

УДК 66.045:662.613.125

Воробйова Лілія Олександрівна, доцент, кандидат технічних наук
Єрємін Олександр Олегович, завідувач кафедри, доктор технічних наук
Гупало Олена В'ячеславівна, доцент, кандидат технічних наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ТА АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ В ТРУБНІЙ РЕГЕНЕРАТИВНІЙ НАСАДЦІ ПАЛЬНИКОВОГО ПРИСТРОЮ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПЕЧІ

Національна металургійна академія України. м. Дніпро

За допомогою математичної моделі чисельно досліджено нестационарний конвективний теплообмін у малогабаритному регенераторі. Подано результати теплової роботи регенератора з насадкою, яка складається з жароміцних металевих труб, що встановлено у камері регенератора коаксіально одна щодо другої.

Ключові слова: регенератор, насадка, теплообмін, конвекція, підігрівання повітря, аеродинамічний опір

Вступ. На сьогодні втрати теплової енергії є серйозною проблемою під час експлуатації промислових печей в Україні. Діючі нагрівальні й термічні печі металургії та машинобудування мають потребу в поліпшенні показників використання палива. Тому заходи, що спрямовано на підвищення енергоефективності теплотехнічних агрегатів, є сучасними та актуальними. У нагрівальних печах застосовують низку теплотехнічних заходів, пов'язаних з економією палива та поліпшенням екологічних показників: раціональну організацію руху газів у робочому просторі; збагачення повітря, яке подають на спалювання палива, киснем; використання нових видів вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів; застосування нових типів пальників і поліпшення ефективності роботи пристроїв, що утилізують теплоту, для повернення теплоти димових газів у робочий простір печі.

З використанням традиційних технологій близько 70 % теплової енергії високотемпературних агрегатів втрачається із продуктами згоряння, що відходять з печі. Тому ефективним способом економії палива є підігрівання повітря, що подають на його горіння, шляхом утилізації теплоти димових газів на виході з робочого простору печей у регенеративних пальниках з малогабаритними теплообмінниками.

Регенеративні пальники встановлюють парами, які працюють за принципом короткострокової акумуляції енергії димових га-

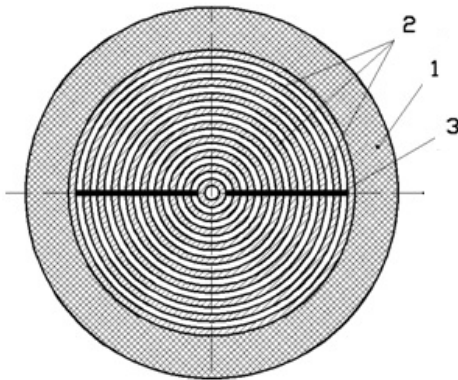
зів у насадці регенератора. Характерною рисою регенеративного підігрівання повітря є нестационарність температурного поля в насадці регенераторів, тобто періодичне змінювання температури підігрівання повітря та диму. При тривалому часі роботи регенеративної системи опалення металургійної печі з постійною тепловою потужністю (та постійною витратою теплоносіїв, що йдуть крізь регенеративну насадку), регенератори переходять на квазістационарний режим роботи.

Такі пальники дозволяють утилізувати 85...90 % теплоти продуктів згоряння, забезпечуючи підігрівання повітря до температур, які можуть досягати величини всього на 100...150 °С менше, ніж робоча температура печі. У такому разі витрата палива може бути зниженою на величину до 50 %.

Особливістю малогабаритних регенераторів є мала теплоємність і більш питома поверхня нагрівання насадки порівняно з традиційними пічними регенераторами. Проте недоліком регенеративних пальників є суттєві капітальні витрати на їх впровадження, які, в основному, пов'язані з вартістю насадки регенераторів. Для зменшення вартості пальників розвиток конструкцій насадки повинен йти у напрямку зниження її вартості й аеродинамічного опору, підвищення довговічності та зменшення матеріалоемності [1-8].

Постановка завдання. Дана робота присвячена розрахунковому аналізу теплової роботи регенератора з сучасною компактною трубною насадкою нового типу. Конс-

трубку трубної насадки регенеративного пального подано на рис. 1. У камері регенератора 1 встановлено насадку, що містить труби 2, які коаксіально упаковані одна всередині другої. Відстань між трубами забезпечують за рахунок двох фіксаторів-гребінців 3, розташованих зверху та знизу насадки уздовж осі. Конструкція та робота насадки регенератора з коаксіальними трубами наведені в патенті [7].



1 - камера регенератора; 2 - трубна насадка; 3 - фіксатор у вигляді гребінців

Рисунок 1 – Насадка регенератора

Математичне формулювання задачі складається із системи диференціальних рівнянь, що включає рівняння теплообміну в трубній насадці (1) та рівняння теплового балансу теплоносія (2):

$$c_n(T) \cdot \rho \cdot f \cdot \frac{\partial T(\tau, x)}{\partial \tau} = q_z \cdot \pi \cdot d, \quad (1)$$

$$\pm V_z \cdot c_z(T_z) \cdot \frac{\partial T_z(\tau, x)}{\partial x} = q_z \cdot \pi \cdot d. \quad (2)$$

Початкові та граничні умови мають вид:

$$T(0, x) = T_0; \quad (3)$$

$$0 \leq x \leq \ell; \quad (4)$$

$$T_0(\tau, 0) = T_{0_0}; \quad (5)$$

$$T_{нов}(\tau, \ell) = T_{нов_0}; \quad (6)$$

$$V_0(\tau, 0) = \text{const}; \quad (7)$$

$$V_{нов}(\tau, \ell) = \text{const}; \quad (8)$$

$$q_z = \alpha_z \cdot (T_z - T), \quad (9)$$

де $c_n(T)$, $c_z(T_z)$ – середня питома теплоємність трубної насадки, Дж/(кг·К) і газу, Дж/(м³·К) відповідно; ρ – щільність матеріалу насадки, кг/м³; T – температура стінки

труби, °С; q_z – щільність теплового потоку на поверхні стінки труби у димовий або повітряний період, Вт/м²; f – площа поперечного перерізу стінки труб, м²; d – внутрішній діаметр труби, м; V_z – витрата теплоносія (V_0 – витрата диму та $V_{нов}$ – витрата повітря), м³/с; T_z – температура газу, °С; T_{0_0} , $T_{нов_0}$ – температура диму та повітря на вході в трубну насадку, °С, відповідно; ℓ – довжина труби, м; α_z – коефіцієнт тепловіддачі у димовий або повітряний період, Вт/(м²·К).

У моделі прийнято наступні допущення:

- стінки труб вважали термічно тонким тілом;
- трубна насадка має рівномірний початковий розподіл температури;
- температура диму та повітря на вході в насадку постійна у часі;
- у кожному наступному періоді нагрівання або охолодження за початкового розподілу температури по перетину трубної насадки прийнято температурне поле, яке отримане наприкінці попереднього періоду;
- теплофізичні властивості газоподібних теплоносіїв і матеріалу стінки залежать від температури, їх значення приймали з літератури [10].

Систему рівнянь (1)-(2) вирішували методом елементарних теплових балансів за неявною різницевою схемою. Параметри кінцево-різницевої сітки $\Delta \ell$ та $\Delta \tau$ обирали таким чином, щоб розбіжність між попередніми та наступними ітераціями не перевищувала 1,0 % [11].

Аналіз отриманих результатів. Розрахунки виконували за наступними вихідними даними:

- паливо: природний газ із нижчою теплотою згоряння 34,0 МДж/м³;
- форма поперечного перерізу камери регенератора є круглою з внутрішнім діаметром камери 0,201 м;
- насадка у вигляді труб, що встановлено в камері регенератора одна відносно іншої коаксіально з рівним зазором 1 мм. Гідравлічний діаметр каналу дорівнює 2 мм. Труби в теплообміннику розміщено вертикально. Зовнішній діаметр найменшої труби

складає 6 мм, а найбільшої – 201 мм, товщина стінки – 1 мм. Кількість труб – 49 шт. Питома поверхня нагрівання труб склала $1009,9 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (порізність – 0,495). Труби виготовлено зі сталі 08X18N10 (AISI 304);

– початкова температура насадки $20 \text{ }^\circ\text{C}$; температура диму та повітря на вході в насадку склала відповідно $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ і $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Напрямок руху диму зверху вниз, повітря – знизу нагору;

– тривалість димового та повітряного періодів – 60 с;

– теплофізичні властивості теплоносіїв і матеріалу стінки віднесено до температур потоку та стінки труби за висотою насадки;

– висоту насадки розраховували за умови одержання однакової температури підігрівання повітря на виході з регенератора $850 \text{ }^\circ\text{C}$.

У першому розрахунку змінною величиною приймали загальну витрату теплоносія (димових газів і повітря) за нормальних умов у камері перед насадкою, яка дорівнює 100; 125; 150; 175; 200 $\text{м}^3/\text{год}$.

Результати розрахунків показали, що процес тепловіддачі відбувається за ламінарним рухом газів для прийнятих значень витрати диму та повітря. У табл. 1 наведено порівняльні розрахункові характеристики трубчатого регенератора залежно від загальної витрати теплоносія.

Таблиця 1 – Характеристика трубного регенератора залежно від витрати теплоносія

Параметри	Витрата теплоносія за нормальних умов, $\text{м}^3/\text{год}$				
	100	125	150	175	200
Швидкість теплоносія за нормальних умов, м/с	0,902	1,128	1,353	1,579	1,804
Висота насадки, м	0,185	0,230	0,273	0,320	0,365
Маса насадки, кг	22,58	28,10	33,32	39,10	44,55
Середня за період температура диму на виході з регенератора, $^\circ\text{C}$	270				
Аеродинамічний опір насадки, Па	261	406	579	791	1031

З табл. 1 видно, що за однакової температури підігрівання повітря (коефіцієнт ре-

генерації теплоти димових газів, що прямують із печі, склав 75,6 %) та інших рівних умовах зі зменшенням витрати теплоносія знижуються матеріалоемність насадки, висота й аеродинамічний опір.

Другий розрахунок виконано з однаковою витратою теплоносія за нормальних умов, що дорівнює $100 \text{ м}^3/\text{год}$. Гідравлічний діаметр каналу – 2 мм. Змінною величиною приймали товщину стінки труб, рівну 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм. Результати розрахунку наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика трубного регенератора залежно від товщини стінки труб

Параметри	Товщина стінки труб, мм			
	1	2	3	4
Порізність	0,495	0,327	0,242	0,192
Питома поверхня нагрівання, $\text{м}^2/\text{м}^3$	1009	673	505	404
Кількість труб, шт	49	33	24	19
Висота насадки, м	0,185	0,20	0,25	0,297
Маса насадки, кг	22,58	33,2	44,0	54,5
Середня за період температура диму на виході з регенератора, $^\circ\text{C}$	270			
Аеродинамічний опір насадки, Па	261	272	357	431

З табл. 2 видно, що за однакової температури підігрівання повітря й інших рівних умов зі збільшенням товщини стінки труб від 1 до 4 мм маса насадки підвищується у 2,4 рази, а висота й аеродинамічний опір – у 1,6 рази.

Висновки. Чисельно досліджено процес нестационарного конвективного теплообміну й аеродинамічного опору в насадці з жароміцних металевих труб, встановлених у камері регенератора пальникового пристрою коаксіально одна щодо другої. Результати розрахунків показали, що за одною і тою же величиною теплової потужності регенеративного пальника та температури нагрівання повітря зі зменшенням швидкості теплоносія та товщини стінки труб знижуються матеріалоемність насадки, її висота та аеродинамічний опір.

Бібліографічний список

1. **Боштейн, В. А.** Формирование научно-технической политики по энергосбережению на предприятиях горно-металлургического комплекса Украины [Текст] / В. А. Боштейн, В. В. Лесовой, А. Л. Каневский и др. // Экология и промышленность. – 2007. – № 4. – С. 4-7.
2. **Ермаков, А. В.** Обновление металлургии [Текст] / Ермаков А.В. (ред.) – М. : Интехэко, Сборник докладов Третьей международной конференции по металлургии, 2012. – 142 с.
3. **Губинский, В. И.** Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей [Текст] / В. И. Губинский // Металлургическая теплотехника : сб. научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – В 2-х книгах, кн. 1. – 2005. – С. 149-156.
4. **Воробьева, Л. А.** Перспективные направления утилизации теплоты в промышленных печах [Текст] / Л. А. Воробьева // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – 2005. – В 2-х книгах, кн. 1. – С. 80-86.
5. **Бурокова, А. В.** К вопросу рекуперации теплоты газов печей термообработки металлических изделий [Текст] / А. В. Бурокова, Ю. А. Рахманов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент», 2014. – № 1. – С. 1-10.
6. **Дистергефт, И. М.** Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнечного производств (История развития. Теория и практика) [Текст] / И. М. Дистергефт, Г. М. Дружинин, И. И. Щербинин и др. // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – 2002. – С. 44-57.
7. **Гупало, Е. В.** Исследование нагрева металла в кольцевой печи с регенеративными горелками [Текст] / Е. В. Гупало, А. О. Еремин, Л. А. Воробьева и др. // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Випуск 8. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2016. – С. 214-221.
8. **Кашаев, В. В.** Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : учеб. пособ. [Текст] / В. В. Кашаев. – Донецк : ДонНТУ, 2016. – 105 с.
9. **Патент на корисну модель 99161 Україна**, МПК (2015.01) F 28 D 19/00, F 28 F 1/00. Насадка регенеративного теплообмінника / Л. О. Воробйова, О. О. Єрьомін; заявник та власник патенту Національна металургійна академія України. – № у 2014 11838 ; заявл. 03.11.14 ; опубл. 25.05.15, Бюл. № 10.
10. **Казанцев, Е. И.** Промышленные печи [Текст] / Е. И. Казанцев. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.
11. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей [Текст] / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Круппенников. – М. : Металлургия, 1990. – 239 с.

Воробьева Лилия Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии, теплотехники и охраны труда Национальной металлургической академии Украины (Днепр, Украина). E-mail: vorobiova.liliia@gmail.com

Еремин Александр Олегович, доктор технических наук, заведующий кафедрой экологии, теплотехники и охраны труда Национальной металлургической академии Украины (Днепр, Украина). E-mail: aoeremin@gmail.com

Гупало Елена Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии, теплотехники и охраны труда Национальной металлургической академии Украины (Днепр, Украина). E-mail: gupaloelena@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТРУБНОЙ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ НАСАДКЕ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА МЕТАЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Численно исследован нестационарный конвективный теплообмен в малогабаритном регенераторе при помощи математической модели. Представлены результаты тепловой работы регенератора с насадкой, состоящей из жаропрочных металлических труб, установленных в камере регенератора коаксиально одна относительно другой.

Ключевые слова: регенератор, насадка, теплообмен, конвекция, подогревание воздуха, аэродинамическое сопротивление

Vorobiova Liliya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine). E-mail: vorobiova.liliia@gmail.com

Yeromin Oleksandr, professor, Doctor of Technical Science, Head of the Department of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine). E-mail: aoeremin@gmail.com

Gupalo Olena, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine). E-mail: gupaloelena@gmail.com

THE STUDY OF HEAT TRANSFER AND AERODYNAMIC RESISTANCE IN THE TUBULAR REGENERATIVE CHECKERWORK OF BURNER FOR METALLURGICAL FURNACE

Using a mathematical model a heat transferring a small-sized regenerator was numerically studied. The results of the thermal operation of the regenerator with a checker work are presented. The checkerwork consists of heat-resistant metal pipes, which are installed in the regenerator chamber coaxially.

Keywords: regenerator, checkerwork, heat exchange, convection, air-heating, aerodynamic resistance

Стаття надійшла до редакції 02.04.2018 р.
Рецензент, проф. В.А. Шатоха

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>