

УДК 662.921.31

Мних Ирина Николаївна, канд.техн.наук, доцент кафедри теплотехніки. Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна. Пр. Леніна, 226, м. Запоріжжя, Україна, . Тел. 066 634-93-97; irinamnih@yandex.ru; (<https://orcid.org/0000-0003-4931-2892>).

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАГРІВУ МЕТАЛУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В КАМЕРНІЙ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНІЙ ПЕЧІ

Розроблена математична модель для визначення часу нагріву і витримки при термічній обробці легированої сталі, тривалості імпульсу і паузи подачі палива, витрати палива на піч, що, в свою чергу, дозволило змоделювати температурне поле газового середовища в робочому просторі печі і нагрівання металу залежно від зміни коефіцієнта повернення m . Результати моделювання свідчать про підвищення якості термічної обробки металу, зниження часу термообробки та зменшенні сумарної витрати палива.

Ключові слова: термічна піч, температурне поле, повернення, рециркуляція.

Мных Ирина Николаевна, канд.техн.наук, доцент кафедри теплотехники. Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина. Пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, . Тел. 066 634-93-97; irinamnih@yandex.ru; (<https://orcid.org/0000-0003-4931-2892>).

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КАМЕРНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ПЕЧИ

Разработана математическая модель для определения времени нагрева и выдержки при термической обработке легированной стали, длительности импульса и паузы подачи топлива, расхода топлива на печь, что, в свою очередь, позволило смоделировать температурное поле газовой среды в рабочем пространстве печи и нагрева металла в зависимости от изменения коэффициента возврата m . Результаты моделирования свидетельствуют о повышении качества термической обработки металла, снижении времени термообработки и уменьшении суммарного расхода топлива.

Ключевые слова: термическая печь, температурное поле, возврат, рециркуляция.

Mnih Irina Nikolaevna, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. in the Department of thermal engineering. Zaporozhye state engineering Academy, Zaporozhye, Ukraine. Lenina av., 226, Zaporozhye, Ukraine, , Tel. 066 634-93-97; irinamnih@yandex.ru; (<https://orcid.org/0000-0003-4931-2892>).

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF HEATING THE METAL AND THE STUDY OF TEMPERATURE FIELDS IN RECIRCULATION CHAMBER FURNACE

In order to heat exchange intensification and increasing of heat transfer from gas to metal there was set a task for improvement of thermal performance of a chamber heat-treating furnace. To solve this problem there was proposed a construction of a chamber heat-treating furnace in which due to position of nozzles for supply and return of waste products of combustion in front of burners the reverse supply heat carrier is provided, the total multiplicity of recycling and heat carrier velocity increases. To prove the feasibility of this furnace design a mathematical model, which is based on the solution of coupled heat transfer in the furnace has been developed.

Mathematical model allows to determine: the time for heating and exposure, pulse duration and fuel supply pause, fuel consumption for the furnace, which in turn, allows to execute a numerical calculation of the temperature for heating medium and the temperature field section of furnace load. The simulation results show an improvement in the quality of metal heat treatment, reducing the heat treatment time and reducing the total fuel consumption.

Key words: furnace, the temperature field, the return, recycling.

Введение

Главным условием равномерности нагрева при термической обработке металла является интенсивный теплообмен между садкой и продуктами сгорания. В настоящее время актуальной является проблема уменьшения перепада температуры по сечению металла при нагреве в термической рециркуляционной печи. Это непосредственно связано с перепадом температуры греющей среды в рабочем пространстве. В случае, когда нагреваемый металл уложен в несколько слоёв – многорядная садка – к вышеуказанной проблеме добавляется проблема равномерного распределения температуры не только по ширине садки, но и по её высоте и отдельным элементам садки.

Длительное выравнивание температуры по сечению металла приводит к увеличению расхода топлива и снижению производительности процесса. Кроме того, режимы

термообработки легированных сталей сложны и предусматривают неоднократные этапы нагрева и охлаждения металла, что в результате приводит к неравномерности нагрева садки и увеличению длительности периода выдержки.

Анализ исследований и публикаций

Исследованиям и моделированиям теплообмена в камерных рециркуляционных печах посвящены работы Губинского В. И., Свинолобова Н. П. [1] и др.

Рециркуляционным процессам посвящены работы Пуговкина А.У. [2].

Подробная систематизация и анализ устройств отопительных систем печей приведены в работе [3].

Группой авторов под руководством М. П. Ревуна разработан способ отопления печей и система импульсного отопления камерных нагревательных печей [4].

В последние годы, в условиях экономии топлива, разрабатывался импульсно-реверсивный способ отопления [5].

При изучении литературы выявлено, что недостаточно изучен импульсно-реверсивный способ подачи теплоносителя. Использование такого способа актуально при среднетемпературной и низкотемпературной обработке металла и при выдержке, когда энергия топливно-воздушной струи невелика.

Постановка задачи

С целью интенсификации теплообмена и увеличении теплоотдачи от газа к металлу была поставлена задача совершенствования тепловой работы камерной термической печи. Для решения поставленной задачи предложена конструкция камерной термической печи, в которой благодаря размещению сопел подачи возврата отработанных продуктов сгорания напротив горелок обеспечивается реверсивная подача теплоносителя, увеличивается суммарная кратность рециркуляции и скорость теплоносителя [6].

Чтобы доказать целесообразность применения данной конструкции печи разработана математическая модель, в основу которой положено решение задачи сопряженного теплообмена в рабочем пространстве печи.

Математическая модель позволяет определить: время нагрева и выдержки, длительности импульса и паузы подачи топлива, расход топлива на печь, что в свою очередь, позволяет выполнить численный расчет температуры греющей среды и температурного поля сечения садки.

Решение задачи теплопроводности основывается на её постановке с приведением граничных условий, а также использовании для её решения численно-аналитических методов. В статье приводится методика расчёта температурного поля нагреваемого металла в термической камерной печи с неподвижным подом с учетом предлагаемого способа управления рециркуляцией на основе закона Фурье с помощью метода конечных разностей [7–9] и широких возможностей ЭВМ.

Применяя упрощённую схему теплообмена, считаем, что в период импульса поток греющих газов движется от горелочного устройства к выходному рециркуляционному каналу, вдоль поверхности нагрева металла, и к входному рециркуляционному каналу по определённой траектории. В период паузы поток греющих газов меняет свою траекторию в обратном направлении, т.е. от канала входа до канала выхода. На каждом элементарном участке поперечного сечения рабочей камеры печи происходит теплообмен между объёмом газа, поверхностями металла и кладки, расположенными в данном слое. При постановке задачи сделаны следующие допущения: теплообмен излучением между зонами печи незначителен и в расчётах не учитывается; футеровку печи считаем адиабатной.

Изложение результатов исследования

Математическая модель, описывающая в рамках сформулированной задачи процесс термической обработки металла, включает нестационарное двухмерное уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$0 < \tau < \tau_k; 0 < x < L; 0 < y < H.$$

Уравнение тепловой работы потока газов:

$$\Sigma U \cdot G_z \cdot c_z \cdot dT_z = -\alpha_{\Sigma}(m) \cdot (T_z - T_{нов}) \cdot dF. \quad (2)$$

Начальное условие:

$$T(x, y, 0) = T_0 \equiv const. \quad (3)$$

Граничные условия:

– условие (III рода) теплообмена газового потока с поверхностью металла (ab):

$$0 < x < L, y = 0: -\lambda \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} = \alpha_{\Sigma}(m) \cdot [T_z(f, \tau) - T(x, y, \tau)], \quad (4)$$

– условие (III рода) теплообмена газового потока с поверхностью металла (bc):

$$x = L, 0 < y < H: \lambda \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\Sigma}(m) \cdot [T_z(f, \tau) - T(x, y, \tau)], \quad (5)$$

– условие (III рода) теплообмена газового потока с поверхностью металла (cd):

$$0 < x < L, y = H: \lambda \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} = \alpha_{\Sigma}(m) \cdot [T_z(f, \tau) - T(x, y, \tau)], \quad (6)$$

– условие (III рода) теплообмена газового потока с поверхностью металла (da):

$$x = 0, 0 < y < H: -\lambda \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\Sigma}(m) \cdot [T_z(f, \tau) - T(x, y, \tau)], \quad (7)$$

где ρ – плотность материала садки, кг/м³;

c – массовая теплоемкость материала садки, Дж/(кг·К), c_z – объемная теплоемкость продуктов сгорания Дж/(м³·К);

λ – коэффициент теплопроводности материала садки, Вт/(м·К);

τ – время нагрева, с;

x – координата точки по ширине садки, м; y – координата точки по высоте садки, м;

f – координата точки по длине поверхности нагрева материала, м;

F – поверхность нагрева, м²;

$T(x, y, \tau)$ – температура садки, К; $T_z(f, \tau)$ – температура продуктов сгорания, К; $T_{нов}(\tau, F)$ – температура нагрева поверхности садки, К.

ΣU – суммарная кратность рециркуляции;

G_z – расход продуктов сгорания, м³/с;

$\alpha_{\Sigma}(m)$ – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

m – кратность возврата;

Схема взаимодействия струи продуктов сгорания с садкой представлена на рис. 1.

Для численного решения задачи (1) – (7) воспользовались методом Писмена-Рекфорда (метод расщепления по пространственным координатам) [2, 3]. Для аппроксимации дифференциального уравнения (1) разностным методом ввели пространственно–временную сетку с координатами $x_i = i \cdot h_x$; $y_j = j \cdot h_y$; $f_e = e \cdot h_f$; $\tau_k = k \cdot t$, где h_x , h_y , h_f – шаги по пространству, м, t – шаг по времени, с; $i = 0, N_x$, $j = 0, N_y$, $e = 0, N_f$ и $k = 0, K$.

Таким образом, вся расчетная область покрылась сеткой (рис. 2) [7]. Ввели следующее обозначение: $T(x_i, y_j, \tau_k) = T_{i,j}^k$, $T_z(f_e, \tau_k) = T_{e}^k$.

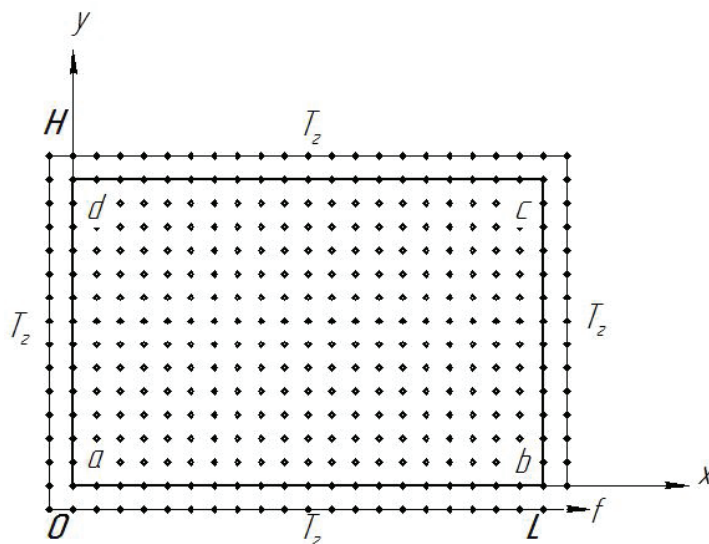


Рис. 1. – Область решения задачи:

x, y – декартовы координаты, м;
 f – контур по длине поверхности нагрева садки, м;
 L – длина пластины, м;
 H – высота пластины, м;
 T_2 – температура струи продуктов сгорания, К;
 a, b, c, d – граничные точки.

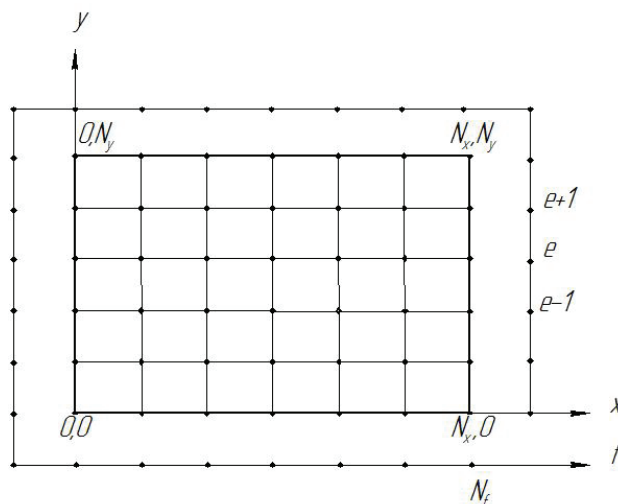


Рис. 2. Разностная сетка области решения

Дискретизация поверхности садки соответствует физическому содержанию задачи: всю поверхность нагрева совокупности тел, составляющих садку, делим на участки. В пределах одного участка поверхности ΔF газы имеют одинаковую температуру, равную температуре газов на выходе из участка, т.е. принимается допущение, характерное для режима идеального перемешивания. При переходе от одного участка поверхности к другому температура газа изменяется скачкообразно [1].

Формула для расчета температуры газа по длине поверхности нагрева садки (рециркуляционного контура) в любой момент времени, определяется из уравнения (2):

$$T_{2e}^k = \frac{1}{1 + \frac{\sum U \cdot G_e \cdot c_e}{\Delta F \cdot \alpha_{\Sigma}^k(m)}} \left(\frac{\sum U \cdot G_e \cdot c_e}{\Delta F \cdot \alpha_{\Sigma}^k(m)} \cdot T_{2e-1}^k + T_{нов e}^k \right), \quad (8)$$

где $T_{нов}$ – температура поверхности нагреваемой садки, К.

Температура продуктов сгорания на входе в область теплообмена (при $e=0$) определяем из условия полного перемешивания первичного и рециркуляционного газовых потоков с одинаковой удельной теплоемкостью:

$$T_{20}^k = \frac{T_{ex}^k + T_{yx}^k \cdot U + T_e^k \cdot m \cdot (U + 1)}{1 + U + m \cdot (U + 1)}, \quad (9)$$

где T_{ex} – температура продуктов сгорания на входе в топку из горелки, К; T_{yx} – температура уходящих отработанных продуктов сгорания, К; T_e – температура возврата, поступающего от сопел возврата, К.

Температуру уходящих продуктов сгорания T_{yx} для k -го момента времени принимали равной температуре газов на последнем участке рециркуляционного контура в $(k-1)$ -й момент времени, т.е. $T_{yx}^k = T_{N_f}^{k-1}$.

При полном сжигании топлива температуру входящих (свежих) продуктов горения принимаем:

$$T_{ex}^k = T_{кал}, \quad (10)$$

где $T_{кал}$ – calorиметрическая температура горения топлива, К.

Дискретизацию уравнения (1) провели на основе локально-одномерной схемы А. А. Самарского, которая является абсолютно устойчивой и обладает свойством суммарной аппроксимации [8]. Далее решение провели с помощью метода прогонки.

Произведя расчет численно-аналитическим способом, можно сравнить результаты с промышленными экспериментами и, тем самым, сделать вывод об адекватности предложенной математической модели.

Рассматривался отжиг металла при 1073 К. Задавались следующие характеристики нагреваемой садки: ширина $B = 1$ м, высота $L = 1$ м; масса $M = 21$ т; марка стали – среднеуглеродистая сталь; начальная температура металла 293 К; конечный перепад температуры по сечению металла – 10 К. Используемое газообразное топливо: природно-доменная смесь с теплотой сгорания $Q_n^p = 6,7$ МДж/м³; теплоемкость продуктов сгорания 1550 Дж/м³К. Задан состав топлива: доменный газ – CO₂ = 18 %; O₂ = 0,1 %; CO = 23 %; H₂ = 6,8 %; N₂ = 52,1%; природный газ – CH₄ = 97 %; C₂H₆ = 1,1 %; C₃H₈ = 0,2 %; C₄H₁₀ = 0,072 %; C₅H₁₂ = 0,018 %; C₅H₁₄ = 0,028 %; N₂ = 1,206 %; O₂ = 0,007 %; CO₂ = 0,369 %. Коэффициент теплопроводности садки $\lambda = 45$ Вт/м·К, плотность садки $\rho = 7800$ кг/м³.

Для определения влияния коэффициента возврата на основные показатели температурного режима – перепад температуры по высоте и ширине печи, расход топлива – построены зависимости перечисленных характеристик, в которых коэффициент возврата изменялся от 0,1 до 0,5 [10].

Подтверждение эффективности работы предлагаемых способов отопления и устройств тепловой обработки стали, и адекватности приведенной математической модели можно сделать на основе полученных результатов.

При импульсном отоплении с переменным периодом импульс-пауза τ_n значительно сокращается расход топлива. При импульсно-реверсивном отоплении с коэффициентом возврата $m = 0,3$ расход топлива снижается на 522 м³ за весь цикл термообработки.

Однако снижение суммарного расхода топлива не должно ухудшать качество термической обработки металла. Качество термообработки в первую очередь зависит от равномерности нагрева садки металла. При разных способах отопления и управления рециркуляционным контуром получены следующие результаты.

На рис. 3 представлено изменение температуры продуктов сгорания по длине рециркуляционного контура в зависимости от режима отопления в период выдержки.

При непрерывном отоплении перепад температуры газовой среды по длине рециркуляционного контура составил 50 °С, при импульсном отоплении – 31 °С, при импульсно-реверсивном отоплении при коэффициентах возврата m 0,1; 0,2 и 0,3 перепад

температуры составил 20 °С, 14 °С и 11 °С соответственно. В последнем случае видно выравнивание температур в начале и в конце рециркуляционного контура, что приводит к более равномерному распределению тепла в рабочем пространстве печи.

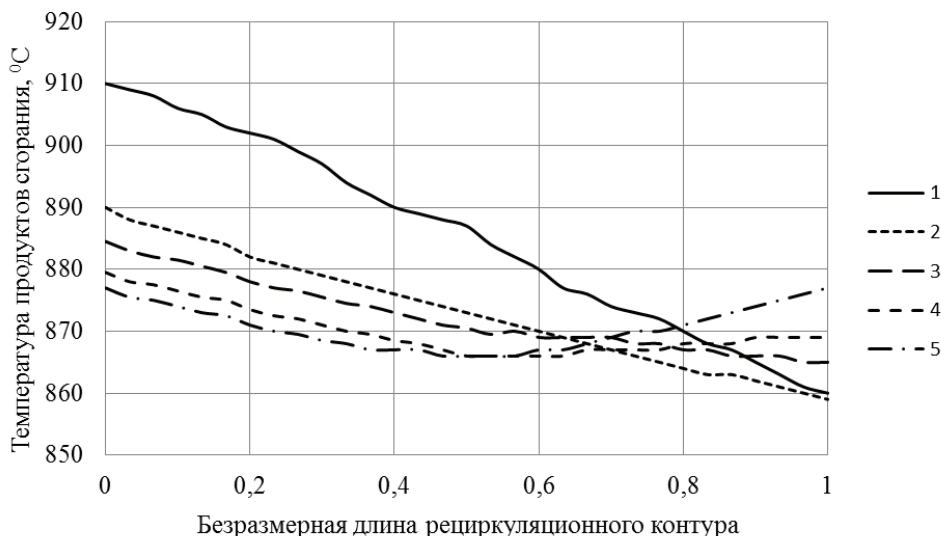


Рис. 3. Изменение температуры продуктов сгорания по длине рециркуляционного контура:

1 – режим непрерывного отопления; 2 – режим импульсного отопления; 3 – режим импульсно-реверсивного отопления при $m=0,1$; 4 – режим импульсно-реверсивного отопления при $m=0,2$; 5 – режим импульсно-реверсивного отопления при $m=0,3$.

На рис. 4 представлен перепад температуры по ширине садки в зависимости от режима выдержки и коэффициента возврата m .

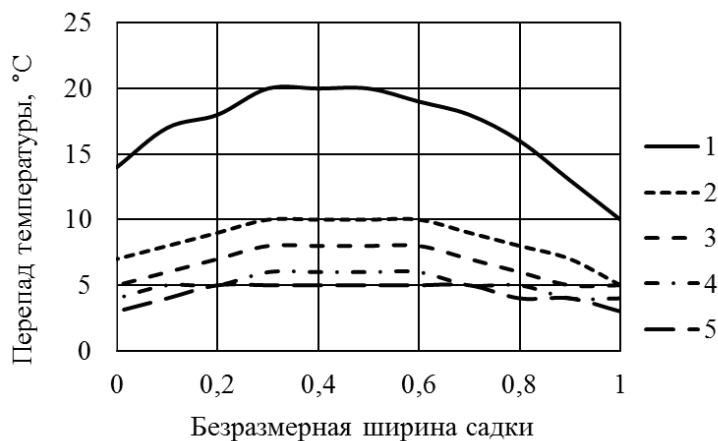


Рис. 4. Перепад температуры по ширине садки в зависимости от режима выдержки и коэффициента возврата m :

1 – режим непрерывного отопления; 2 – режим импульсного отопления; 3 – режим импульсно-реверсивного отопления при $m = 0,1$; 4 – режим импульсно-реверсивного отопления при $m = 0,2$; 5 – режим импульсно-реверсивного отопления при $m = 0,3$.

Видно, что в режиме непрерывного отопления максимальный перепад температуры составил 20 °С, в режиме импульсного отопления – 10 °С, в режиме импульсно-реверсивного отопления при коэффициентах возврата m 0,1; 0,2 и 0,3 максимальный перепад температуры

составил 8 °С, 6 °С и 5 °С соответственно. Это говорит о повышении качества термической обработки металла.

На рис. 5 представлен перепад температуры по ширине садки в зависимости от режима выдержки и коэффициента возврата m .

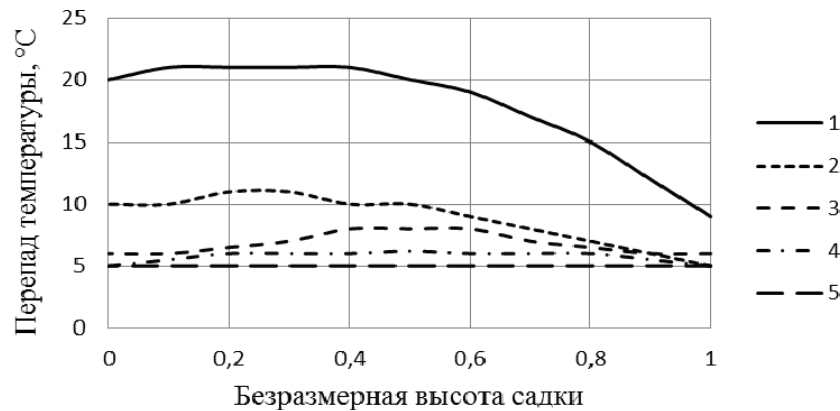


Рис. 5. Перепад температуры по ширине садки в зависимости от режима выдержки и коэффициента возврата m :

- 1 — режим непрерывного отопления; 2 — режим импульсного отопления;
 3 — режим импульсно-реверсивного отопления при $m = 0,1$; 4 — режим импульсно-реверсивного отопления при $m = 0,2$; 5 — режим импульсно-реверсивного отопления при $m = 0,3$.

Видно, что при непрерывном отоплении максимальный перепад температуры составил 21 °С, минимальный — 9 °С; при импульсном отоплении максимальный — 11 °С, минимальный — 5 °С; при импульсно-реверсивном отоплении при коэффициентах возврата m 0,1; 0,2 и 0,3 максимальный перепад температуры составил 8 °С, 6 °С и 5 °С соответственно. Причем, в последнем случае перепад температуры по высоте не изменяется, что характеризует равномерный нагрев металла.

Период нагрева составил 6 часов с перепадом температуры по сечению металла около 90 °С. Далее, расчеты показали, что наиболее равномерным температурное поле сечения металла в конце выдержки получилось при коэффициенте возврата $m = 0,3$. Т.е. при управлении контуром рециркуляции с помощью возврата возможно увеличение требования к качеству нагрева.

Для подтверждения адекватности математической модели использовались результаты промышленных испытаний тепловой работы термической печи № 12 ПАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь» им. Кузьмина А. В.».

Выводы

Разработана математическая модель для определения времени нагрева и выдержки при термической обработке легированной стали, длительности импульса и паузы подачи топлива, расхода топлива на печь, что, в свою очередь, позволило смоделировать температурное поле газовой среды в рабочем пространстве печи и нагрева металла в зависимости от изменения коэффициента возврата m .

Время термообработки металла при импульсно-реверсивном отоплении с $m = 0,3$ сократилось на 6 часов по сравнению с непрерывным отоплением и на 0,7 часа по сравнению с импульсным отоплением.

По сравнению с импульсным отоплением суммарный расход топлива при импульсно-реверсивном отоплении с $m = 0,3$ уменьшился на 522 м³/цикл.

При непрерывном отоплении максимальный перепад температуры составил 20 °С, при импульсном отоплении — 10 °С, при импульсно-реверсивном отоплении при коэффициентах возврата m 0,1; 0,2 и 0,3 максимальный перепад температуры составил 8 °С,

6 °С и 5 °С соответственно, что говорит о повышении качества термической обработки металла.

Список использованной литературы:

1. Губинский В. И. Теория пламенных печей [Текст] / В. И. Губинский, Лу Чжун – У. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. Пуговкин А.У. Рециркуляционные пламенные печи в машиностроении [Текст] / А. У. Пуговкин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 158 с.
3. Рыжков Г. М. Совершенствование термических камерных печей [Текст] / Г. М. Рыжков, В. А. Черняков, В. Г. Рыжков // Ин-т «Черметинформация». – М., 1988. – Вып. № 3 (Обзор. информ. Сер. Общепромышленные вопросы).
4. А. с. 1086023 СССР, МПК С 21 Д 9/70. Способ отопления камерных нагревательных печей [Текст] / Ревун М. П., Сайфаров Я. Ю., Франк Ф. Ф. и др. – 3484697/22-02 ; заявл. 12.08.82 ; опубл. 15.04.84, Бюл. № 14. – 4 с.
5. Импульсний об'ємно-регенеративний спосіб спалювання палива [Текст]: пат. 46018 Україна: МПК F 23 № 5/26 / Єрьомін О. О. – № u200904625; заявл. 08.05.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 3 с.
6. Камерна термічна піч [Текст] : пат. 55197 Україна: МПК F 27 В 3/00. / Ревун М. П., Яковлева І. Г., Мних І. М., Барищенко О. М.; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія. – № u201005977 ; заявл. 18.05.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23. – 4 с.
7. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности [Текст] : учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
8. Самарский А.А. Теория разностных схем [Текст] / А.А. Самарский – М. : Наука, 1977. – 656 с.
9. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах [Текст] / С. В. Патанкар. – Пер. с англ. Е. В. Калабина; под ред. Г. Г. Янькова. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
10. Яковлева, И. Г. К расчёту параметров греющей смеси продуктов сгорания в термической печи при реверсивной подаче возврата в подподовую топку [Текст] / И. Г. Яковлева, И. Н. Мных, Е. Н. Барищенко // Metallurgical heat engineering: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Выпуск 3 (18). – Днепропетровск: Новая идеология, 2011. – С. 155 – 163.

References:

1. Gubinsky, V. (1995), the Theory of the fiery furnaces, Mashinostroenie, 256 p.
2. Pugovkin, A. (1987), Recirculation fiery furnace in mechanical engineering, Leningrad, Mashinostroenie, 158 p.
3. Ryzhkov G. (1988), Improving thermal furnaces, Moscow, Review. information. Ser. Industry-wide issues.
4. A. S. 1086023 the USSR, IPC 21 D 9/70. The method of heating chamber heating furnaces / Howler M. P., Safarov Y. Y., Frank F. F. and others - 3484697/22-02 ; Appl. 12.08.82 ; publ. 15.04.84, bull. No. 14. – C. 4.
5. Impulsive Ob mno-regenerative method of spalovania Paliwa : Pat. 46018 Ukraine: IPC F 23 N 5/26 / Ryan O. O. No. u200904625 ; Appl. 08.05.2009 ; publ. 10.12.2009, bull. No. 23. – C. 3.
6. Chamber termon pecz: Pat. 55197 Ukraine: IPC F 27 In 3/00. / Howler M. P., Yakovlev I. G., Mnich I. M. Borisenko O. M. ; Savnik I patentblatt Zaporiz'ka sovereign ngenera Academy. - No. u201005977 ; Appl. 18.05.2010 ; publ. 10.12.2010, bull. No. 23. – C. 4.
7. Kuznetsov G. (2007), Difference methods for solving heat conduction problems, Tomsk: Publishing house TPU, 172 p.
8. Samarskii A. (1977), Theory of difference schemes, Moscow, Nauka, 656 p.
9. Patankar S. (2003), Numerical solution of problems of thermal conductivity and convective heat transfer in the flow channels, Moscow, Publishing house of MPEI, – C. 312.
10. Yakovleva, I. (2011), To calculate the parameters of the heating of the mixture of products of combustion in a thermal furnace at reversing the flow return to podomovoy the furnace, Metallurgical heat engineering: proceedings of the National metallurgical Academy of Ukraine, Vol. 3 (18), Dnepropetrovsk: a New ideology, P. 155–163.

Поступила в редакцию 10.04 2015 г.