УДК 536.24; 662.74.001.24

Кошельнік О.В.

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Представлено методику розрахунків теплових процесів у регенеративних теплообмінниках нагрівальних коксових печей. На її основі створено програму, що моделює роботу регенераторів коксових печей з обліком технологічних й експлуатаційних обмежень. Це дозволяє одержати значення температур теплоносіїв і насадки в часі та по висоті теплообмінника.

Представлена методика расчетов тепловых процессов в регенеративных теплообменниках нагревательных коксовых печей. На ее основе создана программа, моделирующая работу регенераторов коксовых печей с учетом технологических и эксплуатационных ограничений. Это позволяет получить значения температур теплоносителей и насадки во времени и по высоте теплообменника.

A procedure for the numerical analysis of termal processes in regenerative heat exchangers of heating coke furnaces is presented. Based on this procedure, a program simulating the operation of coke-furnace regenerators with regard for technological and operational limitations is created. This enables one to determine the variation of the temperatures of heat carriers and checkerworks with time heat-exchanger height.

a – коефіцієнт температуропровідності насадки;
$a_г$ – поглинальна здатність газу стосовно випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі стінки;
$\bar{a}_г$ – поглинальна здатність газу з урахуванням додаткових відбиттів і поглинань стосовно випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі стінки;
b – товщина стінки елемента насадки;
Bi – число Біо;
d – гідравлічний діаметр;
L – ефективна довжина променів;
T – температура;
W – швидкість руху теплоносіїв у каналах насадки;
α – коефіцієнт тепловіддачі,
ε – поглинальна здатність;
$\bar{\varepsilon}_г$ – поглинальна здатність газу з урахуванням додаткових відбиттів і поглинань при температурі газу;
$\tau_г$, $\tau_п$ – тривалість циклів нагрівання й охолодження.

Індекси:
еф – ефективний;
к – конвективний;
нав – наведений;
пр – променистий;
г – газ;
п – повітря;
ст – стінка.

Вступ

Високотемпературні теплотехнологічні комплекси з регенеративними теплообмінними апаратами широко використовуються у різних галузях промисловості, у тому числі в коксохімічному виробництві, де найбільш енергоємними агрегатами є коксові печі [1, 2]. Для виробництва металургійного коксу та коксового пеку застосовуються камерні печі періодичної дії, об'єднані в батареї. Коксова піч, як теплотехнічний агрегат, складається з прямокутної камери, де відбувається технологічний процес коксування вугілля, опалювальних простінків, де згоряє опалювальний газ та регенераторів для утилізації теплоти димових газів, що відходять. Обігрів печей здійснюється коксовим газом або сумішшю коксового і доменного газів. Для підігріву повітря горіння за рахунок утилізації теплоти димових газів використовуються регенератори з нерухо-

мою насадкою із фасонної вогнетривкої цегли з щілинними або круглими каналами [1, 3]. Спрощену технологічну схему виробництва коксу наведено на рис. 1.

В залежності від конструктивних особливостей печей в регенераторах нагрівається тільки повітря горіння або повітря горіння і низькокалорійне паливо (доменний газ). Схеми руху газів в опалювальній системі, незважаючи на розходження в конструкціях коксових печей, мають наступні загальні закономірності. Повітря горіння надходить через отвори в газоповітряних клапанах у регенератор, проходить у ньому знизу нагору, нагріваючись при цьому до температури 1100...1150 °С. Далі повітря поступає через сполучені канали у вертикальні опалювальні канали, де відбувається змішування його з газом. Коксовий газ підводиться із газорозподільного каналу у печах з бічним підведенням опалювального газу або через дюзові канали в печах з нижнім підведенням коксового газу. Доменний газ підводять сполучним каналом (косим ходом) з регенератора. В опалювальних вертикальних каналах гази, змішуючись із повітрям, згорають, і продукти горіння нагрівають вугілля.

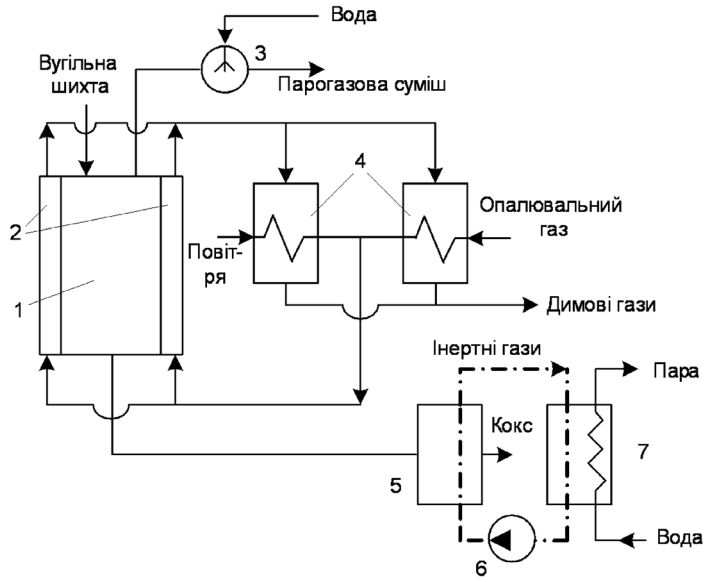

Рис. 1. Спрощена технологічна схема виробництва коксу: 1 – камера коксування; 2 – обігрівальні простінки; 3 – збірник сирого коксового газу; 4 – регенератори; 5 – камера сухого гасіння коксу; 6 – циркуляційна газодувка; 7 – котел-утилізатор.

Постановка задачі

Відзначимо, що регенератори коксових печей суттєво відрізняються від регенераторів інших плавильних печей своїми незначними розмірами насадочної камери та типами насадки. На підприємствах України в регенераторах нагрівальних печей коксового виробництва використовується насадка із фасонної вогнетривкої цегли з вузькими каналами для проходу теплоносіїв у вертикальній площині. У цеглині розташовано декілька прямокутних каналів розміром 0,018 х 0,1 м або 0,022 х 0,107 м. Для збільшення поверхні нагріву в нижній частині цегли та збоку виконано спеціальні виїмки, за рахунок чого вдається поліпшити інтенсивність теплообміну в насадках. Наявність горизонтальних проходів сприяє більш рівномірному розподілу газів по перерізу насадочної камери регенератора. На підприємствах промислово розвинутих країн в регенераторах застосовуються також блоки з циліндричними газовими каналами. Вони мають питому площу поверхні приблизно 100 $м^2/м^3$ та вільний об'єм каналів до 47% [3].

Підвищення енергоефективності роботи коксових печей пов'язано з необхідністю удосконалення теплових режимів регенераторів. До теперішнього часу тепловий розрахунок регенеративних теплообмінників коксових печей здійснювався за допомогою спрощеної методики, в основі якої лежить визначення середніх значень коефіцієнтів теплопередачі за період роботи регенератора за формулою Е. М. Гольдфарба і І. Д. Семікіна [4, 5]. Але ця методика не дозволяє визначати динаміку змін температур теплоносіїв та вогнетривів насадки в процесі нагрівання і охолодження насадки, у тому числі і по висоті теплообмінника, що є важливим для вибору вогнетривких матеріалів.

Основна частина

Система диференціальних рівнянь, що описує процес теплообміну в насадці регенеративних теплообмінників, є досить складною, тому на практиці широкого застосування набули кінцево-

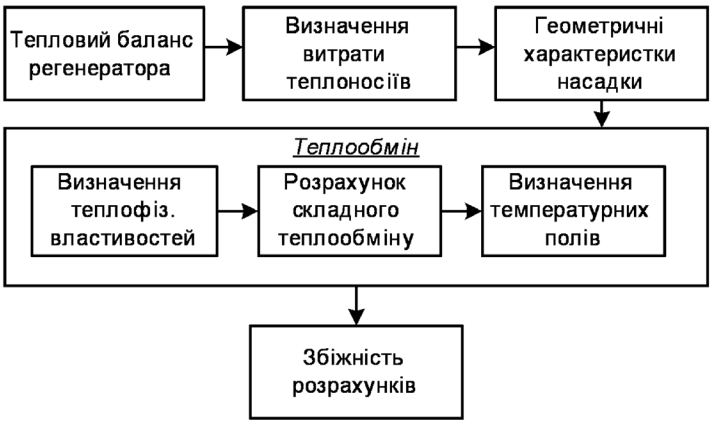

Рис. 2. Блок-схема програми розрахунку регенераторів коксових печей.

різницеві методи, за допомогою яких при великій кількості розрахункових елементів та часових кроків отримують достатньо високу точність розрахунків. До таких методів відноситься метод елементарних теплових балансів. Цей метод базується на використанні фундаментального закону збереження енергії. Зв'язок між розподілом теплоти в просторі й величинами теплового потоку можна визначити, використовуючи закони Н'ютона–Ріхмана і Фур'є. Для визначення температури теплоносія в розрахунковому елементі насадки складаються балансові співвідношення при нагріванні й охолодженні насадки, звідки знаходиться значення температури теплоносія для наступного розрахункового елемента насадки.

З використанням кінцево-різницевого методу елементарних теплових балансів було створено математичну модель для розрахунків регенеративних теплообмінників плавильних та нагрівальних промислових печей. На основі цієї математичної моделі розроблено методику та створено обчислювальний комплекс, призначений для дослідження роботи регенеративних теплообмінників при використанні насадок з різною формою каналів [6, 7]. Основним блоком програми є блок розрахунків процесів конвективного і променистого теплообміну в каналах насадки. Цей блок складається з окремих взаємозалежних модулів (рис. 2).

Для інженерної практики найбільший практичний інтерес для розрахунку регенераторів являють розподіл температур по висоті насадки та зміна температури теплоносіїв у каналах у циклі нагрівання-охолодження для визначення висот зон вогнетривів. Це дозволяє використати одновимірний спосіб описання і розрахунку теплообміну у каналах насадки при умові течії теплоносія зі сталими по перерізу каналу швидкістю і температурою, які можуть змінюватися лише у одному вимірі по довжині каналу насадки. Тоді диференціальне рівняння теплопровідності з граничними умовами третього роду $\alpha\left(x,\tau,t_{\text{ст}}\right)\left(t_{\text{ст}}-t\right)=\lambda\left(t\right)\dfrac{\partial t}{\partial x}$ може бути представлено у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda\left(t\right)\frac{\partial t}{\partial x}\right]=c\left(t\right)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau}. \qquad (1)$$

У роботі [6] описано особливості реалізації математичної моделі регенератора. Розподіл температур по висоті насадки та значення величин теплового потоку визначалися за допомогою рівнянь Ньютона–Ріхмана та Фур'є. Розрахунковим елементом був обраний вертикальний канал, який створено по осях симетрії перерізу насадки і розбито по висоті на n розрахункових елементів. Було складено та розв'язано систему енергобалансу для всіх розрахункових елементів $i = 1,2,3,...n$ на кожному часовому кроці j з інтервалом $\Delta\tau$ відповідно у періоди нагрівання і охолодження

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{i,j}^{k} = \Delta I_i. \qquad (2)$$

Ліва частина рівняння (2) є сумою теплових потоків $Q_{i,j}^{k}$ через усі поверхні обраного розрахункового елемента, а права частина характеризує зміну тепловмісту матеріалу насадки. Температури насадки t, газу $t^{\text{г}}$ та повітря $t^{\text{п}}$ знаходяться як

$$t_{i,j+1}=t_{i,j}+A_1\left[t_{i,j}^{\text{г}}-t_{i,j}\right]+A_2\left[t_{i,j}^{\text{г}}-t_{i,j}\right]+$$

$$+A_3\left[t_{i,j}-t_{i+1,j}\right]; \qquad (3)$$

$$t_{i+1,,j}^{\text{г}}=t_{i,j}^{\text{г}}-B_i\left[t_{i,j}-t_{i,j\text{-}1}\right]; \qquad (4)$$

$$t_{i\text{-}1,,j}^{\text{п}}=t_{i,j}^{\text{п}}+D_i\left[t_{i,j\text{-}1}^{\text{п}}-t_{i,j}\right]. \qquad (5)$$

Тут A, B, D – допоміжні коефіцієнти, що враховують геометричні характеристики, теп-

лофізичні властивості матеріалу і теплоносіїв, умови теплообміну.

Перевірка збіжності числового розв'язку виконувалась шляхом порівняння різниці кількості акумульованої насадкою регенератора теплоти в поточному та попередньому розрахункових циклах.

Основним блоком обчислювального комплексу є блок для визначення коефіцієнтів складного теплообміну в теплоакумулюючих елементах насадки. В розрахунках регенераторів коксових печей при використанні в насадці фасонної цегли коефіцієнт конвективного теплообміну $\alpha_к$ знаходили за формулою

$$\alpha_к = \left(0{,}1185 + 0{,}2471 W / d^{0{,}6}\right) T_г^{0{,}25}. \qquad (6)$$

Значення коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням $\alpha_{пр}$ у каналах можна отримати, застосувавши методику, розроблену Елгеті [8], як

$$\alpha_{пр} = 5{,}67 \cdot \left[\overline{\varepsilon}_г \cdot \left(\frac{T_г}{100} \right)^4 - \overline{a}_г \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right] \Big/ \left(T_г - T_{ст} \right). \qquad (7)$$

У формулі (7) $\overline{\varepsilon}_г$ та $\overline{a}_г$ характеризують поглинальну здатність газу з урахуванням додаткових відбиттів і поглинань стінкою. Для їх визначення слід знайти еквівалентну товщину випромінюючого шару $L'_{еф} = L / \varepsilon_{ст}^{0{,}85}$. За відомими величинами температур газу $T_г$, стінки $T_{ст}$, а також добутку парціального тиску та еквівалентної товщини випромінюючого шару $pL'_{еф}$ розраховують поглинальну здатність ε'. Остаточне значення визначають за формулою $\overline{\varepsilon} = \varepsilon_{ст} \varepsilon'$. Аналогічно можна знайти величину $\overline{a}_г$. Наведений коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{нав}$, у якому враховувався вплив зміни температури газу та поверхні насадки безпосередньо після зміни режиму роботи регенератора, визначається за формулами

$$\alpha_{нав} = \left(\alpha_к + \alpha_{пр}\right) / \left[1 + \mathrm{Bi}\,(1/6 - 1/180\,R)\right]$$

для $R < 10$; (8)

$$\alpha_{нав} = \left(\alpha_к + \alpha_{пр}\right) / \left[1 + \mathrm{Bi} \left(\frac{0{,}357}{\sqrt{0{,}3 - R}} \right) \right]$$

для $R > 10$, (9)

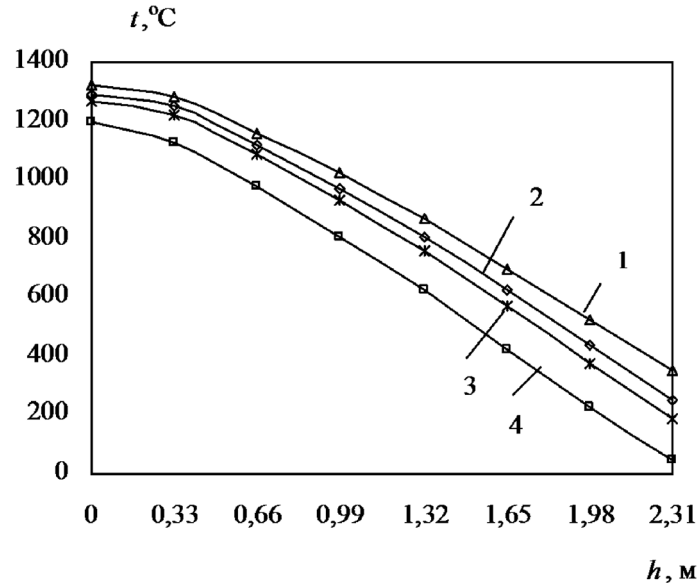

Рис. 3. Температурні поля по висоті регенеративного теплообмінника коксової печі в циклі нагрівання-охолодження.

де коефіцієнт $R = \dfrac{b^2}{2a}\left(\dfrac{1}{\tau_г} + \dfrac{1}{\tau_п} \right)$.

Результати моделювання роботи регенеративного теплообмінника коксової печі, які характеризують його теплотехнічну ефективність, представлено на рис. 3 та в таблиці.

Для розрахунків було прийнято такі вихідні дані: кількість димових газів на один регенератор $V_г = 0{,}348$ м^3/с; кількість повітря, що нагрівається, $V_п = 0{,}306$ м^3/с; тривалість періодів нагрівання і охолодження $\tau = 1200$ с; температура димових газів на вході в регенератор $t_г = 1320$ °С; температура холодного повітря на вході в насадку регенератора $t_п = 50$ °С. Насадку складено з фасонних цеглин з поверхнею теплообміну 0,488 м^2. Висота насадки регенератора – 2,31 м. Швидкість димових газів становить $W_г = 0{,}122$ м/с, повітря – $W_п = 0{,}107$ м/с при нормальних умовах. Цифрами на рис. 3 позначено: 1, 2 – розподіл температури димових газів та насадки наприкінці періоду нагрівання; 3, 4 – температура повітря, що гріється, та насадки в період охолодження. Отримані результати показали, що до 20 % верхньої частини вогнетривкої насадки працює при умові нелінійного розподілу температури. Це свідчить про те, що використання середніх значень темпе-

Таблиця. Теплотехнічні показники роботи регенератора коксової печі

Температура димових газів на вході, $t'_г$, °С	Температура газів на виході наприкінці циклу, $t''_г$, °С	Середня температура димових газів за цикл $t_г^{сер}$, °С	Температура повітря на вході $t'_п$, °С	Температура повітря на виході наприкінці циклу $t''_п$, °С	Середня температура повітря за цикл, $t_п^{сер}$, °С	Кількість теплоти, що передається за цикл, $Q_п$, МДж
1320	375	326	50	1196	1212	6143

ратур насадки і теплоносіїв за умови їх лінійного розподілу по висоті, як пропонується в роботах [4, 5], не відповідає реальним умовам їх експлуатації, дає велику похибку щодо визначення рівня максимальних температур.

Висновки

Розроблено математичну модель процесів нестаціонарного теплообміну, що мають місце в каналах насадок регенераторів коксових печей з урахуванням їх конструктивних і експлуатаційних характеристик.

Створений на основі цією моделі обчислювальний комплекс дозволяє визначати розподіл температур теплоносіїв і вогнетривких матеріалів по висоті теплообмінника та характер зміни температури в часі при використанні будь-яких сучасних вогнетривких матеріалів і типів насадок. Обчислювальний комплекс може бути використаний при проектуванні і оптимізації параметричних характеристик регенераторів коксових печей, які використовуються в коксохімічній промисловості для виробництва металургійного коксу та коксового пеку.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Вирозуб И.В., Ивницкая Н.С., Лейбович Р.Е. и др.* Расчеты коксовых печей и процессов коксования с применением ЭВМ. – К.: Вища школа, 1989. – 304 с.

2. *Кауфман А.А., Харлампович Г.Д.* Технология коксохимического производства. – Екатеринбург: ВУХИН – НКА, 2004. – 287 с.

3. *Бекман Г., Гилли П.* Тепловое аккумулирование энергии: Пер. с англ. / Под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1987. – 272 с.

4. *Васильев Ю.С.* К вопросу тепловой работы насадки регенераторов коксовых печей // Кокс и химия. – 1967. – № 1. – С. 18 – 25.

5. *Гребенюк А.Ф., Коваленко Д.А.* О методах расчета регенераторов коксовых печей // Углехимический журнал. – 2007. – № 1–2. – С. 56 – 60.

6. *Кошельник А.В.* Математическая модель многокамерных регенераторов плавильных агрегатов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 1/2 (25). – С. 51 – 54.

7. *Товажнянский Л.Л., Кошельник В.М., Соловей В.В., Кошельнік О.В.* Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве: Монография. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – 628 с.

8. *Хаузен Х.* Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе: Пер. с нем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 384 с.

Отримано 30.03.2009 р.