витраті ПВП відносно витрати дуття.

Запропоновано критерій дуттьового режиму, який враховує відносну витрату пилю до кубічного метру дуття, що подається в горн печі за одиницю часу.

Запропоновано методику вибору дуттьового режиму доменної плавки, за яким раціональне співвідношення витрат дуття і ПВП визначають на момент найбільш напруженого газодинамічного стану печі. Показником рівності ходу доменної плавки є сталий відносний опір стовпа шихти, перевищення якого слід розглядати як межу збільшення витрати ПВП при встановленій витраті дуття.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Овчинников Ю.Н., Мойкин В.Н., Спиринов Н.А., Боковиков Б.А. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки. Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение. 1989. 120с.
2. Нові наукові і прикладні результати досліджень ефективності використання пиловугільного палива при виробництві чавуну і випалі вапняку [Електронний ресурс] / Ю.С.Семенов, О.Л.Подкоритов, В.В.Горуша та ін. 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.researchgate.net/publication/339201589>.
3. Металлургия чугуна: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. / Е.Ф.Вегман и др.; под ред. Ю.С.Юсфина. Москва: Академкнига, 2004. 774с.
4. Овчинникова Е.В., Шаповалов А.Н. Влияние параметров дутьевого режима на эффективность доменной плавки в условиях ОАО «Уральская Сталь». *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2013. С.61-67.
5. Шот Р. Стратегии оптимизации процесса вдувания пылеугольного топлива в доменную печь. *Черные металлы*. 2016. № 8. С.15-24.
6. Интенсификация работы доменных печей путем оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А.Гостенин, С.Н.Пишнограев, Н.С.Штафиенко и др. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2011. № 6. С.16-22.
7. Необходимость учета полной энергии горнового газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / В.П.Лялюк, А.К.Тараканов, Д.А.Кассим и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 5. С.9-12.
8. Оценка влияния дутьевых факторов на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях комбината «Криворожсталь» / А.И.Белькова, Н.А.Гладков, К.А.Дмитриенко и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*: сб. науч. тр. Днепропетровськ: ІСМ НАН України, 2005. Вип.10. С.79-87.
9. Фиалков Б.С., Плицин В.Т. Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи. М: Металлургия, 1971. 228с.

Надійшла до редколегії 11.03.2020.