

УДК 621.745.33:536.24

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-14>

Каюков Юрій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4311-4801

Іванов Віктор Ілліч, старший науковий співробітник, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-8816-3506

Рижков Вадим Генієвич, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-9464-299X

Назаренко Ірина Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0003-4200-4424

ДО ОБЧИСЛЕННЯ СПРЯЖЕНОГО ТЕПЛООБМІНУ У ПОЛУМЕНЕВИХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

Розроблено математичну модель нагрівання сталевих заготовок у полуменевих печах камерного типу. Задачу теплообміну вирішено за допомогою зонального методу з урахуванням наявності факела, руху нагрівального середовища, втрат теплоти через огороження печі, а також акумульовано кладкою. Досліджено вплив довжини факела, а також імпульсного режиму опалювання печі на якісні показники нагрівання металу. Встановлено, що достатньо рівномірного нагрівання металу досягнуто за довжини факела, яка є зіставленою із шириною робочого об'єму камери, та під час реалізації імпульсного режиму опалювання печі у період витримки.

Ключові слова: полуменева піч камерного типу, сталеві заготовки, нагрівання металу під термічну обробку, математична модель, імпульсний режим опалювання печі

Вступ. Під час проектування нових і реконструкції діючих полуменевих печей головним завданням є забезпечення достатньо високої рівномірності нагрівання металу на момент його видавання із робочого об'єму. Найскладніше вирішувати зазначену задачу для полуменевих печей, камерного типу [1], де спалювання палива сприяє формуванню нерівномірного розподілу температури в робочому об'ємі камери та, як наслідок, нерівномірного підведення теплоти до поверхні металу, якого нагрівають.

На деяких металургійних підприємствах України сталеві заготовки перед куванням піддають нагріванню в двокамерних полуменевих печах. Кожну камеру обладнано незалежними системами опалювання та відведення продуктів горіння. Система опалювання зазначених печей складається з восьми пальників, які встановлено на одній бічній стінці камери у два ряди за її висотою: чотири пальники типу ГНП-5 та чотири пальники типу ГНП-3 утворюють відповідно верхню та нижню зони опалювання. Продукти горіння видаляють через канали, які рівномірно розташовано уздовж бічних стін камери.

Наявність верхньої та нижньої зон опалювання печі забезпечує двостороннє підведення теплоти до заготовок, що розташовано на подових підставках, проте за факельним спалюванням палива не сприяє досягненню рівномірного нагрівання металу, що розташовано у напрямі руху нагрівального середовища.

Постановка завдання. Метою досліджень є аналіз впливу параметрів факела на головні характеристики теплообміну в полуменевій печі камерного типу, а також оцінювання впливу різних систем опалювання печі на рівномірність нагрівання металу та засвоєння ним теплоти.

Головна частина досліджень. Для оцінювання рівномірності нагрівання металу за різних режимів опалювання печей камерного типу розроблено математичну модель, що заснована на вирішенні пов'язаної задачі зовнішнього та внутрішнього теплообміну за дискретним часом.

Під час вирішення задачі зовнішнього теплообміну з використанням зонального методу [2,3] приймали наступні припущення:

- сталеві заготовки прямокутного перерізу, що укладають в один шар без проміжків, подають у вигляді пластини;
- наявність верхньої та нижньої зон опалювання забезпечує симетричне за товщиною сталевих заготовок нагрівання металу у печі;
- тіла, що беруть участь у променистому теплообміні (метал, кладка та продукти горіння) є сірими, а випромінювання й віддзеркалення променистої енергії поверхнями металу та кладки – дифузним.

Зональну модель зовнішнього теплообміну в робочому об'ємі полуменевої печі камерного типу подавали замкнутою системою, що створена твердими непрозорими тілами, розділеними поглинально-випромінювальним середовищем. Для урахування змінювання складу продуктів горіння й оптичних властивостей середовища у напрямі розвитку факела систему поділяли відповідно до рекомендацій роботи [ИВЧМ,4] на п'ять об'ємних зон факела і продуктів горіння, п'ять плоских поверхневих зон металу та сімнадцять плоских поверхневих зон кладки.

Довжину факела, концентрацію палива, ступінь його згорання, підсисання повітря до зони горіння, а також концентрацію випромінювальних компонентів продуктів горіння за довжиною факела, обчислювали з використанням рекомендацій роботи [5] та з урахуванням співвідношень [6,7], що мають вигляд:

$$\ell_n \approx 0,7 \cdot \ell_\phi, \quad (1)$$

де ℓ_n – довжина підсисання (відстань від пальника до перерізу на осі факела, де всю кількість повітря, яка є теоретично необхідною для згорання палива, подають до зони горіння та ступінь його вигорання складає 0,85); ℓ_ϕ – довжина факела (відстань від виходу з пальника до перерізу на його осі, де значення середнього хімічного недопалу палива становить 2,0 %).

В межах кожної поверхневої зони абсолютну температуру нагрівального середовища, концентрацію його поглинально-випромінювальних компонентів (CO_2 , H_2O), а також значення ступеня чорноти у межах кожної об'ємної зони приймали постійними. Об'ємне випромінювання нагрівального середовища замінювали еквівалентним дифузним випромінюванням уявної поверхні, яка має ступінь чорноти, що дорівнює ступеню чорноти об'ємної зони. Окрім того, вводили умовні абсолютно чорні поверхні, які відділяють i -ту об'ємну зону від суміжних j -тих об'ємних зон, що дозволяє подати зональну модель теплообміну у вигляді окремих підсистем.

Взаємодія суміжних підсистем здійснюється через відповідні умовні поверхні, які мають значення температури, за яких щільність потоків результуючого випромінювання на межах підсистеми зберігає своє дійсне значення. Визначення значень зазначеної температури виконують шляхом обчислення радіаційного теплообміну в окремих підсистемах та узгодження їх значень на межах суміжних підсистем щодо залежності

$$q_{j,i} = -q_{i,j} = \sigma_0 \cdot [\theta_{j,i}^4 - \theta_{i,j}^4], \quad (2)$$

де q_{ij} – щільність потоку результуючого випромінювання, яка проходить через умовну поверхню, що відділяє j -ту об'ємну зону від суміжної i -ої об'ємної зони; θ_{ij} , θ_{ji} – температури умовних поверхонь, що відділяють i -ту об'ємну зону від суміжної j -ої об'ємної зони та j -ту об'ємну зону від суміжної i -ої об'ємної зони відповідно; σ_0 – постійна Стефана-Больцмана.

Обчислення радіаційного теплообміну в межах окремої підсистеми виконували з використанням резольвентного зонального методу [8]. Записували систему рівнянь, що містить:

– зональні рівняння для поверхневих зон

$$Q_i = \sum_{k=1}^n \alpha_{k,i} \cdot \theta_k^4, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (2)$$

– зональне рівняння для об'ємної зони

$$\sum_{k=1}^n \alpha_{k,i} \cdot \theta_k^4 + \alpha_i \cdot \theta_i + g_i^0 + Q_i^v = 0, \quad i = n; \quad (3)$$

де Q_i – результуючий тепловий потік; $\alpha_{k,i}$ – коефіцієнт радіаційного теплообміну; θ_k – температура k -ої зони; α_i – коефіцієнт конвективного теплообміну для об'ємної зони i -ої підсистеми; g_i^0 – сума складових, що не залежить від температури об'ємної зони; Q_i^v – виділення теплоти в об'ємній зоні.

За відомих значень температури поверхневих зон, а також виділення теплоти в об'ємних зонах печі розв'язання системи зональних рівнянь (3), (4) разом з рівнянням (2) дає змогу визначати на кожному часовому кроці значення температури об'ємних зон і результуючих теплових потоків для поверхневих зон.

Поверхневі зони моделі є межами, що відділяють об'ємні газові зони від об'ємних зон металу та кладки. Припущення про постійність величин, які характеризують теплообмін у межах кожної обчислювальної поверхневої зони, дає змогу описувати нагрівання об'ємних зон металу та кладки, поданих у вигляді нескінченних одно- і двошарових пластин, одновимірним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності у декартових координатах:

$$c'(\theta) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(\theta) \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right], \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k, \quad (5)$$

де τ – поточний час; y – поточна координата на осі, що є перпендикулярною до відповідної поверхневої зони та спрямованою у бік підвищення температури; θ , τ_n , c' , λ – температура; час нагрівання; об'ємна питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару об'ємної зони металу або кладки.

Диференціальне рівняння (5) доповнюють відповідними крайовими умовами.

Вирішення задачі внутрішнього теплообміну виконували методом кінцевих різниць за неявною чотирьохточковою схемою. Одночасно на кожному часовому кроці здійснювали визначення дискретних полів температури об'ємних зон металу та кладки, а також температури відповідних їм поверхневих зон.

Оцінювання результатів чисельного дослідження теплообміну в данній печі дало змогу встановити, що досягнення високої рівномірності нагрівання металу можна забезпечити під час спалювання палива з отриманням подовжених факелів, які не перевищують розміри робочої камери печі.

Для кількісної характеристики впливу факела на умови теплообміну в робочому об'ємі печі використовували критерій нерівномірності розподілу теплових потоків $K_q = q_{\max}/q_{\text{сер}}$, де q_{\max} , $q_{\text{сер}}$ – відповідно максимальна та середня на поверхні сталевих заготовок, що нагрівають, щільність результуючого теплового потоку для факела певної довжини. Якість нагрівання металу оцінювали критеріями $\sigma_1 \Delta \theta$ і $\sigma_2 \Delta \theta$, де $\sigma_1 \Delta \theta$, $\sigma_2 \Delta \theta$ – середньоквадратичні відхилення від середнього значення різниць температури між показанням пічного термодавача та температурами поверхні металу θ_n у зонах, а також зональних перепадів температури між поверхнею θ_n і тепловим центром θ_y сталевих загото-

вок, що нагрівають, відповідно. Результати обчислень щодо впливу довжини факела на якісні показники роботи печі подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Якісні показники роботи двохкамерної нагрівальної печі під час спалювання палива у факелі різної довжини

Параметри	Відносна довжина шляху підсисання факела L_n							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
K_q	1,26	1,25	1,21	1,17	1,11	1,07	1,11	1,13
$\sigma_1\Delta T$	45,00	40,10	32,50	22,30	18,50	22,60	29,20	34,40
$\sigma_2\Delta T$	12,60	11,40	9,50	7,00	6,40	10,20	14,40	18,20

Встановлено, що залежність змінювання критеріїв K_q , $\sigma_1\Delta\theta$ і $\sigma_2\Delta\theta$, які характеризують нерівномірність нагрівання металу, від довжини факела, має екстремальний характер. Так, для дослідженого інтервалу значень параметра L_n найбільш нерівномірне нагрівання металу зафіксовано для факела мінімальної довжини, під час збільшення довжини факела значення зазначених критеріїв монотонно зменшуються та сягають мінімального значення за $L_n = 0,5 \dots 0,6$. Для факела з відносною довжиною підсисання більше ніж 0,6 спостерігали зростання нерівномірного розподілу результуючих теплових потоків, що, в свою чергу, призводить до зниження якісних показників нагрівання металу.

Одним з напрямів підвищення якості нагрівання металу в печах камерного типу є імпульсне подавання палива в період витримки [9]. Імпульсний режим опалювання передбачає постійне подавання палива для періоду підвищення температури у печі та його імпульсне подавання для періоду витримки, тобто у зазначений період його подавання до печі виконують за зниженням температури до мінімально припустимого рівня та припиняють у разі її підвищення до максимально припустимого значення. Тривалість подавання палива під час одного імпульсу за імпульсним режимом опалювання визначається автоматично: на початок періоду витримки вона має максимальне значення, у кінці періоду – мінімальний рівень.

Для вибраної довжини факела природного газу $L_n = \ell_n/B = 5$ (де ℓ_n , B – довжина шляху підсисання факела та геометричний розмір робочої камери печі у напрямі розвитку факела) виконано порівняльне оцінювання якісних показників нагрівання металу за типовим (безперервне подавання палива в період витримки) та імпульсним (циклічне подавання палива для періоду витримки) режимами. Для зіставлення результатів нагрівання в обох випадках приймали тривалість періоду витримки три години. Якість нагрівання металу для зон печі оцінювали за перепадом температури на поверхні металу $\Delta\theta_n$, а також перепадів температури щодо перерізу сталевієї заготовки $\Delta\theta_y$ (між температурами поверхні θ_n та теплового центру (θ_y)). Результати обчислень температури у зонах печі на момент завершення нагрівання сталевих заготовок за типовим (чисельник) та імпульсним (знаменник) режимами нагрівання наведено у табл. 2. Температури нагрівального середовища $\theta_{нз}$, поверхні θ_n та теплового центру сталевих заготовок θ_y , що нагрівають, відповідають номерам їх об'ємних зон.

Як свідчать результати досліджень, за імпульсним режимом опалювання печі, на відміну від типового, забезпечується циклічне змінювання довжини факела від максимального до допустимо мінімального значення, що дає змогу використовувати переваги довгого факела у період витримки печі. Наявність пульсуючого факела сприяє зниженню до мінімуму нерівномірного розподілу температури на поверхні сталевих заготовок, що нагрівають, а отже, поліпшенню рівномірного розподілу теплових потоків на поверхні заготовок.

Таблиця 2 – Розподіл температури по завершенні періоду витримки металу за зонами печі (відносна довжина шляху підсисання факела $L_n = 0,5$)

Параметр	Значення параметра в об'ємній зоні				
	1	2	3	4	5
$\theta_{нз}, ^\circ\text{C}$	1155/1180	1230/1200	1180/1200	1165/1190	1175/1200
$\theta_n, ^\circ\text{C}$	1140/1150	1145/1150	1140/1155	1135/1155	1140/1150
$\theta_{уз}, ^\circ\text{C}$	1120/1140	1125/1140	1120/1140	1115/1145	1120/1145
$\Delta\theta_n, ^\circ\text{C}$	25,7/14,80	27,6/18,6	28,5/17,9	24,9/15,2	20,4/14,3
$\Delta\theta_{уз}, ^\circ\text{C}$	10,32/9,69	5,44/4,54	4,46/4,28	6,91/6,82	10,84/9,06

Застосування імпульсного режиму опалювання печей дає змогу підвищити температуру в останній за ходом факела об'ємній нагрівальній зоні порівняно з типовим режимом опалювання, що, незважаючи на деяке збільшення втрат теплоти з продуктами горіння, які відходять, супроводжується зростанням теплового вмісту металу в цій зоні.

Висновки. Виконано розробку імітаційної моделі нагрівання сталевих заготовок у полумєневих печах камерного типу. З використанням такої моделі здійснено чисельні дослідження теплообміну в робочому об'ємі зазначених печей. Встановлено, що для досягнення високих показників якості нагрівання металу найбільш прийнятною є система опалювання, яка забезпечує спалювання палива у гранично довгих факелах. Порівняльне оцінювання нагрівання металу, що отримують з використанням типового та імпульсного режимів опалювання печей, свідчить про переваги імпульсного режиму.

Бібліографічний перелік

1. Губинский В. И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей *Металлургическая теплотехника* Сборник научных трудов НМетАУ. В 2-х томах. Днепропетровск : Пороги, 2005. Т. 1. С. 149-155.
2. Арутюнов В. И., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. Москва : Metallurgy, 1990. 239 с.
3. Крупенников С. А. Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации *Известия Вузов. Черная металлургия*. 2006. № 3. С. 59-62.
4. Ревун М. П., Каюков Ю. Н., Иванов В. И., Чепрасов А. И. К расчету сопряженного теплообмена печей, работающих в камерном режиме *Известия Вузов. Черная металлургия*. 2018. № 2. С. 32-34.
5. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев : Техника, 1969. 539 с.
6. Лисиенко В. Г. Интенсификация теплообмена в пламенных печах. Москва : Metallurgy, 1979. 224 с.
7. Лисиенко В. Г., Лобанов В. И., Китаев Б. И. Теплофизика металлургических процессов. Москва : Metallurgy, 1982. 239 с.
8. Суринов Ю. А. Обобщенный зональный метод исследования и расчета лучистого теплообмена в поглощающей и рассеивающей среде *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1975. Вып. 4. С. 112 -137.
9. Ревун М. П., Франк Ф. Ф., Высочин Б. Г. Система импульсного отопления камерных нагревательных печей *Сталь*. 1983. № 9. С. 84-87.
10. Ревун М. П., Чепрасов А. И., Каюков Ю. Н. Импульсное отопление нагревательных колодцев / *Черная металлургия*. 1987. Вып. 8 (1036). С. 58-59.

References

1. Gubinskiy V. J. Aktual'nye zadachi rekonstruktsii nagrevatel'nykh pechey *Metallugiches-kaya teplotekhnika*. Sbornik nauchnykh trudov NMetAU. V 2-kh tomakh. Dnepropetrovsk : Porogi, 2005. t. 1. pp. 149-155.

2. Arutyunov V. I., Bukhmirov V. V., Krupennikov S. A. Matematicheskoe modelirovanie teplovy raboty promyshlennykh pechey. Moskva : Metallurgiya, 1990. 239 p.
3. Krupennikov S. A. Zonal'nyy metod rascheta raziatsionnogo i slozhnogo teploobmena: osnovnye polozeniya i sposoby cheslennoy realizatsii *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2006. no. 3. pp. 59-62.
4. Revun M. P., Kayukov Yu. N., Ivanov V. I., Cheprasov A. I. K raschetu sopryazhennogo teploobmena pechey, robotayushchikh v kamernom regime *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya..* 2018. no. 2. pp. 32-34.
5. Raschety nagrevatel'nykh pechey / Pod red. N. Yu. Taytsa. Kiev : Tekhnika, 1969. 539 p.
6. Lisienko V. G. Intensifikatsiya teploobmena v plamennykh pechakh. Moskva : Metallurgiya, 1979. 224 p.
7. Lisienko V. G., Lobanov V. I., Kitaev B. I. Teplofizika metallurgicheskikh protsessov. Moskva : Metallurgiya, 1982. 239 p.
8. Surinov Yu. A. Obobshchennyy zonal'nyy metod issledovaniya i rascheta luchistogo teploobmena v pogloshchayushchey i rasseivayushchey srede *Uzvestiya AS USSR. Energetika itransport*. 1975. vol. 4. pp. 112-137.
9. Revun M. P., Frank F. F., Bysochin B. G. Sistema impul'snogo otopeniya kamernykh nagrevatel'nykh pechey. *Stal'*. 1983. no. 9. pp 84-87.
10. Revun M. P., Kayukov Yu. N., Cheprasov A. I. Impul'snoe otopenie nagrevatel'nykh kolodtsev. *Chernaya Metallurgiya*. 1987. vol. 8 (1036). pp 58-59.

Kayukov Yurii, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe national university

Ivanov Viktor, senior staff scientist, Zaporozhe national university

Ryzhkov Vadym, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe national university

Nazarenko Irina, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe National Technical university «Zaporozhe polytechnics»

TO CALCULATION OF CONJUGATED HEAT EXCHANGE IN FLAMING FURNACES OF CHAMBER TYPE

During planning of new and reconstruction of operating flaming chamber furnaces it is necessary to provide the conditions for achievement of high evenness heating metals in the moment of output from the work volume furnace. For the evaluation of metal heating evenness at the different modes of work furnaces of noted type a mathematical model, which is based on the decision of the connected task of external and internal heat exchange at discrete time is worked out. The zonal model of external heat exchange in the work volume of the noted furnace is given by the closed system, which is created by opaque solids, divided by an absorptive-radiate medium. The system is divided into five volume areas of torch and combustion gas, five flat superficial areas of metal and seventeen flat superficial areas of furnace lining. Within the limits of every superficial area absolute temperature of heater medium, concentration of its absorptive-radiate components, accepted fixed. The volume radiation of heater medium is replaced by the equivalent diffuse radiation of imaginary surface, which has a degree of blackness which has a degree of blackness which equals the degree of blackness for volume area. Except for that, entered conditional absolutely black surfaces which separate i volume area from contiguous j volume areas. The calculations of radiation heat exchange within the limits of separate subsystem executed with the use of resolving zonal method. One of directions for quality metal heating in the furnaces of chamber type there is impulsive input of fuel in the period of self-control of metal. Application of the noted mode for heating of furnace allows to promote a temperature in the last on motion of torch to the volume heater area comparatively with the typical mode of heating, that accompanied by the increase of thermal content of metal in this area.

Стаття надійшла: 10.07.2020 р.