

О. В. Гупало<sup>1</sup>, О. О. Єрьомін<sup>1</sup>, Л. Б. Кабакова<sup>2</sup>, Ю. М. Радченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), Дніпро

<sup>2</sup>[Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України](#) (ІГТМ), Дніпро

## ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ВОДНЮ В МЕТОДИЧНИХ ПЕЧАХ

Металургія є важливою галуззю економіки України. Частка металургії у загальному обсязі викидів діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) складає 23 % [1], а питомі викиди  $\text{CO}_2$  досягають 2,369 т/т виробленої сталі [2]. Одним з шляхів зменшення викидів парникових газів є використання відновлювального водню в якості альтернативи вичерпаному паливу. З огляду на відносні дефіцит та високу вартість відновлювального водню найбільш привабливим є його використання у суміші з природним газом.

В Україні на виробництво прокату витрачається до 24,5 % природного газу від його загально споживання металургією [3, 4]. Тому зменшення викидів  $\text{CO}_2$  у прокатному виробництві за рахунок використання відновлювального водню є актуальною задачею.

В даній роботі досліджено теплову роботу методичної печі при її опаленні сумішшю природного газу та відновлювального водню з вмістом водню у суміші від 0 до 100 %; розраховано питомі витрати природного газу і водню та викиди  $\text{CO}_2$  в атмосферу в залежності від складу палива; визначено ціну відновлювального водню, при якій його використання в методичній печі є економічно доцільним.

Для дослідження теплової роботи печі використано математичну модель [5-7], яка дозволяє виконувати розрахунки процесів спалення палива та теплообміну випромінюванням в системі "газ-футерівка-метал" з урахуванням конвективної тепловіддачі, визначати теплові втрати печі та витрати палива, повітря та димових газів, розраховувати теплообмін в рекуператорі та визначати температуру підігріву повітря горіння. Екологічні показники роботи печі, такі як масовий, питомий та річний викиди  $\text{CO}_2$ , визначалися за результатами розрахунків витрати палива на нагрівання металу в залежності від складу палива.

Дослідження виконано для наступних вихідних даних: продуктивність печі – 100 т/год; розміри слябів, що нагріваються 350×1850×3140 мм; матеріал слябів – Ст 3сп; кількість слябів в печі – 34; річний об'єм виробництва 700 тис. т/рік; тривалість нагрівання металу – 5.4 год; температура посадки металу 20 °С; кінцеві параметри нагрівання слябів: температура поверхні 1220 °С; перепад температур по товщині слябу

20 °С.

Розрахунки виконано для випадків опалення печі природним газом, або сумішшю природного газу та відновлювального водню зі вмістом водню в суміші 25, 50 і 75 %, та для випадку переведення печі на опалення «чистим» воднем. Теплота згоряння природного газу та відновлювального водню, відповідно, 36832,7 та 10760 кДж/м<sup>3</sup>. Прийнято, що на спалювання палива подається атмосферне повітря зі вмістом кисню 21 %. Коефіцієнт витрати повітря 1.03.

Як показали дослідження, зростання частки водню в суміші з 0 до 1 призводить до збільшення витрати палива на піч з 4562 до 15166 м<sup>3</sup>/год, зменшення витрати повітря і димових газів, відповідно з 45936 до 37192 м<sup>3</sup>/год і з 50612 до 44775 м<sup>3</sup>/год, збільшення коефіцієнтів використання теплоти палива та корисної дії печі. Останній збільшується з 48,8 до 50,2 % при повній заміні природного газу воднем.

Результати розрахунків питомих витрат палива та викидів діоксиду вуглецю наведено на рис 1. З рисунка видно, що зі збільшенням частки водню в суміші зменшення викидів CO<sub>2</sub> зростає. Так, переведення печі з природного газу на суміш зі вмістом водню 25% забезпечує зниження питомого викиду CO<sub>2</sub> на 8,59 кг/т металу, в той час як заміна суміші зі вмістом водню 75 % на «чистий» водень забезпечує зменшення питомого викиду CO<sub>2</sub> на 48,41 кг/т металу.

Економічну доцільність застосування водню в нагрівальних печах без урахування капітальних витрат на впровадження заходу, штрафів на перевищення викидів діоксиду вуглецю або можливої вигоди від продажу квоти на його викиди можна оцінити за витратами на паливо, виходячи з умови:

$$FC_{ng} \leq FC_m, \quad (1)$$

де  $FC_{ng} = b_{pg} \cdot C_{pg}$  – питомі витрати на паливо, при опаленні печі природним газом, \$/т металу;  $FC_m = b_m \cdot (X_{pg} \cdot C_{pg} + X_h \cdot C_h)$  – питомі витрати на паливо, при застосуванні суміші природного газу і водню (або «чистого» водню), \$/т металу;  $b_{pg}$  – питома витрата палива при опаленні печі природним газом, м<sup>3</sup>/т металу;  $b_m$  – питома витрата палива при опаленні печі сумішшю природного газу з воднем, м<sup>3</sup>/т металу;  $C_{pg}$  и  $C_h$  – вартість природного газу і водню відповідно, \$/м<sup>3</sup>;  $X_{pg}$  и  $X_h$  – частки природного газу і водню в паливній суміші.

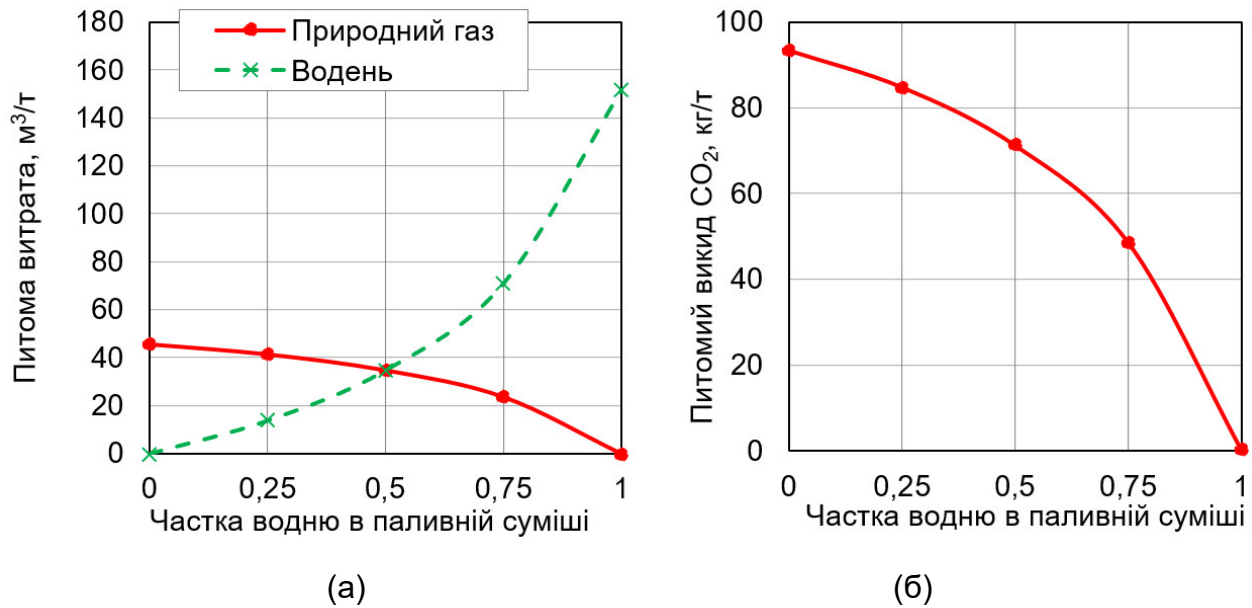


Рис. 1 – Зміна питомих витрат природного газу та водню (а) і питомого викиду діоксиду вуглецю (б) в залежності від складу паливної суміші

З рівняння (1) випливає, що використання водню для опалення печі не призведе до збільшення витрат на нагрівання металу при співвідношенні цін на водень і природний газ ( $C_h / C_{pg}$ ):

$$\frac{C_h}{C_{pg}} \leq \frac{b_{pg} - b_m \cdot X_{pg}}{b_m \cdot X_h} \quad (2)$$

Як показали розрахунки, таке співвідношення цін на палива майже не залежить від показників енергоефективності печі та частки водню в паливній суміші і складає  $C_h / C_{pg} \leq 0,301-0,312$ .

Слід зауважити, що переведення печі на опалення воднем потребує її реконструкції, пов'язаної зі заміною газопроводів та пальників печі. Тому для металургійних підприємств України найбільшу цікавість має використання водню у суміші з природним газом без зміни існуючої конструкції металургійних агрегатів або з мінімальними затратами на їх реконструкцію. Більшість дослідників вважають, що в промислових агрегатах без заміни пальників та метрологічного обладнання можна та цілком безпечно використовувати суміш із вмістом водню до 25% [8, 9].

Для печі, що розглядається, заміна природного газу його сумішшю з воднем при вмісті водню 25 % дозволить знизити витрату природного газу на нагрівання металу з 45,62 до 41,42 м³/т за рахунок використання 13,81 м³/т водню, що в свою чергу дозволить знизити викиди CO<sub>2</sub> на 8,59 кг/т металу, або 6,01 тис. т/рік.

Впровадження заходу не призведе до збільшення витрат на нагрівання металу

при співвідношенні цін на водень і природний газ  $C_h / C_{pg} = 0,304$ . При вартості природного газу 1000 \$/тис. м<sup>3</sup> захід можна вважати економічно доцільним при вартості водню 304 \$/тис. м<sup>3</sup> або 3,40 \$/кг.

### Список літератури

1. Бабаченко, О. І. Перспективи декарбонізації металургійних технологій / О. І. Бабаченко, Л. Г. Тубольцев, О. Є. Меркулов // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. – 2021. – Вип. 35. – С. 4-33. DOI: 10.52150/2522-9117-2021-35-4-33.
2. Shatokha, V. Potential Means to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions of Iron and Steel Industry in Ukraine Using Best Available Technologies / V. Shatokha, E. Matukhno, K. Belokon, G. Shmatkov, J. Sustain // *Metall.* – 2020. – No 6. – P. 451–462. DOI: 10.1007/s40831-020-00289-0.
3. Мищенко, И. М. Черная металлургия и охрана окружающей среды / И. М. Мищенко. – Донецк : ГВУЗ ДонНТУ, 2012. – 446 с.
4. Венгер, В. В. Тенденції та вектори розвитку металургійної галузі України / В. В. Венгер, Н. І. Романовська, М. Б. Чижевська // *Агросвіт*. – 2022. – № 4. – С. 37-47. DOI: 10.32702/2306-6792.2022.4.37.
5. Губинский, В. И. Металлургические печи : Теория и расчеты / В. И. Губинский [та ін.]. – Минск : Белорусская наука, 2007. – Т. 1. – 596 с.
6. Губинский, В. И. Металлургические печи : Теория и расчеты / В. И. Губинский [та ін.]. – Минск : Белорусская наука, 2007. – Т. 2. – 832 с.
7. Румянцев, В. Д. Теория тепло- и массообмена / В. Д. Румянцев // *Днепропетровск : Пороги*, 2006. – 532 с.
8. Shkarovskiy, A. Interchangeability and standardization of the parameters of combustible gases when using hydrogen / A. Shkarovskiy, A. Koliienko, V. Turchenko // *Architecture and Engineering*. – 2022. – Vol. 7. – Issue 1. – P. 33-45. DOI: 10.23968/2500-0055-2022-7-1-33-45
9. Стеценко, А. А. Влияние водорода на физические свойства природного газа и метрологические характеристики систем его учета / А. А. Стеценко, С. Д. Недзельський, В. А. Науменко // *Метрологія та прилади*. – 2019. – № 6. – С. 45-50. DOI: 10/33955/2307-2180(6)2019.45-50