

А.Б. Бирюков /д.т.н./, С.И. Гинкул /к.т.н./, П.А. Гнигиёв /к.т.н./
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.А. Иванова /к.т.н./
 ГУ «Институт прикладной математики и механики» (Донецк)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Создана прогнозная математическая модель тепловой работы печи с шагающими балками, которая базируется на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в двухмерной постановке (для произвольного поперечного сечения сортовой заготовки). На основании анализа результатов проведенных численных экспериментов сделан вывод, что для конкретной печи качественный нагрев при заданных температурах зон можно получить только при определенных соотношениях между производительностью печи и расстоянием между заготовками.

Ключевые слова: печь с шагающими балками, прогнозная математическая модель, температурное поле металла, качественный нагрев, зазор между заготовками, производительность печи.

Постановка проблемы

Современное металлургическое производство характеризуется наличием высокопроизводительных технологических комплексов, в которых значительную роль играют печи, предназначенные для нагрева металла перед горячей обработкой давлением. В настоящее время одним из основных направлений совершенствования работы печей является использование математических моделей (в том числе и прогнозных моделей), описывающих их тепловую работу, то есть влияние технологических и конструктивных параметров на температурное поле металла.

Анализ последних исследований и публикаций

Одним из самых современных типов проходных печей, предназначенных для нагрева слябов и сортовых заготовок, в настоящее время являются печи с шагающими балками [1,2]. Известно множество разработанных и успешно используемых математических моделей тепловой работы различного рода печей [3,4].

При этом затруднительно использовать математические модели в полной постановке, в которых математическая формулировка задачи помимо дифференциального уравнения теплопроводности включает уравнения, описывающие аэродинамические процессы в печи и теплообмен излучением. Такой подход, повышая точность исследования, приводит к значительному усложнению задачи с алгоритмической точки зрения и загрузки вычислительных ресурсов. Адаптация таких моделей также является сложной задачей. В результате их использование в качестве прогнозного компонента становится

затруднительным. В работе [5] представлена прогнозная математическая модель для поддержки конструкторской проработки печей с шагающими балками.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание прогнозных математической модели, позволяющей изучать влияние технологических параметров на температурное поле металла в конкретной печи с шагающими балками, и иллюстрация возможностей ее использования.

Основной материал исследования

Исходными величинами для разрабатываемой модели являются количество зон печи, схема отопления, геометрические размеры печи, геометрические параметры ограждающей конструкции и теплофизические свойства использованных для ее создания материалов; используемое топливо, температурный режим каждой зоны и пределы регулирования температурного режима каждой зоны, производительность печи.

Количество заготовок, одновременно находящихся в печи, определяется зависимостью [6]:

$$nz = \frac{L}{l_x + aa},$$

где L – длина печи, м; l_x – ширина заготовки, м; aa – расстояние между заготовками, м.

Масса одной заготовки, кг:

$$g = l_x \cdot l_y \cdot l_z \cdot \rho,$$

где l_x, l_y, l_z – ширина, толщина и длина одной заготовки, м; ρ – плотность металла, кг/м³;

Масса металла, одновременно находящегося в печи, кг:

$$G = n z \cdot g.$$

Время нагрева, с:

$$\tau = \frac{G}{P},$$

где G – масса металла, кг; P – производительность печи, кг/с.

Время нагрева металла в методической зоне определяется по формуле, с:

$$\tau_{мет} = \frac{L_{мет} \cdot \tau_0}{L},$$

где $L_{мет}$ – длина методической зоны, м; L – общая длина печи, м; τ_0 – суммарное время нагрева металла в печи.

Аналогично определяется время нагрева в других зонах.

Длина заготовок, нагреваемых в методических печах, во много раз больше ширины и толщины, поэтому изменением температуры по длине заготовки можно пренебречь.

В методических печах с шагающими балками нагрев заготовок квадратного и прямоугольного сечения происходит с 4-х сторон. Изменение температуры металла по толщине и ширине можно определить, решая двумерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} c(t) \rho(t) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right], \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$\tau=0; \quad t(x, y, 0) = t_n; \quad (2)$$

и граничными, установленными в соответствии с [7] и рис. 1:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{изл1x} (t_{печ1x} - t_{0,y,\tau}) \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l_x} &= \alpha_{изл2x} (t_{печ2x} - t_{l_x,y,\tau}) \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_{изл1y} (t_{печ1y} - t_{x,0,\tau}) \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=l_y} &= \alpha_{изл2y} (t_{печ2y} - t_{x,l_y,\tau}) \end{aligned} \quad (3)$$

В печах с шагающими балками заготовки располагают с зазорами, что значительно ускоряет их нагрев [6]. При этом боковые грани заготовок получают тепло в основном излучением от верхней и нижней частей печи.

Для описания лучистого теплообмена используется схема нагрева, приведенная на рис. 2.

Приведенный коэффициент излучением к верхней поверхности заготовки $C_{z,к.м2}$ рассчитываем по формуле В.Н. Тимофеева:

$$C_{z,к.м2} = c_0 \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_z \frac{\Psi_{к.м2} \cdot (1 - \varepsilon_z) + 1}{\Psi_{к.м2} \cdot (1 - \varepsilon_z) (\varepsilon_m + \varepsilon_z \cdot (1 - \varepsilon_m)) + \varepsilon_z},$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); $\varepsilon_z, \varepsilon_m$ – степень черноты газа и степень черноты металла; $\Psi_{к.м2}$ – угловой коэффициент излучением кладки на верхнюю поверхность заготовки, равный:

$$\Psi_{к.м2} = \frac{l}{(l+a)}.$$

Для оценки теплоотдачи излучением в зазоре вводится условная поверхность 3, которая отличается от степени черноты металла:

Приведенный коэффициент излучением $C_{z,к3}$:

$$C_{z,к3} = c_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_z \frac{\Psi_{к3} \cdot (1 - \varepsilon_z) + 1}{\Psi_{к3} \cdot (1 - \varepsilon_z) (\varepsilon_3 + \varepsilon_z \cdot (1 - \varepsilon_3))},$$

где

$$\Psi_{к.м2} = \frac{a}{(l+a)}.$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{1 + \frac{a}{2l_y + a} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_m} - 1 \right)}.$$

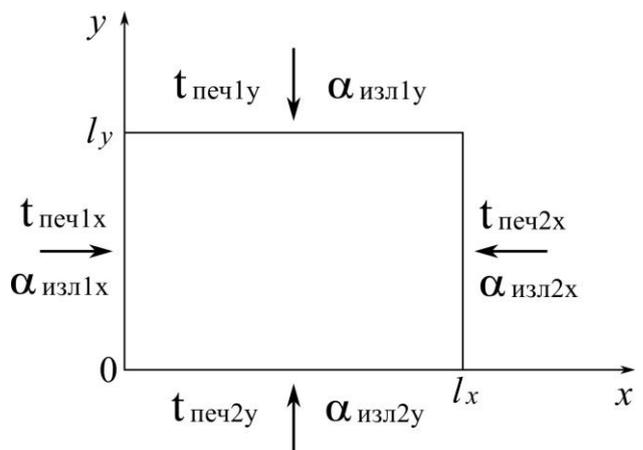


Рис. 1. К рассмотрению граничных условий

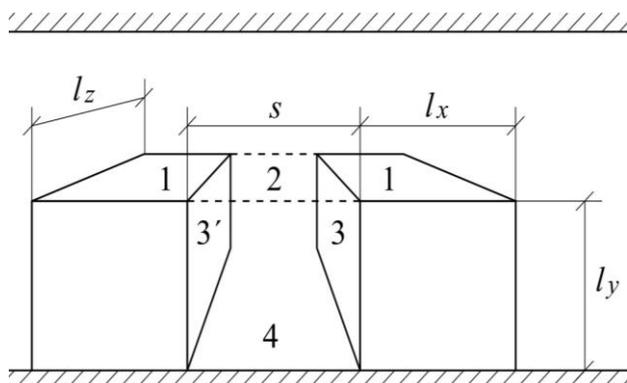


Рис. 2. Схема нагрева заготовок в печах с шагающими балками:

- l_x, l_y – поверхность заготовки;
- 1 – поверхность заготовки;
- 2 – условная поверхность;
- 3 – боковая поверхность;
- 4 – открытая поверхность пода

Для определения приведенного коэффициента излучением $C_{z.k.m4}$ необходимо вычислить угловой коэффициент ψ_{43} :

$$\psi = \left[\left(1 + \frac{a}{l_y} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l_y} \right)^2} \right].$$

Приведенный коэффициент излучением $C_{z.k.m4}$ равняется:

$$C_{z.k.m4} = c_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_2 \frac{\psi_{43} \cdot (1 - \varepsilon_2) + 1}{\psi_{43} \cdot (1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_3 + \varepsilon_2 \cdot (1 - \varepsilon_3)) + \varepsilon_2}.$$

Уравнение (1) с начальными условиями (2) и граничными (3) решалось по конечно-разностной схеме [2].

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется из уравнения [8]:

$$\alpha_{изл} = \frac{c_{z.m} \cdot \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right]}{t_z - t_m}.$$

Разработанный алгоритм позволяет выполнить моделирование температурного поля металла для произвольного расстояния между заготовками и в случае, когда заготовки располагаются без зазора между ними.

Оценка адекватности проведена путем сопоставления результатов, полученных с ее помощью, с литературными данными [6]. Для тестовых условий расхождение результатов не превышало 5 %.

Для иллюстрации использования модели проведен ряд численных экспериментов с целью решения вопросов:

- о влиянии производительности печи при неизменном расстоянии между заготовками и зафиксированном распределении температур по зонам печи на температурное поле металла и расход топлива;

- о влиянии зазора между заготовками при неизменных производительности печи и распределении температур по зонам печи на температурное поле металла.

Исходные данные для проведения численных экспериментов:

- геометрия нагреваемых слябов $l_x \times l_y \times l_z$, м 0,3x0,21x10,5;

- длины зон печи: методической $L_{мет}$, м – 6,72; 1-й сварочной $L_{св1}$, м – 13,12; 2-й сварочной $L_{св2}$, м – 10,83; томильной $L_{том}$, м – 6,72;

- теплота сгорания топлива (природно-доменная смесь) Q_{it}^p , МДж/м³ 20,9.

Табл. 1. Данные моделирования нагрева заготовок при различной производительности и одинаковом расстоянии между заготовками

Производительность, P, кг/с	Время нагрева, с	Расстояние между заготовками, aa, м	Температура, °C		Расход топлива	
			Поверхности, t_n	Середины, t_y	B, м ³ /с	B _{объем} , м ³
66,67	7087	0,1	1250	1176	5,415	3,844·10 ⁴
77,22	6543	0,1	1237	1150	5,829	3,82·10 ⁴
77,78	6085	0,1	1223	1123	6,243	3,799·10 ⁴

Табл. 2. Результаты моделирования нагрева металла при одинаковой производительности печи и различном расстоянии между заготовками

Производительность P, кг/с	Время нагрева τ , с	Количество заготовок в печи, nz	Расстояние между заготовками, aa, м	Температура металла °C		Расход топлива	
				поверхности, t_n	середины, t_n	B, м ³ /с	B _{объем} , м ³
66,67	7087	91	0,1	1250	1176	5,415	8,044·10 ⁴
66,67	5687	73	0,2	1231	1134	5,415	3,085·10 ⁴
66,67	4751	61	0,3	1209	1081	5,415	2,219·10 ⁴

Для изучения первого вопроса производительность печи варьировалась от 66,67 до 77,78 кг/с. В табл. 1 приведены результаты моделирования нагрева металла при разной производительности и одинаковом расстоянии между заготовками $aa=0,1$ м.

Из анализа результатов, представленных в табл. 1, можно заключить, что при увеличении производительности печи время нагрева уменьшается, в связи с этим конечная температура нагрева снижается, перепад температуры между поверхностью и серединой заготовки увеличивается. Так, при производительности $P=66,67$ кг/с перепад температур по сечению составлял $\Delta t=1250-1176=74$ °С, а при производительности $P=77,78$ кг/с перепад температур составил $\Delta t=100$ °С. Секундный расход топлива с увеличением производительности увеличивается, а итоговый удельный расход незначительно уменьшается, поскольку время нагрева уменьшается.

Для изучения второго вопроса при неизменной производительности печи 66,67 кг/с расстояние между заготовками варьировалось от 0,1 до 0,3 м. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Из анализа результатов, представленных в табл. 2, можно заключить, что увеличение расстояния между заготовками приводит к уменьшению количества заготовок в печи, а это приводит к сокращению времени нагрева заготовок. Секундный расход топлива остается постоянным для различного расстояния между заготовками. Увеличение расстояния между заготовками приводит к снижению итогового удельного расхода топлива. Уменьшение времени нагрева не обеспечивает нагрев металла до заданного качества. Так, при расстоянии между заготовками $aa=0,1$ м металл на поверхности нагревается до $t_n=1250$ °С, а середина – до $t_y=1176$ °С. При расстоянии $aa=0,3$ м температура поверхности равняется $t_n=1209$ °С, а середины – $t_y=1081$ °С. По технологии нагрева температура поверхности должна равняться $t_n=1250$ °С, а середины – $t_y=1200$ °С.

Выводы

Создана прогнозная математическая модель тепловой работы печи с шагающими балками,

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, S.I. Ginkul /Cand. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
A.A. Ivanova /Cand. Sci. (Eng.)/
Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk)

MATHEMATICAL MODELING OF FURNACES OPERATION WITH WALKING BEAMS

Background. An important task is the development of predictive mathematical models for furnaces with walking beams, allowing quick assessment of the thermal condition of the metal under the influ-

предназначенная для изучения влияния технологических параметров на температурное поле металла, нагреваемого в печи с заданным набором конструктивных параметров.

На основании анализа результатов проведенных численных экспериментов сделан вывод: на действующей печи качественный нагрев металла можно получить только при определенном соотношении между производительностью печи и расстоянием между заготовками.

Список литературы

1. Курбатов, Ю.Л. *Металлургические печи: учеб. пособие для вузов / Ю.Л. Курбатов, Ю.Е. Василенко.* – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – 388 с.
2. Ткаченко, В.Н. *Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко.* – Т. 13. – Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
3. Бирюков, А.Б. *Математические модели тепловой обработки металла в печах / А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв // Черная металлургия.* – 2016. – № 11 (1403). – С. 56-63.
4. Biryukov, A.B. *Mathematical model for studying of metal air-cooling process in furnaces / A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev, A.I. Voloshin // Steel in Translation.* – 2015. – V. 45. – No.7. – P. 534-538.
5. Гинкул, С.И. *Прогнозная математическая модель процесса нагрева металла в печах с шагающими балками / С.И. Гинкул и др. // Металлург.* – 2018. – № 1. – С. 24-28.
6. Мاستрюков, Б.С. *Расчеты нагревательных печей / Б.С. Мاستрюков.* – М.: Металлургия, 1986. – 376с.
7. Biryukov, A.B. *Experimental investigation of convective heat exchange in chamber furnaces at heat treatment of cylindrical solids / A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev // Thermophysics and Aeromechanics.* – 2016. – Vol. 23. No. 3. – P. 467-472.
8. *Heat and mass transfer / S.I. Ginkul [et al.].* – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 292 p.

ence of a certain combination of technological factors. At the same time, it is difficult to use mathematical models in a complete formulation in which the mathematical formulation of the problem, in addition to the differential equation of thermal conductivity, includes equations describing aerodynamic processes in the furnace and heat transfer by radiation. This approach, increasing the accuracy of the study, leads to a significant complication of the problem from an algorithmic point of view and loading computing resources. The adaptation of such models is a challenging task. The objective of this paper is to create a simplified predictive mathematical model that allows for the conditions of a specific furnace to perform a quick analysis of the process tested parameters influence on the temperature field of the metal.

Materials and/or methods. The developed predictive mathematical model based on the solution of the differential equation of unsteady thermal conductivity in a two-dimensional formulation (for an arbitrary cross-section of a billet). In setting the boundary conditions of heat exchange, considered that, when placing a billet with a gap, the radiant heat flux falls on its lateral faces. The adequacy of the model is confirmed by comparing the obtained results with the literature data.

Results. The result of the numerical experiments shows that for the adopted geometrical parameters of the furnace, when the distance between the billets is 0.1 m, the productivity increase from 66.67 kg/s to 77.78 kg/s leads to an increase of the temperature drop across the thickness of the billet by 26°C; at a constant furnace productivity of 66.67 kg/s the change in the distance between billets from 0.1 to 0.3 m leads to a decrease in fuel consumption, however, the temperatures of the surface and center decrease to 41 and 119°C, respectively, and the difference between centre and surface increases by 78°C.

Conclusion. In the paper, the predictive mathematical model for describing the thermal operation of the furnace with walking beams developed and tested which allows evaluating the influence of the process parameters on the temperature field of the metal. The conclusion is that for a particular furnace, high-quality heating at specified zone temperatures can be obtained only at specific ratios between the performance of the furnace and the distance between the billets.

Keywords: furnace with walking beams, predictive mathematical model, temperature field of metal, high-quality heating, the gap between billets, furnace productivity.

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
 Author ID: 7006918782
 ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
 Телефон: +380 (62) 301-08-61
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

С.И. Гинкул

SPIN-код: 7667-2980
 Author ID: 6508301176
 ORCID iD: 0000-0002-6521-0645
 Телефон: +380 (62) 301-08-61
 Эл. почта: ginkul.si@gmail.com

А.А. Иванова

SPIN-код: 6560-2868
 Author ID: 54935647300
 ORCID iD: 0000-0003-0573-8859
 Телефон: +380 (62) 311-04-36
 Эл. почта: ivanova.iamm@mail.ru

П.А. Гнитиёв

SPIN-код: 1943-4196
 Author ID: 56916104300
 ORCID iD: 0000-0001-9266-7969
 Телефон: +380 (62) 301-08-34-71
 Эл. почта: gnitiev.pavel@gmail.com

Статья поступила 01.03.2018 г.

© А.Б. Бирюков, С.И. Гинкул, А.А. Иванова, П.А. Гнитиёв, 2018
 Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров

