

¹Д-р техн. наук, професор, Запорізька державна інженерна академія, Україна;
²Асистент, Запорізька державна інженерна академія, Україна, e-mail: alinazgia@gmail.com
³Канд. техн. наук, доцент, Національна металургійна академія України, Україна.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ЗАДЛЯ СТВОРЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПЕРЕШКОД У КАМЕРНИХ ПЕЧАХ

Мета роботи. Дослідження можливості застосування просторового електричного поля для створення теплового бар'єру з метою покращення турбулентного руху газів у робочому просторі камерної печі та збільшення їх щільності у зоні розташування садки з металу, що нагрівається.

Методи досліджень. За допомогою комплексу програм, що дозволяють прогнозувати з урахуванням турбулентності потоків рух пічних газів, проведені розрахункові дослідження полів їх швидкостей у камері.

Отримані результати. Виконано розрахункове дослідження турбулентного руху продуктів згоряння в камерній печі. Отримано картину полів швидкостей газів в робочому об'ємі та проведено аналіз щодо ефективності їх використання у зоні розташування металевих виробів, що нагріваються. Встановлено, що основна частина теплоти нагріває верхню частину печі і лише потім опускається вниз камери, де гази незначної щільності контактують з металом, при цьому більша їх кількість просто видаляється через димові вікна, не віддавши теплоти. Останнє призводить до перевитрати первинного енергоресурсу та зменшення енергетичної ефективності печі у цілому. Запропоновано створити тепловий бар'єр шляхом направлення деякої кількості останніх перпендикулярно тій їх частині, що видаляються з печі. Керуючим впливом у даного випадку слугує зазначене співвідношення обсягів газів. Результати моделювання циркуляційного руху пічних газів за наявності теплового бар'єра показали, що їх масова витрата поблизу заготівки зростає, а це свідчить про можливість досягнення потрібної температури металу за меншої витрати природного газу.

Наукова новизна. Вперше доказано, що застосовувати тепловий бар'єр доцільно шляхом створення просторового електричного поля у камері печі між пальником і садкою металу.

Практична значимість. Впровадження запропонованого способу створення теплового бар'єру за допомогою просторового електричного поля може сприяти підвищенню енергоефективності камерних печей.

Ключові слова: просторове електричне поле, математичне моделювання, камерна піч, тепловий бар'єр, циркуляція пічних газів.

ВСТУП

При вирішенні проблеми енергоефективності різних видів печей, які працюють на промислових підприємствах, практично не використовується математичне моделювання, тому деякі наукові публікації присвячені саме цій темі [1, 2]. Також не достатньо враховується вплив характеру циркуляції пічних газів на теплообмінні процеси і температурне поле в їх робочих об'ємах. Але саме глибоке розуміння цього впливу є першочерговим завданням для впровадження енергозберігаючих заходів, направлених на підвищення економічної ефективності енергоємних галузей промисловості [3–5].

У цілому, зменшення сумарних обсягів споживання енергоресурсів може бути досягнуто за рахунок їх питомої кількості або часу використання. Відомо, що температурно-часові режими обробки металу жорстко регламентовано технологією за усіма фазами процесу термообробки, оскільки їх задають як для забезпечення заданої температури поверхні металу і рівномірного нагрівання, так і досягнення необхідних теплофізичних перетворень в останньому. Тому впровадження ресурсозберігаючих заходів щодо камерних печей направлено на зменшення витрати природного газу задля досягнення необхідної температури у зоні розташування садки з металом [6].

Оскільки енергоефективність камерної печі залежить від щільності теплового потоку у зазначеній зоні – першочерговим завданням є отримання загальної картини полів швидкостей пічних газів в об'ємі камери, що дозволило б розробити економічно доцільний і технічно не складний в реалізації спосіб управління ними.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз наявних на сьогоднішній день публікацій, присвячених проблемам підвищення енергоефективності камерних печей, показав, що їх аеродинаміка не раціональна. У роботі [7] представлено картину розподілу температурних зон у камері печі, де найбільша температура спостерігається в її верхній частині й зосереджена у об'ємі, який складає 41% відносно загального, в той час як садка металу знаходиться у зоні зі значно меншою температурою. Але для концентрування теплоти у зоні розташування заготівки цих досліджень не достатньо, оскільки потрібно мати реальну картину циркуляційного руху пічних газів у камері. Аналіз, проведений у роботі [8], показав можливість перерозподілу теплоти у камері печі, але для вибору керуючого впливу на теплові потоки потрібно більш детально зрозуміти фізичний механізм такого перерозподілу.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження можливості застосування просторового електричного поля для створення теплового бар'єру задля покращення турбулентного руху газів у робочому просторі камерної печі задля збільшення їх щільності у зоні розташування садки з металу, що нагрівається.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для вирішення поставленої задачі дослідження були прийняті наступні основні допущення: 1) кладка камери печі адиабатна; 2) паливо повністю згоряє в пальнику і продукти згорання надходять у камеру з постійною температурою; 3) визначення характеру турбулентного руху в'язкого газу за допомогою RNG $k - \epsilon$ моделі [9, 10], що пропонується для використання, адекватне.

Граничні умови. На рис. 1 наведено розрахункову схему камери типової розглядуваної печі у двовірній постановці.

На границях Ω_1 і Ω_2 (вхід моделі) задаються значення компонентів вектору швидкості U_{in} , V_{in} , значення кінетичної енергії турбулентності k_{in} та швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ϵ_{in} . На границі Ω_3 (вихід моделі) задаються значення градієнтів параметрів $\phi = \{U, V, P, k, \epsilon\}$, де $\partial\phi/\partial x = 0$. На границі Ω_4 (вісь симетрії камери) задаються значення градієнтів $\partial\phi/\partial y = 0$. На всіх інших границях (тверді поверхні) задаються наступні значення швидкостей і тиску $U = V = \partial P/\partial n = 0$, де n – нормаль до поверхні. Для моделі турбулентності використовується стандартна функція μ_t .

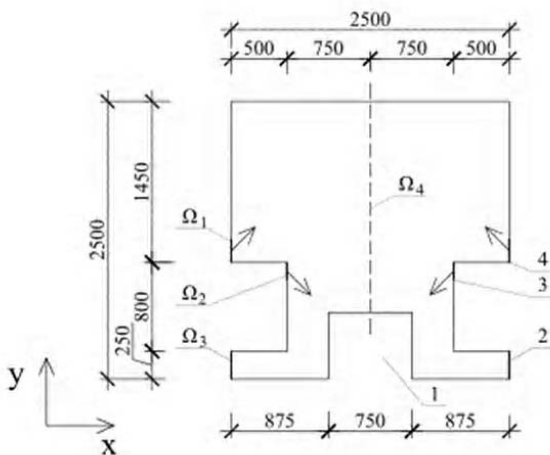


Рисунок 1 – Розрахункова схема камери печі: 1 – садка металу, 2 – димовий канал, 3 – теплова завіса, 4 – пальник

Для визначення поля швидкостей використовується рівняння Нав'є-Стокса у двовірній постановці:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0;$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho U U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V U) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho U V) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V V) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y}, \end{aligned}$$

де y , x – координати, U , V – складові вектора швидкості, P – тиск, ρ – щільність, μ_t – турбулентна динамічна в'язкість.

Для знаходження турбулентної в'язкості використовується RNG $k - \epsilon$ модель, згідно з якою вона визначається за формулою:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon},$$

де C_{μ} – константа моделі турбулентності, $C_{\mu} = 0,09$.

Значення k і ϵ визначаються з рівнянь:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho U k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - \rho \epsilon, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \epsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \end{aligned}$$

де μ – молекулярна динамічна в'язкість, G – генерація турбулентної кінетичної енергії, σ_k – турбулентне число Прандтля для дифузії k , σ_{ϵ} – турбулентне число Прандтля для дифузії ϵ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ – константи моделі. Константи мають такі значення: $\sigma_k = \sigma_{\epsilon} = 1,3$; $C_{1\epsilon} = 1,44$; $C_{2\epsilon} = 1,92$.

Для моделювання полів швидкостей пічних газів у камері печі було використано комплекс програм для чисельного моделювання, що дозволяють розрахувати рух газів з урахуванням турбулентності [11]. У якості прикладу на рис. 2 представлені результати зазначених розрахунків при швидкості газової струї на виході з сопла пальника $w_p = 100$ м/с. Показана половина розрізу робочого простору печі через те, що розв'язувалась симетрична задача.

На рис. 3 приведені отримані залежності масових витрат пічних газів поблизу садки з металом при швидкостях газової струї на виході з сопла пальника 50 і 100 м/с від відсотка використання їх на теплову завісу відносно витрат поблизу пальника.

Використаний комплекс програм для математичного моделювання дозволив кількісно дослідити циркуляцію газів у печі, що розглядається. Аналіз одержаних ре-

зультатів, представлених на рис. 2, 3 показує, що за умови створення додаткового штучного теплового бар'єру масова витрата пічних газів у місці розташування садки з металом збільшується з 2,8 кг/с до 14,4 кг/с.

Як видно з рис. 2б створюються додаткові циркуляції пічних газів, які перешкоджають тепловим потокам відразу направлятися до димових вікон, чим створюють більшу їх щільність біля садки. Це забезпечує ефективне використання теплоти у місці розташування металу, економію витрати палива і більш високу рівномірність нагрівання. Для уникнення струминного нагріву, який може порушити технологію термічної обробки металу та вплинути на його якість, на рис. 3 прийнято максимальний відсоток витрати газу на теплову завісу відносно основної витрати –10%. З отриманих залежностей видно, що навіть невеликий відсоток від витрати на теплову завісу відносно основної їх кількості (0,5–2%) уже достатній для знач-

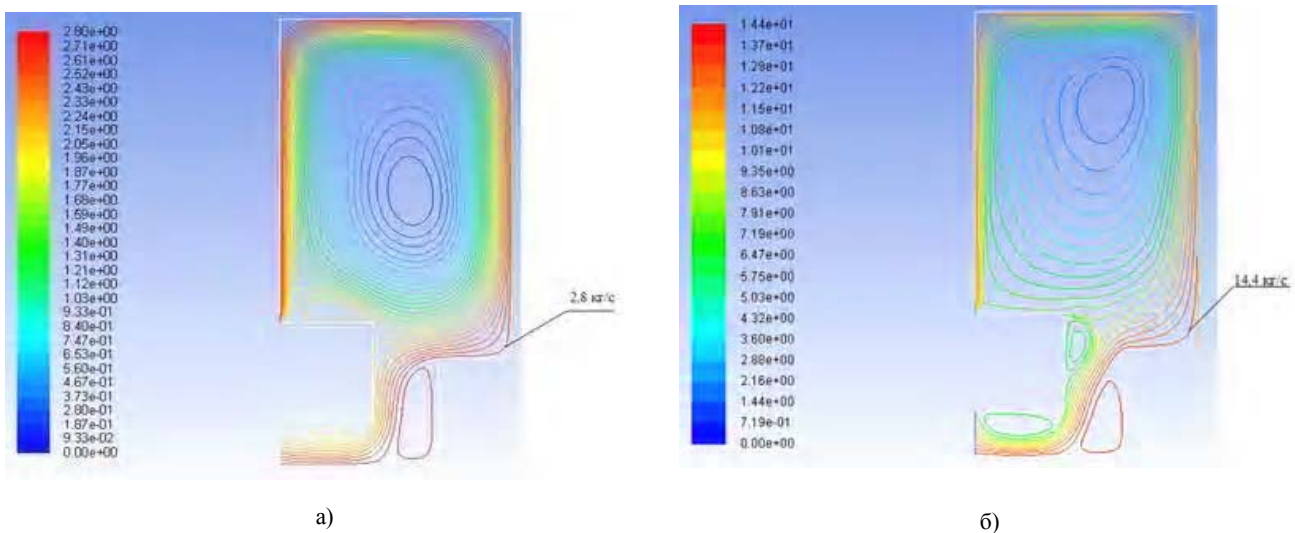


Рисунок 2 – Картина масових витрат пічних газів у камері без теплового бар'єру (а) та зі штучно створеною тепловою завісою з масовою витратою газів в обсязі 10% від основної (б)

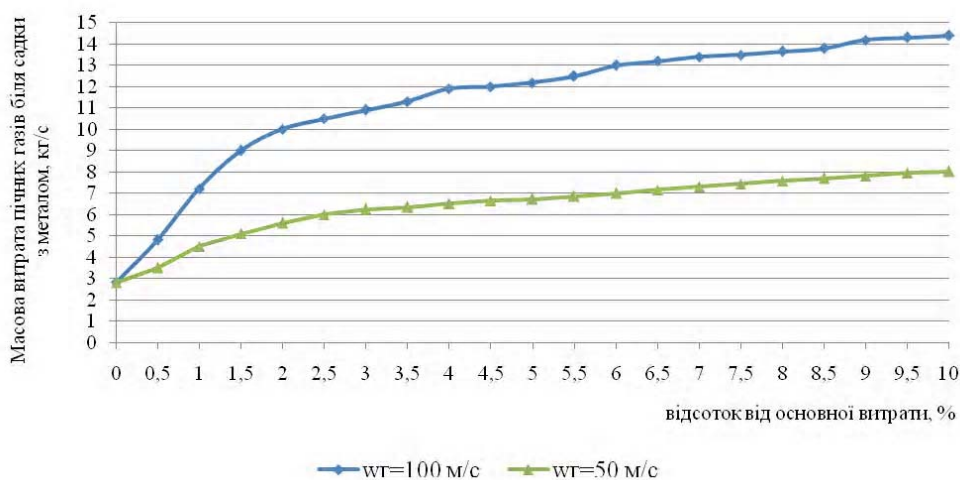


Рисунок 3 – Залежність масової витрати пічних газів у місці розташування металу від відсотка використання їх на теплову завісу

ного зростання щільності пічних газів у зоні розташування металу. Цікавими у даному сенсі є дослідження, в яких доказано, що продукти згоряння іонізовані та мають позитивно й негативно заряджені іони у кількостях саме до $1,5 \div 2\%$ [12], тому логічно стверджувати що за рахунок створення просторового електричного поля у камері печі ці іонізовані частки пічних газів будуть рухатися за напрямом наявного потенціалу, тобто створювати тепловий бар'єр, який пропонується.

ВИСНОВКИ

Згідно з метою, поставленою на початку статті, в ній вирішено задачу щодо моделювання турбулентного руху газів у камері печі. В результаті одержано картину їх циркуляційного руху та масових витрат у робочому об'ємі камери. Вперше доказано, що застосування теплового бар'єру шляхом направлення частини продуктів згоряння перпендикулярно тому їх потоку, який видаляється з печі, дозволяє підвищити її енергоефективність. Запропоновано застосовувати зазначений бар'єр шляхом створення просторового електричного поля в камері печі між пальником і садкою металу. Оскільки синтезувати математичну модель, за допомогою якої можна буде вирішувати питання руху пічних газів одночасно й під дією електричних полів досить складно [13–15], необхідно дослідити практичну можливість застосування останніх задля управління тепловими потоками, а потім зробити кількісну оцінку результату їх використання на реальних печах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ярымбаш С. Т. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов печей графитации переменного тока / С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2011. – №1. – С. 64–69. DOI 10.15588/1607-6761-2011-1-10
2. Ярымбаш Д. С. Анализ энергоэффективности конструкций торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д. С. Ярымбаш, А. М. Олейников // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2013. – №2. – С. 26-34. DOI 10.15588/1607-6761-2013-2-3
3. Свинолобов Н. П. Теоретические основы металлургической теплотехники: учебное пособие для вузов / Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 154 с.
4. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии - сегодня и завтра / В.И. Губинский // *Теория и практика металлургии*. – 2004. – № 6. – С. 56–60.

5. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: монография / А. Б. Бирюков. – Донецк: Ноулидж, 2012. – 247 с.
6. Пат. 116305 Україна МПК 2007 C21D 9/00. Спосіб термічної обробки металу у камерних печах періодичної дії / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, В. Л. Коваленко (Україна); заявник Запорізька державна інженерна академія. – u201612960; заявл. 19.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9–4с.
7. Качан Ю.Г. О повышении энергоэффективности камерных нагревательных печей с выкатным подом путем изменения положения горелочных устройств / Ю. Г. Качан, В. В. Степкин, Ю. Б. Лиуш // *Теория и практика металлургии: общегосударственный научно-технический журнал*. – 2012. – №5–6 (88–89). – С. 87–91.
8. Качан Ю. Г. Щодо можливості керування тепловими потоками просторовим електричним полем. / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // *Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины*. – 2013. – № 13. – С. 80–84.
9. Yakhot V., Orszag S., Thangam S. et. al. Development of turbulence models for shear flows by a double technique. *Phys. Fluids A.*, 1992, vol.4, no.7, pp. 1510–1520. DOI 10.1063/1.858424.
10. Lauder B.E. The numerical computation of turbulent flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974. – Vol. 3. – P. 269–289.
11. Сибирь А. В. Моделирование теплообмена в камерной печи с центральной регенеративной горелкой / А. В. Сибирь, С. И. Решетняк, В. И. Губинский // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка*. – 2007. – № 2/1. – С. 131–139.
12. Степанов Е. М. Ионизация в пламени и электрическое поле / Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. – М.: Металлургия, 1968. – 312 с.
13. Huang M. Ehd-enhanced heat and mass transfer: dissertation ... doctor of philosophy / Meirong Huang. – Norman: The University of Oklahoma, 2005. – 152 p.
14. Mahmoudi S. R. Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and mass transport in gaseous media, bulk dielectric liquids and dielectric thin liquid films: dissertation ... doctor of philosophy / Mahmoudi Seyed Reza. – London: The University of Western Ontario, 2012. – 253 p.
15. Dulikravich G. S., Colaco M. J. Convective heat transfer control using magnetic and electric fields. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2006, no.13 (2), pp. 139–155.

Стаття надійшла до редакції 25.04.17

Качан Ю. Г.¹, Візер А. А.², Сибирь А. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, Запорізька державна інженерна академія, Україна

²Ассистент, Запорізька державна інженерна академія, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, Національна металургічна академія України, Україна

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ

Цель работы. Исследование возможности применения пространственного электрического поля для создания теплового барьера с целью улучшения турбулентного движения газов в рабочем пространстве камерной печи и увеличения их плотности в зоне расположения нагреваемой садки металла.

Методы исследований. С помощью комплекса программ, позволяющих прогнозировать с учетом турбулентности потоков движение печных газов, проведены расчетные исследования полей их скоростей в камере.

Полученные результаты. Выполнено расчетное исследование турбулентного движения продуктов сгорания в камерной печи. Получено картину полей скоростей газов в рабочем объеме и проведен анализ по эффективности их использования в зоне расположения металлических изделий, которые нагреваются. Установлено, что основная часть теплоты нагревает верхнюю часть печи и только потом опускается вниз камеры, где газы незначительной плотности контактируют с металлом, при этом большее их количество просто удаляется через дымовые окна, не отдав теплоты. Последнее приводит к перерасходу первичного энергоресурса и уменьшения энергетической эффективности печи в целом. Предложено создать тепловой барьер путем направления некоторого количества последних перпендикулярно той их части, которые удаляются из печи. Управляющим воздействием в данном случае служит указанное соотношение объемов газов. Результаты моделирования циркуляционного движения печных газов при наличии теплового барьера показали, что их массовый расход вблизи заготовки растет, а это свидетельствует о возможности достижения нужной температуры металла при меньшем расходе природного газа.

Научная новизна. Впервые доказано, что применять тепловой барьер целесообразно путем создания пространственного электрического поля в камере печи между горелкой и садкой металла.

Практическая ценность. Внедрение предложенного способа создания теплового барьера с помощью пространственного электрического поля может способствовать повышению энергоэффективности камерных печей.

Ключевые слова: пространственное электрическое поле, математическое моделирование, камерная печь, тепловой барьер, циркуляция печных газов

Kachan Y. G.¹, Vizer A. A.², Sybir A. V.³

¹Sci.D, Prof., Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine

²Assistant, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine

³Ph.D, Associate professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, Ukraine.

THE SPATIAL APPLICATIONS ELECTRICAL FIELDS TO CREATE HEAT OBSTACLES IN CHAMBER FURNACES

Purpose. A research of a possibility of use of spatial electric field for creation of a thermal barrier to improve of turbulent gases motion in working space of the chamber furnace and increase in their density in an arrangement zone gardens from metal which heats up.

Methodology. By means of a complex of programs which allow to predict the movement of furnace gases taking into account turbulence of streams settlement researches of fields of their speeds in the camera are conducted.

Findings. The settlement research of whirl of products of combustion in the chamber furnace is executed. The picture of fields of speeds of gases in working volume is received and the analysis concerning efficiency of their use in a zone of an arrangement of metal products which heat up is carried out. It is established that the main part of warmth heats the top part of the furnace and only then falls down cameras where gases of insignificant density contact to metal, at the same time their bigger quantity just is removed through smoke windows, without having given warmth. The last leads to an excessive consumption of primary energy resource and reduction of power efficiency of the furnace in general. It is offered to create a thermal barrier by the direction of a quantity of the last perpendicular to that their part that are removed from the furnace. As the operating influence at this case serves noted ratio of volumes of gases. Results of modeling of the circulating movement of oven gases in the presence of a thermal barrier showed that their mass expense nearby of preparation grows, and it testifies to a possibility of achievement of the necessary temperature of metal at smaller expense of natural gas.

Originality. It is for the first time proved that it is expedient to apply a thermal barrier by creation of spatial electric field in the camera of the furnace between the burner and cages the metal.

Practical value. Introduction of the offered way of creation of a thermal barrier by means of spatial electric field can promote increase in energy efficiency of chamber furnaces.

Keywords: spatial electric field, mathematical modeling, chamber furnace, thermal barrier, furnace gas circulation

REFERENCES

- Jarymbash, S. T., Kilimnik, I. M., Jarymbash, D. S. (2011). Osobennosti jelektroteplovyh rezhimov glavnyh shinnyh paketov pechej grafitacii peremennogo toka, *Electrical Engineering and Power Engineering*, 1, 64–69. DOI 10.15588/1607-6761-2011-1-10
- Jarymbash, D. S., Olejnikov. (2013). Analiz jenergojeffektivnosti konstrukcij torcevyh soedinenij bokovyh shinnyh paketov i tokopodvodov pechej grafitacii *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2, 26–34. DOI 10.15588/1607-6761-2013-2-3

3. Svinolobov, N. P., Brovkin, V. L. (2002). Teoreticheskie osnovy metallurgicheskoy teplotehniki: uchebnoe posobie dlja vuzov, Dnipropetrovsk, Porogi, 154.
4. Gubinskij, V. I. (2004). Nagrevatel'nye pechi metallurgii - segodnja i zavtra, *The Theory and practice of metallurgy*, 6, 56-60.
5. Birjukov, A. B. (2012). Jenergojefektivnost' i kachestvo teplovoj obrabotki materialov v pechah: monografija, Donetsk, Noulidzh, 47.
6. Pat. Ukraine, 116305, Cposib termichnoï obrobki metalu u kamernih pechah periodichnoï diï/ Ju. G. Kachan, A. A. Vizer, V. L. Kovalenko, (Ukraine) ; applicant Zaporizhye State Engineering Academy. – u201612960 ; appdate 19.12.2016 ; pubdate 10.05.2017, bul. № 9. 4p.
7. Kachan, Ju. G., Stepkin, V. V., Liush, Ju. B. (2012). O povyshenii jenergojefektivnosti kamernyh nagrevatel'nyh pechej s vykatnym podom putem izmenenija polozhenija gorelochnyh ustrojstv, *Theory and the practician of metallurgy: nation-wide scientific and technical magazine*, 5–6 (88–89), 87–91.
8. Kachan, Ju. G., Kovalenko, V. L., Vizer, A. A. (2013). Shhodo mozhlivosti keruvannja teplovimi potokami prostorovim elektrichnim polem, *Metallurgical heating engineering : collection of scientific labours of the National metallurgical academy of Ukraine*, 13, 80–84.
9. Yakhot, V., Orszag, S., Thangam, S.et. al. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double technique. *Phys. Fluids A.*, 4, 7, 1510–1520. DOI 10.1063/1.858424.
10. Lauder, B. E. (1974). The numerical computation of turbulent flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269–289.
11. Sibir', A. V. (2007). Modelirovanie teploobmena v kamernoj pechi s central'noj regenerativnoj gorelkoj, *Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Mechanics*, 2/1, 131–139.
12. Stepanov, E. M., D'jachkov, B. G. (1968). Ionizacija v plameni i jelektricheskoe pole, Moscow, Metallurgija, 312.
13. Huang, M. (2005). Ehd-enhanced heat and mass transfer: dissertation ... doctor of philosophy, Norman, The University of Oklahoma, 152.
14. Mahmoudi, S. R. (2012). Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and mass transport in gaseous media, bulk dielectric liquids and dielectric thin liquid films: dissertation ... doctor of philosophy, London: The University of Western Ontario, 253.
15. Dulikravich, G. S., Colaco, M. J. (2006). Convective heat transfer control using magnetic and electric fields. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 13 (2), 139–155.