

Кошельник О.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант, Пугачова Т.М., к.техн.н., професор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент, Павлова В.Г., к.техн.н., ст. викладач

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків*

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, звалищний газ, температура горіння, нагрів дуття.

Вступ. В умовах важкого економічного стану, в якому опинилась Україна в останній час, вирішення проблем енергозабезпечення та економії енергоресурсів приймає все більше значення. Чорна металургія є однією з найбільш енерго- та ресурсоємних галузей промисловості, на долю якої припадає близько 70 % енергоспоживання повного металургійного циклу. За прогнозом навіть через 20–30 років 85 % металу буде вироблятися за традиційною технологією, а тільки 10–15 % за допомогою альтернативних технологій, які сьогодні доцільно застосовувати лише в специфічних умовах [1–3]. Для досягнення технологічно необхідної температури в доменній печі для високотемпературного нагрівання великих обсягів дуттьового повітря застосовуються регенеративні повітрянагрівачі з нерухомою вогнетривкою теплоакumuлюючою насадкою [4]. Враховуючи енергоємність доменного виробництва та значну вартість енергоносіїв, проведення досліджень щодо підвищення ефективності та економічності роботи доменних печей сьогодні є досить актуальним завданням.

Виділення невирішеної частини загальної проблеми. Одним із способів економії металургійного коксу та підвищення продуктивності доменних печей є отримання більш високої температури доменного дуття в регенеративних повітрянагрівачах (ПН). Для цього необхідно збільшити температуру горіння палива, що можливо здійснити двома шляхами. Перший – це попередній підігрів компонентів горіння, другий – додавання в газову суміш більш висококалорійних складових [5, 6]. Як правило, для цього використовували природний або коксовий газ. Враховуючи дуже високу вартість природного газу, використання його в якості добавки для підвищення температури горіння є нерентабельним. В той же час, сьогодні виробництво коксового газу в Україні значно зменшилось, що призводить до його дефіциту.

В якості альтернативи пропонується використання звалищного газу. Він являє собою складну суміш різних газів, що є результатом дії мікроорганізмів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ). Звалищний газ складається з 2 основних компонентів – метану та вуглекислого газу. Кількість інших летучих органічних сполук становить < 1 % [7–9]. Саме склад звалищного газу є основним фактором визначення рівня викидів димових газів у результаті процесу горіння. Збільшення вмісту органічних складових призводить до зростання обсягів виходу біогазу. На невеликих звалищах, серед відходів яких домінують неорганічні матеріали, емісія звалищного газу в середньому складає 2000–3000 м³/рік. В той час на полігонах твердих побутових відходів великих міст середній показник накопичення біогазу – близько 5–10 млн. м³/рік за умови,

що полігон функціонує більше 5 років [10, 11]. Звалища України щорічно викидають в атмосферу більше, ніж 1,35 млрд. м³ звалищного газу. Процес організації використання значної кількості твердих відходів є дуже складною проблемою, екологічно небезпечною та в багатьох випадках економічно неефективною. Тому сьогодні актуальним питанням є пошук методів переробки відходів та екологічно-ефективного використання звалищ ТПВ з метою одержання теплової або електричної енергії.

Склад газу значно варіюється в залежності від типу відходів і часу розміщення їх на полігоні (табл. 1). Як видно за табл. 1, звалищний газ має досить велику частку горючих елементів, що робить його перспективним паливом для різних високотемпературних установок.

Таблиця 1 – Склад звалищних газів

Компонент	Частка, %
CH ₄	40–60
CO ₂	35–45
O ₂	≈ 1
N ₂	< 1–10
H ₂	< 1–3
H ₂ O	1–5
Інші сполуки	< 1–3

Викладення основної частини дослідження. Мета розрахунку – визначення необхідного складу паливної суміші, яка забезпечить технологічно необхідний рівень підігріву доменного дуття. Для цього необхідно розрахувати витрату повітря горіння та кількість продуктів згоряння, виходячи з вихідного складу паливної суміші. Склад штучних газів наведений в табл. 2. Розглядалися наступні газы – доменний, коксовий, а також біогаз, що є продуктом розкладання органічних відходів твердих побутових відходів.

Таблиця 2 – Склад штучного газоподібного палива

Газ	Склад газу, %						
	CH ₄	C ₂ H ₄	H ₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
Домений	0,3	-	2,5	23,8	15,2	-	58,2
Коксовий	26,27	3,01	52,74	7,13	5,76	0,603	4,49
Звалищний	50	-	2	-	40	3	5

Визначити дійсне значення температури газів t_d під куполом доменного повітрянагрівача можливо, застосувавши методикy, викладену в [2], що встановлює залежність дійсної від адіабатної температури горіння з використанням пірометричного коефіцієнта $\eta_{пир}$, який враховує реальні умови горіння палива.

Величина коефіцієнта $\eta_{пир}$ може бути знайдена для повітрянагрівача із зовнішньою камерою згоряння за формулою:

$$\eta_{пир} = 3,35 \cdot 10^{-6} \cdot t_k^2 - 9,48 \cdot 10^{-3} \cdot t_k + 7,576,$$

де t_k – температура димових газів під куполом, °С.

Цим умовам повинні задовольняти відповідні значення адіабатної температури горіння паливної суміші:

$$t_a = \frac{t_k}{\eta_{\text{пир}}}$$

Розрахунок необхідного співвідношення газів для отримання заданої температури під куполом повітрянагрівача виконувався за 6 варіантами: чистий доменний газ, коксо-доменна суміш та суміш доменного газу та біогазу за умов підігріву повітря горіння за рахунок теплоти газів, що відводяться, та без нього. Для забезпечення температури під куполом 1250 °С, необхідна адіабатна температура повинна складати 1368 °С.

Склад змішаного газу визначався за виразом:

$$X_{\text{сум}} = X_1(1 - g_1) + X_2 \cdot g_2,$$

де X_1, X_2 – вміст кожного елемента в газовій суміші, %; g_1, g_2 – частка кожного із газів в суміші. Отримані данні розрахунків наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку процесу горіння суміші палив

Найменування показника		Варіанти					
Доля газу в паливній суміші, %	доменно-го g_d	100	100	90,3	–	88,3	92,4
	кокового g_k	–	–	9,7	6,3	–	–
	біогазу g_{bg}	–	–	–	–	11,7	7,6
Температура повітря горіння $t_{\text{пид}}$, °С		50	180	50	180	50	180
Коефіцієнт надлишку повітря α		1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Дійсна витрата повітря горіння $V_{\text{пов}}$, м ³ /м ³		0,707	0,707	1,12	0,98	1,23	1,05
Об'єм продуктів згоряння V_r , м ³ /м ³		1,66	1,66	2,1	1,95	2,2	2,01
Теплота згоряння газів Q_n^p , кДж/м ³		3376	3376	4786	4292	5101	4496
Адіабатна температура горіння t_a , °С		1249	1287	1423	1423	1423	1423
Температура газів під куполом t_k , °С		1189	1201	1300	1300	1300	1300

Як видно із результатів розрахунків, використання чистого доменного газу за умов його попереднього нагріву до температури 180 °С відхідними димовими газами після повітрянагрівача (більшу температуру неможливо забезпечити технологічно) не дає можливості отримати необхідну температуру під куполом. Варіанти 3–6 представляють результати розрахунків процесу горіння суміші доменного, коксового або звалищного газів. Необхідна частка звалищного газу повинна складати 7,6 % за умов підігріву повітря горіння. Витрата паливної суміші для доменного повітрянагрівача об'ємом 1033 м³ буде складати 68523 м³/год при продуктивності ПН 2100 м³ гарячого дуття за годину. Витрата звалищного газу при цьому – 5208 м³/год. На великих полігонах вихід біогазу сягає 10 млн.м³/рік, тобто об'єми його виходу є недостатніми. Тому як перспективний варіант слід розглядати суміш доменного, коксового та звалищного газів, що може забезпечити задану температуру під куполом доменного повітрянагрівача.

Висновок. Для забезпечення температури гарячого дуття на рівні 1100–1250 °С в доменних повітрянагрівачах в якості палива застосовується суміш доменного та коксового газів. В роботі проаналізована можливість заміни при опаленні доменних повітрянагрівачів частини коксового газу звалищним. Звалищний газ після очищення практично не містить сполуки сірки та інші шкідливі речовини, тому може розглядатися в якості висококалорійної добавки для паливної суміші, що подається в повітрянагрівачі. Проведені розрахункові дослідження показали, що для регенераторів доменної печі об'ємом 1033 м³ при нагріванні гарячого дуття в кількості 2100 м³/год необхідна частка звалищного газу складає 7,6 % за умов нагрівання повітря горіння до температури 180 °С. Це забезпечить температуру гарячого дуття 1250 °С.

Крім того, слід відзначити також значний екологічний ефект від застосування звалищного газу. Це вирішує проблему забруднення значних територій та повітряного басейну.

Література

1. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы / И.Г. Товаровский. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.
2. Грес Л.П. Энергосбережение при нагреве доменного дутья / Л.П. Грес. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 209 с.
3. Кошельник О.В. Методика створення універсального обчислювального комплексу для моделювання регенеративних теплообмінників високотемпературних плавильних агрегатів / О.В. Кошельник // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 2/3 (26). – С. 47–50.
4. Кошельник О.В. Моделювання роботи теплообмінних апаратів систем енергота теплопостачання високотемпературних технологічних установок / О.В. Кошельник, Є.В. Хавін, В.Г. Павлова // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2015. – № 1. – С. 14–18.
5. Ganzha A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems / A. Ganzha, O. Zaiets // Technology audit and production reserves. – 2017. – V.1 (33). – P. 48–54.

6. Розробка перспективних систем утилізації теплових вторинних енергоресурсів доменного виробництва / Ганжа А.М., Кошельник О.В., Павлова В.Г., Хавін Є.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2. – С. 14–18.
7. Чонка І.І. Особливості вирішення проблеми відходів в умовах Закарпатської області / І.І. Чонка, С.Ю Чундак, О.В. Рубець // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. – 2010, № 893. – С. 77–83.
8. Прищепка А.М. Екологічні проблеми та стратегія поводження з твердими побутовими відходами (на прикладі міста Дубно) / А.М. Прищепка, О.А. Брежицька // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Зб. наук. праць. – 2007. – Вип. 3 (39). Ч. 1. – С. 145–150.
9. Stassen H.E. Small-Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power: A Global Review / H.E. Stassen // World Bank Technical Paper. Energy series. – 1995. – No. 296. – P. 88.
10. S. Heidenreich. Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility / S. Heidenreich. – London: Academic Press. – 140 p.
11. Rettenberger G. Utilization of Landfill Gas and Safety Measures / G. Rettenberger // Solid Waste Landfilling. – Elsevier, 2018. – P. 463–476.
12. Використання звалищного газу в енергетичних цілях: економічні аспекти / Є. Дудек, П. Клімек, О. Гвоздевич, Ю. Стефанік // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 2 (3). – С. 8–13.

Bibliography (transliterated)

1. Tovarovskyi I.G. Domennaia plavka. Evoliutsyia, khod protsessov, problemy u perspektivy / I.G. Tovarovskyi. – Dnepropetrovsk: Porohy, 2003. – 596 p.
2. Hres L.P. Enerhosberezhnye pry nahreve domennoho dutia / L.P. Hres. – Dnepropetrovsk: Porohy, 2004. – 209 p.
3. Koshelnik O.V. Metodyka stvorennia universalnogo obchysluvalnoho kompleksu dlia modeliuвання reheneratyvnykh teploobminnykh vysokotemperaturnykh plavylynykh ahrehativ / O.V. Koshelnik // Vostochno-evropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi. – 2007. – № 2/3 (26). – P. 47–50.
4. Koshelnik O.V. Modeliuвання roboty teploobminnykh aparativ system enerho- ta teplopostachannia vysokotemperaturnykh tekhnolohichnykh ustanovok / O.V. Koshelnik, Ye.V. Khavin, V.H. Pavlova // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2015. – № 1. – P. 14–18.
5. Ganzha A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems / A. Ganzha, O. Zaiets // Technology audit and production reserves. – 2017. – V.1 (33). – P. 48–54.
6. Розробка перспективних систем утилізації теплових вторинних енергоресурсів доменного виробництва / Ганжа А.М., Кошельник О.В., Павлова В.Г., Хавін Є.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2. – С. 14–18.
7. Chonka I.I. Osoblyvosti vyrishennia problemy vidkhodiv v umovakh Zakarpatskoi oblasti / I.I. Chonka, S.Iu Chundak, O.V. Rubets // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. – 2010, № 893. – P. 77–83.
8. Pryshchepa A.M. Ekolohichni problemy ta stratehiia povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy (na prykladi mista Dubno) / A.M. Pryshchepa, O.A. Brezhytska //

Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Zb. nauk. prats. – 2007. – Vyp. 3 (39). Ch. 1. – P. 145–150.

9. Stassen H.E. Small-Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power: A Global Review / H.E Stassen // World Bank Technical Paper. Energy series. – 1995. – No. 296. – P. 88.

10. S. Heidenreich. Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility / S. Heidenreich. – London: Academic Press. – 140 p.

11. Rettenberger G. Utilization of Landfill Gas and Safety Measures / G. Rettenberger // Solid Waste Landfilling. – Elsevier, 2018. – P. 463–476.

12. Vykorystannia zvalyshchnoho hazu v enerhetychnykh tsiliakh: ekonomichni aspekty / Ye. Dudek, P. Klimek, O. Hvozdevych, Yu. Stefanyk // Naftohazova enerhetyka. – 2007. – № 2 (3). – P. 8–13.

УДК 662.767.2; 669.162.23

Кошельник О.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант, Пугачова Т.М., к.техн.н., професор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент, Павлова В.Г., к.техн.н., ст. викладач

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Проаналізовано можливість використання штучного газоподібного палива – звалищного газу – для опалення регенеративних повітрянагрівачів печей доменного виробництва. Підвищення температури доменного дуття є одним з найбільш ефективних способів економії металургійного коксу та збільшення продуктивності доменних печей. Для цього в якості палива для регенеративних теплообмінників використовується суміш доменного та коксового газів. Враховуючи існуючий сьогодні дефіцит коксового газу, в якості висококалорійної добавки пропонується використання звалищного газу, основним горючим елементом якого є метан. Проведені розрахунки горіння суміші газоподібних палив в трьох комбінаціях: доменних газ, коксо-доменна суміш та суміш доменного та звалищного газів. Розглядалася можливість підвищення температури гарячого дуття до 1250 °С в системі повітропостачання доменної печі об'ємом 1033 м³. Для досягнення заданої температури необхідний рівень адіабатної температури горіння повинен складати 1423 °С, а температури димових газів під куполом – 1300 °С. Даний рівень температури неможливо досягнути при використанні тільки доменного газу, тому розглядалися два варіанти: використання коксо-доменної суміші з вмістом коксового газу 6,3 % та одночасним нагріванням повітря горіння до 180 °С за рахунок теплоти відхідних газів доменних повітрянагрівачів, а також спалювання суміші доменного та звалищного газів з нагріванням повітря горіння до 180 °С (вміст звалищного газу при цьому – 7,6 %). Витрата суміші палив в останньому випадку складає 68523 м³/год, тобто необхідна кількість звалищного газу дорівнює 5208 м³/год. Обсяги виходу газу на звалищах великих міст складають 5–10 млн.м³/рік, що є меншим ніж необхідна кількість біогазу для опалення повітрянагрівача. Тому має сенс розглядати для досягнення необхідного рівня температур використання суміші трьох газів – доменного, коксового та звалищного у відповідних співвідношеннях. Використання звалищного газу також

сприяє вирішенню важливої екологічної проблеми забруднення земель та атмосфери при накопичуванні твердих побутових відходів.

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, звалищний газ, температура горіння, нагрів дуття.

Кошельник А.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант, Пугачова Т.Н., к.техн.н., професор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент, Павлова В.Г., к.техн.н., ст. преподаватель

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Проанализирована возможность использования искусственного газообразного топлива – свалочного газа – для отопления регенеративных воздухонагревателей печей доменного производства. Повышение температуры доменного дутья является одним из наиболее эффективных способов экономии металлургического кокса и увеличения производительности доменных печей. Для этого в качестве топлива для регенеративных теплообменников используется смесь доменного и коксового газов. Учитывая существующий сегодня дефицит коксового газа, в качестве высококалорийной добавки предлагается использование свалочного газа, основным горючим элементом которого является метан. Проведенные расчеты горения смеси газообразных топлив в трех комбинациях: доменный газ, коксодоменная смесь, смесь доменного и свалочного газов. Рассматривалась возможность повышения температуры горячего дутья до 1250 °С в системе воздухообеспечения доменной печи объемом 1033 м³. Для достижения заданной температуры необходимый уровень адиабатной температуры горения должен составлять 1423 °С, а температуры дымовых газов под куполом – 1300 °С. Данный уровень температуры невозможно достичь при использовании только доменного газа, поэтому рассматривались два варианта: использование коксодоменного смеси с содержанием коксового газа 6,3 % и одновременным нагревом воздуха горения до 180 °С за счет теплоты отходящих газов доменных воздухонагревателей, а также сжигание смеси доменного и свалочного газов с нагревом воздуха горения до 180 °С (содержание свалочного газа при этом – 7,6 %). Расход смеси газов в последнем случае составляет 68523 м³/ч, т.е. необходимое количество свалочного газа – 5208 м³/ч. Объемы выхода газа на свалках больших городов составляют 5–10 млн.м³/год, что меньше, чем необходимое количество биогаза для отопления воздухонагревателя. Поэтому имеет смысл рассматривать для достижения необходимого уровня температур использования смеси трех газов – доменного, коксового и свалочного в соответствующих соотношениях. Использование свалочного газа также способствует решению важной экологической проблемы загрязнения земель и атмосферы при накоплении твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: доменная печь, регенеративный воздухонагреватель, свалочный газ, температура горения, нагрев дутья.

Koshelnik O., Hoisan S., Pugacheva T., Kruglyakova O., Pavlova V.

PROSPECTS OF USING ALTERNATIVE FUELS FOR HEATING OF REGENERATIVE AIR HEATERS FOR BLAST FURNACES

Landfill gas as one of the promising artificial gaseous fuels is analyzed for use in heating system of regenerative air heaters for blast furnaces.

Increasing the temperature of blast is one of the most effective ways for metallurgical coke saving and increase the productivity of blast furnaces. To increase this temperature, a mixture of blast-furnace and coke oven gases is used as fuel for regenerative heat exchangers. Considering the current shortage of coke oven gas, landfill gas, the main combustible element of which is methane, is proposed as a high-calorie additive to the main fuel.

Calculations were made for the combustion of a mixture of gaseous fuels in three combinations: blast-furnace gas, blast-furnace and coke gases mixture, blast-furnace and landfill gases mixture.

The possibility of increasing the temperature of the hot blast to 1250 °C for the air supply system of a blast furnace with a volume of 1033 m³ was considered. Calculations showed that in order to achieve such a temperature, the adiabatic combustion temperature should be 1423 °C, and the flue gas temperature in the crown should be 1300 °C. Such temperatures cannot be reached using only blast-furnace gas, so two possible options were considered. The first option is the use of a coke and blast furnace gases mixture with a coke gas content of 6.3 % and combustion air heating to 180 °C by exhaust gases from blast furnace air heaters. The second option is combustion of a mixture of blast-furnace and landfill gas with combustion air heating to 180 °C (the content of landfill gas is 7.6 %).

The flow rate of the fuel mixture for the second option is 68,523 m³/h, and the required amount of landfill gas is 5208 m³/h. The volumes of gas output from landfills in large cities are reported to be 5–10 MCM a year, which is less than the amount of biogas required to heat an air heater. Therefore, to achieve the required temperature it makes sense to consider a tree gas mixture that is blast-furnace, coke and landfill gases an appropriate proportions.

The use of landfill gas contributes to the solution of an important environmental problem of land and atmosphere pollution during the accumulation of municipal solid waste.

Keywords: glass furnace, heat recovery, regenerative heat exchangers, heat storage element, phase transition, efficiency.