

О. В. Кошельник^{1,2}, к.техн.н., доцент, О. В. Жуков¹, аспірант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

¹*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків*

²*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна*

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, теплоакумуючий елемент, фазовий перехід, ефективність.

Вступ

Робота сучасних доменних печей характеризується невисокою температурою димових газів, що відходять, внаслідок чого неможливо забезпечити технологічно необхідний рівень температури нагріву гарячого дуття. Експлуатація печей супроводжується утворенням значних обсягів побічного продукту – доменного газу, який може бути використаний безпосередньо на металургійному підприємстві в якості джерела теплової енергії. З урахуванням цього в системах повітропостачання доменних печей використовуються регенеративні повітрянагрівачі, температура підігріву гарячого дуття в яких становить 1150–1350 °С. Існуючий рівень нагріву дуття визначає продуктивність доменних печей та питому витрату металургійного коксу в них. Тому розробка заходів для підвищення температури гарячого дуття в системах повітропостачання доменних печей є сьогодні актуальним завданням [1–4].

Виділення невирішеної частини загальної проблеми

В роботі [2] докладно проаналізовані основні напрямки підвищення ефективності роботи доменних повітрянагрівачів. Це покращення рівномірності розподілу теплоносіїв у поперечному перерізі насадки теплообмінників (ТО), використання зовнішньої рециркуляції продуктів згоряння у повітрянагрівачах, використання відхідних агломераційних газів у повітрянагрівачах в якості окислювача при спалюванні палива, оптимізація тривалості циклів роботи блоку доменних повітрянагрівачів. Всі ці заходи мають свої певні переваги і недоліки та знайшли використання на різних металургійних підприємствах.

На експлуатаційні та техніко-економічні показники роботи регенеративних теплообмінників впливає ряд факторів – геометричні та конструктивні характеристики теплоакумуючих елементів ТО, тип вогнетривких матеріалів насадки. Насадки прагнуть виконати з можливо більшою поверхнею нагріву в одиниці об'єму та забезпечити високий коефіцієнт теплообміну між теплоносієм і вогнетривом. Сьогодні у повітрянагрівачах доменних печей застосовується блокова насадка, що виконується із динасових, магнетитових або шамотних вогнетривів [5, 6].

Перспективних напрямком підвищення теплової ефективності повітрянагрівачів доменних печей може стати використання в насадках теплоакумуючих елементів з використанням явища фазового переходу. Подібні конструкції застосовуються для акумулювання теплоти в геліосистемах, також пропонувалися схеми з тепловими акумуляторами для регенеративних теплообмінників скловарних печей та систем регенерації пе-

рехідних процесів термосорбційних компресорів [7–11]. Основою теплового акумулятора є окремі вогнетривкі елементи, у внутрішній частині яких знаходяться плавкі сполуки. Ємність такого акумулятору визначається не зміною температури, а зміною агрегатного стану речовини, що акумулює. До переваг подібних акумулюючих систем можна віднести досить високу теплову ємність, незначні габарити та низький тиск. Але сьогодні досі не вирішені проблеми теплообміну з акумулюючим середовищем та в деяких випадках – високої вартості теплоакumuлюючих елементів. Завдяки наявності теплового ефекту від фазового переходу, загальна кількість акумульованої теплоти буде набагато більшою в порівнянні зі звичайними елементами із вогнетривких матеріалів.

Найбільш ефективним є акумулювання теплоти при переході речовин із рідкого агрегатного стану в газоподібний, однак воно не знайшло широкого застосування внаслідок досить низької об'ємної теплоємності газів. Таким чином, в теплових акумуляторах використовують в більшості випадків теплоту плавлення речовин при переході з твердого стану в рідкий, що відбувається із незначними змінами об'ємів. Тому дані теплові акумулятори можна віднести до пристроїв, що мають постійні масу та тиск [7].

Маса акумулюючого матеріалу насадки пропорційна щільності потоку теплової енергії і коефіцієнту корисної дії циклу акумулювання. У процесах, що реально відбуваються, щільність енергії значно нижче теоретично розрахованого значення із-за присутності втрат теплоти, а також неминучих втрат в процесах зарядки та розрядки теплового акумулятору.

Існують ряд хімічних сполук, при застосуванні яких для акумулювання теплоти, забезпечується високий показник щільності теплової енергії, незначні зміни температур і стабільність температурного рівня теплоносія після акумулятора. Але все ж таки значна кількість теплоакumuлюючих матеріалів (ТАМ) у рідкому агрегатному стані становляться корозійно-активними, мають низькі теплофізичні властивості, змінюють об'єм при переході з одного агрегатного стану до іншого та мають високу вартість. Таким чином, питання вибору оптимальних теплоакumuлюючих матеріалів з урахуванням особливостей експлуатації повітрянагрівачів доменних печей є основною проблемою при проектуванні теплообмінних апаратів подібного типу, яка потребує подальшого дослідження.

Викладення основної частини дослідження

На рисунку 1 представлений типовий розподіл температури по висоті теплообмінника $H / H_{\text{заг}}$ у відносних величинах для 2 варіантів: із традиційною насадкою та регенератора, де насадка виконана із матеріалу з фазовим переходом [8]. Тут показані температурні криві наприкінці періодів нагріву та охолодження. Як видно з рисунку, за рахунок використання матеріалів з плавкою вставкою вдається значно збільшити кількість акумульованої теплоти.

Зміна ентальпії в системі «тверде тіло-рідина» від початкової температури t_1 до кінцевої t_2 в даному випадку описується рівнянням

$$\Delta h = c_{p_{me}} \cdot (t_{\phi} - t_1) + h_{\phi} + c_{p_p} \cdot (t_2 - t_{\phi}),$$

де $c_{p_{me}}$ – масова теплоємність речовини у твердому стані при $p = const$, кДж/(кг·К); h_{ϕ} – ентальпія фазового переходу, відповідає температурі плавлення матеріалу насадки t_{ϕ} , кДж/кг; c_{p_p} – масова теплоємність речовини у рідкому стані при $p = const$, кДж/(кг·К).

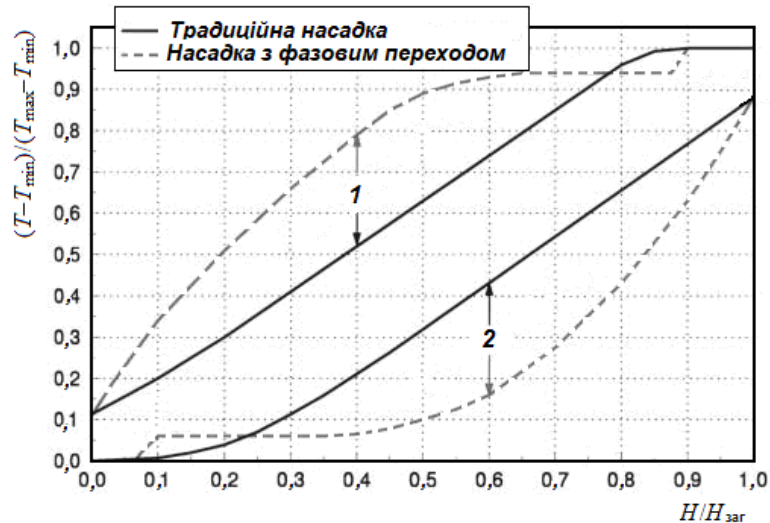


Рисунок 1 – Осевий розподіл температури в насадках регенеративного теплообмінника:
1 – період нагріву; 2 – період охолодження

Величина $c_{p_{мс}} \cdot (t_{\phi} - t_1)$ показує зміну внутрішньої енергії сполук в твердому стані, h_{ϕ} – теплоту фазового переходу, а $c_{p_p} \cdot (t_2 - t_{\phi})$ – зміну внутрішньої енергії сполук в рідкому стані.

Важливе значення при проведенні розрахункових досліджень має коректне визначення величини h_{ϕ} . Для чистих речовин були отримані такі наближені співвідношення:

– для органічних

$$h_{\phi} \approx 0,7 \cdot T_{\phi};$$

– для неорганічних

$$h_{\phi} \approx (24 / M) \cdot T_{\phi},$$

де M – молекулярна маса, кмоль [7].

Для матеріалів, в яких використовується теплота фазового переходу, важливими є такі властивості: високі значення ентальпії фазового переходу; певна температура плавлення, що повинна відповідати умовам експлуатації установки; високі значення коефіцієнту теплопровідності та теплоємності в обох фазах; неможливість процесу перегріву при плавленні; відсутність тенденції до розділу на різні шари; низьке термічне розширення; незначна зміна об'єму матеріалу при переході від однієї фази до іншої; температурна стабільність; незначна хімічна активність; безпечні умови експлуатації (відсутність отруйної пари, реакцій з робочим або теплообмінним середовищем з виділенням небезпечних речовин); низька вартість.

Сьогодні відомий досить широкий спектр речовин, що забезпечують температуру акумуляції в діапазоні температур до 1250 °С. У таблиці 1 наведені характеристики деяких хімічних сполук, що можуть бути застосовані в якості теплоакумулюючої насадки з фазовим переходом при високих температурах [2, 9, 12].

Таблиця 1 – Теплофізичні властивості деяких сполук для застосування в насадках з фазовим переходом

| Хімічна сполука | Температура плавлення t_{ϕ} , °C | Теплота фазового переходу, кДж/кг |
|--|---------------------------------------|-----------------------------------|
| NaF/MgF ₂ | 832 | 618 |
| LiF | 850 | 1044 |
| KF | 858 | 468 |
| K ₂ CO ₃ | 897 | 236 |
| Na ₂ SiO ₃ | 1068 | 427 |
| K ₂ SO ₄ | 1069 | 212 |
| K ₂ SO ₄ /MgO | 1070 | 104 |
| Na ₂ Ti ₃ O ₇ | 1128 | 515 |
| Fe ₂ SiO ₄ | 1200 | 456 |
| Fe ₃ C | 1227 | 286 |
| MgF ₂ | 1236 | 918 |

Використання різних ТАМ потребує розробки конструкцій, спрямованих на максимальне використання переваг акумулюючих матеріалів і мінімізації їх недоліків. Вогнетривкі вироби із «плавкої» кераміки можуть випускатися як у вигляді стандартної цегли, так і у вигляді формових блоків. Були запропоновані різні варіанти застосування насадок з плавкими вставками. Найбільш ефективним є використання насадок з таких матеріалів у зоні найбільших перепадів температур, тобто вгорі та в нижній частині регенератора. Але, враховуючи те, що загальна висота насадки доменних повітрянагрівачів може сягати до 45 м, а її вага складає декілька тон, доцільним буде використання насадки з плавкою вставкою тільки у верхній частині теплообмінника для запобігання його руйнування

Висновок

Застосування теплоакumuлюючих елементів з фазовим переходом в регенеративних теплообмінних апаратах може бути одним з перспективних напрямків підвищення ефективності роботи систем повітропостачання доменних печей за умов коректного вибору відповідних хімічних сполук або їх суміші. Для підтвердження стабільності експлуатації регенеративних повітрянагрівачів з насадкою з фазовим переходом необхідно провести додаткове розрахунково-теоретичне дослідження роботи теплообмінника, що включає моделювання складних теплових процесів в його насадці. Це можливо здійснити за допомогою математичної моделі та відповідного програмного комплексу, створеного автором дослідження [6].

Таким чином, необхідною умовою застосування в регенеративних повітрянагрівачах систем доменних печей теплоакumuлюючих елементів з фазовим переходом є аналіз теплофізичних та техніко-економічних факторів, що впливають на вибір матеріалів для забезпечення довготривалої експлуатації теплообмінних апаратів за умов мінімізації їх вартості.

Література

1. Грес Л.П., Карпенко С.А., Миленина А.Е. Теплообменники доменных печей. Днепропетровск : Пороги, 2012. 491 с.
2. Грес Л.П. Высокоэффективный нагрев дутья: монография. Днепропетровск : Пороги, 2008. 492 с.
3. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb. Essen : Vulkan-Verlag, 1994. 800 s.
4. Ganzha A., Zaiets O., Koshelnik A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems // Technology audit and production reserves. 2017. Vol.1 (33). P. 48–54.
5. Карпенко С.А., Грес Л.П., Быстров А.Е., Воробьева Л.А. Исследование и совершенствование насадок регенераторов путем выбора рациональных размеров ячеек // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 4. С. 108–110.
6. Кошельник О.В., Хавін Є.В., Павлова В.Г. Моделювання роботи теплообмінних апаратів систем енерго- та теплопостачання високотемпературних технологічних установок // *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 1. С. 14–18.
7. Бекман У., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. М. : Мир. 1987. 224 с.
8. Graeter F., Rheinländer J. Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel im Bereich von 150 bis 400 °C // *Forschungs. Verbund. Sonnenenergie. Workshop Wärmespeicherung*. Köln, 2001. P. 65–75.
9. Paksoy H.O. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. Fundamentals, Case Studies and Design // *NATO Science Series. Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. 2002. Vol. 234. 428 p.
10. Кошельник О.В. Розробка енергоефективних термосорбційних компресорів з системою регенерації теплоти перехідних процесів // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2010. № 52. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». С. 16–20.
11. Кошельник О.В., Гойсан С.Б., Пугачова Т.М., Круглякова, О.В. Павлова В.Г. Особливості застосування теплоакumuлюючих елементів з фазовим переходом в регенеративних теплообмінниках скловарних печей // *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 1. С. 63–70.
12. Kenisarin M.M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010). P. 955–970.

Bibliography (transliterated)

1. Hres L.P., Karpenko S.A., Mylenyna A.E. Teploobmenniki domennykh pechey. Dnepropetrovsk : Porohy, 2012. 491 p.
2. Hres L.P. Vysokoeffektivnyy nagrev dutya: monografiya. Dnepropetrovsk : Porohy, 2008. 492 p.
3. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb. Essen : Vulkan-Verlag, 1994. 800 p.
4. Ganzha A., Zaiets O., Koshelnik A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems // *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol.1 (33). P. 48–54.
5. Karpenko S.A., Hres L.P., Bistrov A.E., Vorobyova L.A. Yssledovanye i sovershenstvovanye nasadok reheneratorov putem vibora ratsyonalnikh razmerov yacheek // *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promishlennost*. 2016. № 4. P. 108–110.

6. Koshelnik O.V., Khavin Ye.V., Pavlova V.H. Modeliuvannia roboty teploobminnykh aparativ system enerho- ta teplopostachannia vysokotemperaturnykh tekhnolohichnykh ustanovok // *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2015. № 1. P. 14–18.
7. Bekman U., Hylly P. *Teplovoe akkumulyrovanye enerhyu*. M. : Myr. 1987. 224 p.
8. Graeter F., Rheinländer J. Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel im Bereich von 150 bis 400 °C // *Forschungs Verbund Sonnenenergie. Workshop Wärmespeicherung*. Köln, 2001. P. 65–75.
9. Paksoy H.O. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. Fundamentals, Case Studies and Design // *NATO Science Series. Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. 2002. Vol. 234. 428 p.
10. Koshelnik O.V. Rozrobka enerhoefektyvnykh termosorbtsiinykh kompresoriv z systemoiu reheneratsii teploty perekhidnykh protsesiv // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. 2010. № 52. Tematychnyi vypusk «Khimii, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia». P. 16–20.
11. Koshelnik O.V., Hoisan S.B., Puhachova T.M., Kruhliakova, O.V. Pavlova V.H. Osoblyvosti zastosuvannia teploakumuliuichykh elementiv z fazovym perekhodom v reheneratyvnykh teploobminnykakh sklovarnykh pechei // *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2022. № 1. P. 63–70.
12. Kenisarin M.M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010). P. 955–970.

УДК 669.162.23; 669.162.231.83

О. В. Кошельник, к.техн.н., доцент, О. В. Жуков, аспирант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності експлуатації систем повітропостачання доменних печей, які обладнані регенеративними теплообмінниками з нерухою вогнетривкою насадкою для нагріву гарячого дуття. Проаналізовані існуючі методи покращення показників роботи повітрянагрівачів. Показано, що подальше зростання теплової ефективності регенеративних теплообмінників шляхом оптимізації параметрів роботи або заміни насадок є неможливим без збільшення габаритних параметрів. В якості перспективного заходу пропонується використання теплоакумулюючих елементів з фазовим переходом, де в якості плавкої вставки застосовуються сполуки з певною температурою плавлення, яка відповідає режимам роботи повітрянагрівачів доменних печей. Вони знайшли застосування для накопичення теплоти в геліосистемах. За рахунок дії «залишкового» теплового ефекту насадки акумулюють додаткову кількість теплоти. Це дозволить збільшити теплову потужність теплообмінника та підвищити температуру нагріву гарячого дуття без змін габаритних параметрів. Умови роботи систем повітропостачання доменних печей відрізняються високим рівнем температур, що складає 1200–1350 °C, значними витратами та швидкостями гарячого та холодного теплоносіїв, їх підвищеним тиском. Тому виникає питання вибору відповідних теплоакумулюючих елементів з урахуванням їх властивостей та режимних параметрів роботи доменних печей.

Експлуатація подібних насадок виявила ряд проблем, рішення яких потребують проведення додаткових досліджень. Для цього необхідно провести моделювання квазістаціонарних теплообмінних процесів у насадковій камері регенеративних повітрянагрівачів з метою вибору хімічних сполук або їх сумішей, що відповідають умовам експлуатації систем повітропостачання доменних печей, та визначити оптимальні поєднання матеріалів насадки. Застосування даної технології дозволить отримати більш високу температуру нагріву гарячого дуття, зменшити витрату металургійного коксу або збільшити продуктивність доменної печі.

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, теплоакumuлюючий елемент, фазовий перехід, ефективність.

А. В. Кошельник, к.техн.н., доцент, А. В. Жуков, аспірант

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В работе рассмотрена проблема повышения эффективности эксплуатации систем воздухообогрева доменных печей, которые оборудованы регенеративными теплообменниками с неподвижной огнеупорной насадкой для нагрева горячего дутья. Проанализированы существующие методы улучшения показателей работы воздухонагревателей. Показано, что дальнейший рост тепловой эффективности регенеративных теплообменников путем оптимизации параметров работы или замены насадок является невозможным без увеличения габаритных параметров. В качестве перспективного мероприятия предлагается использование теплоаккумуляторов с фазовым переходом, где в качестве плавкой вставки применяются соединения с определенной температурой плавления, которая отвечает режимам работы воздухонагревателей доменных печей. Они нашли применение для накопления теплоты в гелиосистемах. За счет действия "остаточного" теплового эффекта насадки аккумулируют дополнительное количество теплоты. Это позволит увеличить тепловую мощность теплообменника и повысить температуру нагрева горячего дутья без изменения габаритных параметров. Условия работы систем воздухообогрева доменных печей отличаются высоким уровнем температур, который составляет 1200–1350 °С, значительными расходами и скоростями горячего и холодного теплоносителей, их повышенным давлением. Поэтому возникает вопрос выбора соответствующих теплоаккумуляторов с учетом их свойств и режимных параметров работы доменных печей. Эксплуатация подобных насадок выявила ряд проблем, решение которых требуют проведения дополнительных исследований. Для этого необходимо провести моделирование квазистационарных теплообменных процессов в насадочной камере регенеративных воздухонагревателей с целью выбора химических соединений или их смесей, которые отвечают условиям эксплуатации систем воздухообогрева доменных печей, и определить оптимальные объединения материалов насадки. Применение данной технологии позволит получить более высокую температуру нагрева горячего дутья, уменьшить расход металлургического кокса или увеличить производительность доменной печи.

Ключевые слова: доменная печь, регенеративный воздухонагреватель, теплоаккумулятор, фазовый переход, эффективность.

O. V. Koshelnik, O. V. Zhukov

PROMISING TYPES OF HEAT STORAGE ELEMENTS FOR REGENERATIVE AIR HEATERS OF BLAST FURNACES

The paper considers the problem of improving the efficiency of operation of blast furnace air supply systems, which are equipped with regenerative heat exchangers with fixed refractory nozzle for heating hot blast. The existing methods of improving the performance of air heaters are analyzed. It is shown that further growth of thermal efficiency of regenerative heat exchangers by optimization of operation parameters or replacement of nozzles is impossible without increasing the overall parameters. As a perspective measure the use of heat storage elements with phase transition is proposed, where as a fusible insert compounds with a certain melting point are used, which corresponds to the operating modes of blast furnace air heaters. They have found application for heat storage in solar systems. Due to the "residual" thermal effect, the nozzles accumulate additional heat. This will increase the heat capacity of the heat exchanger and increase the hot blast heating temperature without changing the dimensional parameters. Operating conditions of air supply systems of blast furnaces are characterized by high temperature level, which is 1200–1350 °C, significant flow rates and speeds of hot and cold coolants, their increased pressure. Therefore, there is a question of choosing appropriate heat-accumulative elements taking into account their properties and operating parameters of blast furnaces. Operation of such nozzles has revealed a number of problems, the solution of which requires additional research. For this purpose it is necessary to carry out modeling of quasi-stationary heat-exchange processes in the nozzle chamber of regenerative air heaters in order to select chemical compounds or their mixtures, which meet the operating conditions of blast furnace air supply systems, and to determine the optimal combinations of nozzle materials. Application of this technology will make it possible to obtain higher hot blast heating temperature, reduce metallurgical coke consumption or increase blast furnace productivity.

Keywords: blast furnace, regenerative air heater, heat storage element, phase transition, efficiency.