



Оригинальная статья

УДК 621.78.013

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-374-381



СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ЛИСТОВЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

М. Ж. Богатова, С. И. Чибизова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. В статье предложен способ совершенствования тепловой работы нагревательных печей с шагающими балками станов горячей прокатки при помощи статистической математической модели нагрева металла. Объектом исследования является тепловая работа методической печи с шагающими балками для нагрева слябов перед прокаткой. Предметом исследования – статистическое моделирование нагрева металла в печи данного типа. Создание статистической математической модели основано на отборе факторов, построении регрессионной модели, корреляционном анализе и оценке значимости переменных, построении регрессионной модели с учетом скорректированных факторов, получении уравнений регрессии. На базе результатов, полученных в ходе проведения 15 автоматизированных направленных промышленных экспериментов на методических печах станов горячей прокатки российских металлургических предприятий, разработана статистическая модель, описывающая с допустимой точностью процесс нагрева стальных заготовок. Проведена адаптация статистической модели с использованием результатов промышленных экспериментов. Приведены графики сравнения реальных температурных значений и температур, рассчитанных на основании штатной математической и разработанной статистической модели для одного из экспериментов. Проведен расчет погрешностей созданной модели. Сформулированы основные выводы, базирующиеся на результатах проделанного исследования. Впервые в металлургической практике разработана статистическая модель, описывающая процесс нагрева металла в пятизонной методической печи листового стана горячей прокатки с восемью нагревательными подзонами. Поскольку функция регрессии определена, интерпретирована и обоснована, и оценка точности регрессионного анализа соответствует требованиям, можно считать, что построенная модель и прогнозные значения обладают достаточной надежностью.

Ключевые слова: математическая модель, статистическая модель, направленный промышленный эксперимент, нагревательная печь с шагающими балками, система мониторинга, температурный режим, совершенствование тепловой работы

Для цитирования: Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 374–381.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-374-381>

Original article

STATISTICAL MODELING OF TEMPERATURE OPERATING MODES OF HEATING FURNACES FOR HOT STRIP MILLS

M. Zh. Bogatova, S. I. Chibizova

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. The article provides a method of mathematical modeling to improve temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills. The object of the research is the thermal operation of a continuous walking beam furnace for heating slabs before rolling. The subject of the research is statistical modeling of metal heating in furnaces of this type. The creation of a statistical model consists of factors selection, construction of regression model, correlation analysis and assessment of the variables significance, adjustment of factors and obtaining regression equations. The main part of the research refers to a statistical model based on a comprehensive analysis. This model is based on the results of 15 automated industrial experiments on Russian heating furnaces of hot strip mills and describes the heating process in walking-beam furnace with acceptable accuracy. The adaptation of the statistical model and error calculation has been carried out. The article contains graphs comparing real temperatures and temperatures calculated on the basis of mathematical and statistical models for one of the experiments. The main conclusions are formulated based on the results of the research done. For the first time in metallurgical practice, a statistical model has been developed that describes the process of metal heating in a five-zone continuous furnace with eight heating subzones. Since the regression function is defined, interpreted and justified, and the assessment of the accuracy of the regression analysis meets the requirements, it can be assumed that the model and predicted values have sufficient reliability.

Keywords: mathematical model, statistical model, directed industrial experiment, walking-beam heating furnace, monitoring system, temperature mode, thermal operation improvement

For citation: Bogatova M.Zh., Chibizova S.I. Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 374–381. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-374-381>

ВВЕДЕНИЕ

Черная металлургия в России имеет существенные резервы снижения затрат основных производственных ресурсов за счет повышения энергоэффективности металлургических печных агрегатов, которые являются важнейшим и наиболее энергоемким видом отраслевого технологического оборудования [1 – 7].

В современном мире большая часть выплавляемой стали обрабатывается на станах горячей прокатки, эффективность функционирования которых определяет конечное качество и энергоэффективность производства горячекатаного металла, в первую очередь листовой продукции, доля которой составляет около 70 % всего выпуска готового проката.

Температура металла – один из основных параметров технологического процесса нагрева в печах. В зависимости от того, насколько правильно выбран температурный режим нагрева слябов, отсутствует ли окалина на поверхности сляба, зависит качество получаемого проката. Кроме того, на нагрев слябов уходит большое количество топлива (природного, коксового и доменного газов), нерациональный расход которого приводит к повышению себестоимости продукции. Принимая во внимание масштабы производства проката, даже при небольшом снижении расхода топлива и угара металла повышение точности контроля температуры металла приводит к существенному экономическому эффекту. Данный факт является важнейшим стимулом для исследования и разработки новых и модернизации ранее известных методов контроля температуры металла в различных нагревательных печах. Дальнейшее совершенствование тепловой работы нагревательных печей, улучшение их эксплуатационных показателей, является существенным резервом повышения производительности, экономичности и качества готового проката, т. е. всего прокатного производства в целом.

Снижение энергозатрат и повышение качества нагрева металла напрямую связано с наличием и эффективностью автоматических систем управления тепловой работой агрегата.

Математические модели нагрева [8 – 14], как правило, аналитические, на основании которых ведется управление печью, нуждаются в периодической корректировке ввиду изменения значений настроечных коэффициентов.

Поиск оптимальных тепловых режимов путем проведения теплотехнических испытаний является главным методом совершенствования технологии нагрева металла в методических печах. Трудоемкость процесса обусловлена ограниченностью информации о процессе внутри печи, а выводы, которые формулируются на

базе полученных результатов, зачастую не всегда дают адекватное представление о реальной картине процесса нагрева.

Проходные методические печи являются высокопроизводительными, непрерывными агрегатами, обеспечивающими нагрев под прокатку до заданной температуры стальных заготовок квадратного, прямоугольного или круглого сечения различных марок сталей. Тепловые и температурные процессы, которые происходят внутри рабочего пространства данных печей, весьма многообразны и сложны для изучения. Зачастую во время математического описания, моделирования и исследования теплообмена в нагревательных печах возникают значительные трудности. Благодаря высокому развитию современных численных методов и компьютерных технологий появляется возможность изучать практически любую представляющую интерес задачу, а также создавать точную математическую модель исследуемого объекта [15, 16].

Внедрение автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) нагрева, а также применение расчетов на ЭВМ в качестве меры по улучшению нагрева металла в методических печах требует создания адекватных математических моделей, которые бы могли определять тепловое состояние металла в течение всего процесса нагрева.

Разработка статистической модели процесса нагрева сляба и последующая адаптация модели по результатам эксперимента в методической нагревательной печи имеет важное теоретическое и практическое значение, так как благодаря такой модели появляется возможность выбора оптимальных условий для нагрева той или иной стальной заготовки на базе известных и контролируемых параметров работы агрегата.

Работа направлена на совершенствование функционирования нагревательных печей с шагающими балками на основе комплексного направленного исследования температурных режимов нагрева металла при помощи статистической модели нагрева. Модель создана для пятизонной методической печи листового стана горячей прокатки с восемью нагревательными подзонами. В печи выделяются: неотопливаемая методическая зона (1), отопливаемые сверху и снизу зоны предварительного нагрева (2.1, 2.2), две зоны нагрева (3.3, 3.4, 4.5, 4.6) и томильная (5.7, 5.8) (рис. 1).

Основные задачи, которые решались по ходу исследования:

- анализ данных тепловой работы нагревательных печей;
- изучение особенностей конструкции методических печей с пятью зонами (восемью нагревательными подзонами);

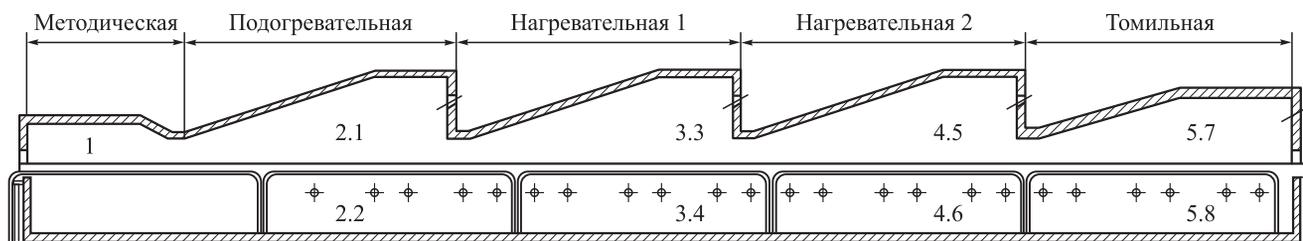


Рис. 1. Схема методической печи листового стана горячей прокатки с восемью нагревательными подзонами

Fig. 1 Scheme of continuous furnace of hot strip mill with eight heating subzones

– рассмотрение основ статистического моделирования тепловой работы нагревательных печей;

– анализ данных, полученных в результате промышленных экспериментов, проведенных на нагревательных печах станов горячей прокатки российских предприятий;

– разработка способов и средств определения температуры металла в нагревательных методических печах при помощи статистического моделирования при использовании ограниченного набора исходных данных;

– создание статистической модели процесса нагрева сляба в методической печи в виде уравнений регрессии, которые связывают конечную температуру верха, середины и низа сляба с параметрами нагрева и параметрами металла, которые практически контролируются в технологическом процессе на листовом стане горячей прокатки;

– адаптация статистической модели на основании результатов промышленных экспериментов на исследуемых печах [17, 18].

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучать тепловую работу нагревательных печей можно при использовании автономного регистратора

ра температур. Основная концепция данного прибора заключается в проведении ряда измерений короткими гибкими кабельными термоэлектрическими преобразователями, в то время как регистрирующий прибор, фиксирующий результаты измерений, располагается рядом с объектом измерений (либо на опытной заготовке, либо на соседней). При этом прибор заключают в контейнер-термостат, который обеспечивает защиту регистратора от действия высоких температур. Для проведения многократного оперативного изучения температурного режима нагрева металла и анализа температурных режимов работы печи была разработана методика и создан аппаратно-программный комплекс автономной регистрации на базе аппаратуры, поставляемой фирмой Phoenix TM (рис. 2) [19].

Система состоит из автономного регистратора данных, набора термопар (6 – 20 шт.), специального теплозащитного контейнера, системы передачи данных по радиотелеметрическому каналу и компьютерного интерфейса, который позволяет получать и отображать значения реального профиля температур внутри печи, распределение температуры по сечению сляба в процессе его нагрева.



Рис. 2. Автономный регистратор температуры компании Phoenix TM:

1 – электронный автономный регистратор температуры; 2 – теплозащитный контейнер; 3 – гибкие термоэлектрические термометры; 4 – компьютерный интерфейс

Fig. 2 Autonomous temperature recorder “Phoenix TM”:

1 – electronic autonomous temperature recorder; 2 – heat-shielding container; 3 – flexible thermocouples; 4 – computer interface

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Благодаря анализу большого массива данных, полученных в ходе проведения 15 автоматизированных направленных промышленных экспериментов на методических пятizonных печах стана 2000 и стана 5000 российских предприятий, появилась возможность создания статистической модели нагрева металла в процессе прохождения через зоны и на выходе из печи.

Адекватная статистическая модель позволяет, не осуществляя реальных экспериментов на объекте исследования, получить интересующую актуальную информацию о событиях, которые имеют место на реальном объекте. В рамках статистического моделирования регрессионный анализ является важнейшим инструментом исследования, который оценивает взаимосвязь между несколькими переменными и влияние независимых переменных на зависимую.

Можно выделить следующие этапы построения статистической математической модели (СММ) [20 – 23].

Отбор факторов модели. В качестве независимых переменных для методической зоны были выбраны: начальная температура сляба ($^{\circ}\text{C}$), масса сляба (кг), толщина сляба (м), площадь сляба (м^2), длина зоны (м), время в зоне (с). Для всех последующих отапливаемых зон дополнительно были введены такие факторы, как средняя температура по сечениям сляба в начале зоны ($^{\circ}\text{C}$), заданная температура верха ($^{\circ}\text{C}$), заданная температура низа ($^{\circ}\text{C}$).

Следует отметить, что достоинством СММ является то, что в ней используются только измеряемые параметры процесса (не используются неизвестные коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением и неизвестное распределение температурного поля по зоне агрегата и др., которые всегда составляют основу аналитических математических моделей).

Построение регрессионной модели. Построение модели осуществлялось при помощи пакета Регрессия (Microsoft Office Excel), где в качестве независимых переменных выступали штатные измерения, а в качестве зависимых – температуры металла в конце каждой зоны. Важнейшим этапом построения регрессионной модели является оценка значимости модели и отдельных факторов, которая осуществлялась при помощи коэффициента детерминации R -квадрат (применяется при анализе общего качества уравнения линейной многофакторной регрессии), а также показателя значимости F (используется для проверки значимости коэффициента детерминации).

Корреляционный анализ, оценка значимости переменных. Предназначение корреляционного анализа сводится к выявлению наличия зависимости между различными факторами. При помощи корреляционного анализа появляется возможность подобрать переменные, обеспечивающие высокую значимость коэффициентов и уравнения в целом [24 – 26].

Построение регрессионной модели с учетом скорректированных факторов. На данном этапе повторно осуществлялся регрессионный анализ с применением скорректированных коэффициентов.

Получение уравнений регрессии. В результате было получено пятнадцать уравнений, которые описывают процесс нагрева металла в методической печи и обладают достаточной точностью.

Ниже представлены уравнения для каждого сечения в рамках пяти зон:

– методическая зона

$$t_{\text{в}} = -1964,029 + 0,087\tau + 0,037m + 3,777h,$$

$$t_{\text{ц}} = -1663,547 + 0,074\tau + 0,032m + 3,114h,$$

$$t_{\text{н}} = -2339,006 + 0,089\tau + 0,044m + 4,5h;$$

– зона подогрева

$$t_{\text{в}} = -561,739 + 0,044\tau + 0,924t_{\text{з}}^{\text{в}} + 0,306t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}},$$

$$t_{\text{ц}} = -441,253 + 0,044\tau + 0,768t_{\text{з}}^{\text{в}} + 0,277t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}},$$

$$t_{\text{н}} = -295,045 + 0,033\tau + 0,739t_{\text{з}}^{\text{в}} + 0,311t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}};$$

– 1-ая сварочная зона

$$t_{\text{в}} = -918,3 + 0,04\tau + 0,97t_{\text{з}}^{\text{в}} + 0,83t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}},$$

$$t_{\text{ц}} = -1304,941 + 0,054\tau + 1,15t_{\text{з}}^{\text{в}} + 1,014t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}},$$

$$t_{\text{н}} = -531,257 + 0,024\tau + 0,801t_{\text{з}}^{\text{в}} + 0,662t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}};$$

– 2-ая сварочная зона

$$t_{\text{в}} = -1365,631 + 0,038\tau + 0,584t_{\text{з}}^{\text{в}} + 1,433t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}},$$

$$t_{\text{ц}} = -1870,117 + 0,051\tau + 0,707t_{\text{з}}^{\text{в}} + 1,713t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}},$$

$$t_{\text{н}} = -1264,588 + 0,04\tau + 0,663t_{\text{з}}^{\text{в}} + 1,265t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}};$$

– томильная зона

$$t_{\text{в}} = 418,136 + 0,546t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}} + 10,805L + 5,429F,$$

$$t_{\text{ц}} = -378,321 + 0,496t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}} + 0,029\tau + 0,753t_{\text{з}}^{\text{в}},$$

$$t_{\text{н}} = 207,43 + 0,508t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}} + 0,313t_{\text{з}}^{\text{в}},$$

где $t_{\text{в}}$ – среднее значение температуры верхней поверхности сляба, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ц}}$ – среднее значение температуры центра сляба, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{н}}$ – среднее значение температуры нижней поверхности сляба, $^{\circ}\text{C}$; τ – время в зоне, с; m – масса сляба, кг; h – толщина сляба, мм; $t_{\text{з}}^{\text{в}}$ – задание верх, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{з}}^{\text{н}}$ – задание низ, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ср.нач.}}^{\text{в}}$, $t_{\text{ср.нач.}}^{\text{ц}}$, $t_{\text{ср.нач.}}^{\text{н}}$ – средняя температура поверхности, центра и низа сляба в начале зоны, $^{\circ}\text{C}$; L – длина зоны, м; F – площадь сляба, м^2 .

На рис. 3 представлен график, сравнивающий реальные значения СММ со значениями, которые предсказывает штатная математическая модель.

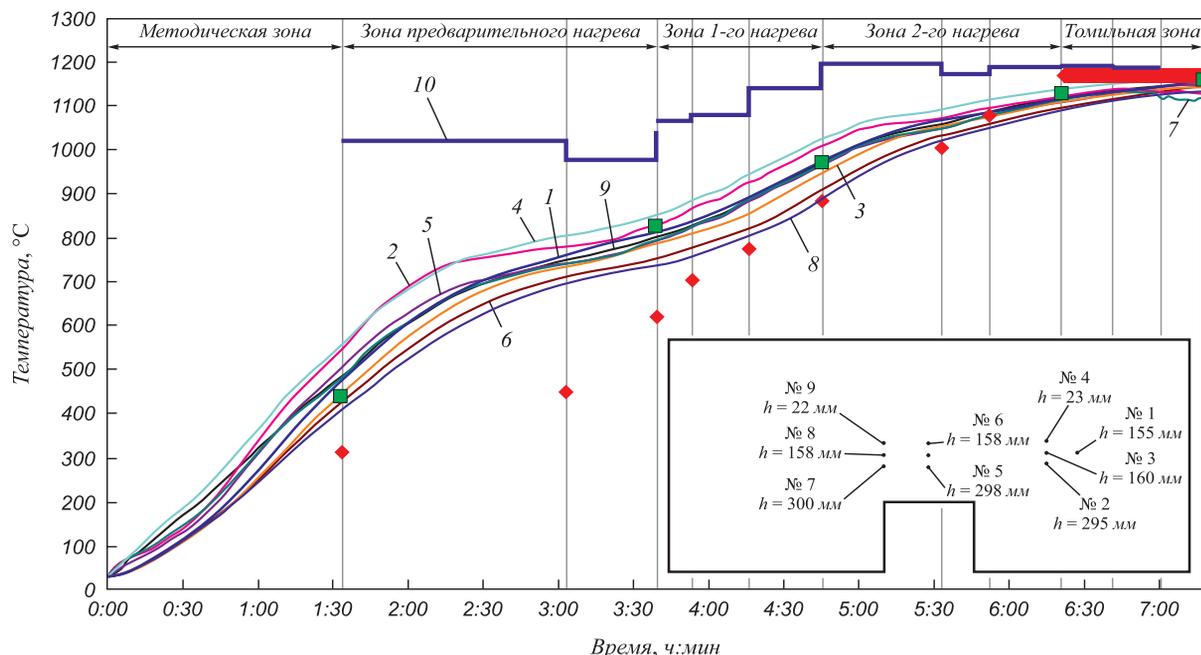


Рис. 3. Сравнение результатов одного из экспериментов (стан 5000):

1 – 155 мм; 2 – 295 мм; 3 – 160 мм; 4 – 23 мм; 5 – 298 мм; 6 – 158 мм; 7 – 300 мм; 8 – 158 мм; 9 – 22 мм; 10 – температура в зоне по показаниям штатных термоэлектрических термометров; ◆ – целевая температура в конце зоны по математической модели; ■ – по статистической модели

Fig. 3 Comparison of the experimental results (mill 5000):

1 – 155 mm; 2 – 295 mm; 3 – 160 mm; 4 – 23 mm; 5 – 298 mm; 6 – 158 mm; 7 – 300 mm; 8 – 158 mm; 9 – 22 mm; 10 – temperature in the zone according to the readings of the standard PCB; ◆ – target temperature at the end of the zone according to mathematical model; ■ – statistical model

Сводный расчет погрешностей модели по всем зонам

Consolidated error calculation for all zones

Эксперимент	По эксперименту, °C	По модели, °C	Ошибка, °C	Ошибка, %	По эксперименту, °C	По модели, °C	Ошибка, °C	Ошибка, %
<i>1-ая сварочная зона</i>					<i>2-ая сварочная зона</i>			
Верх					Верх			
1	1169,7	1130,2	39,5	3,4	1223,8	1276,7	-52,9	4,3
2	878,8	865,5	13,3	1,5	1051,3	1007,5	43,8	4,2
Центр					Центр			
1	1106,2	1074,4	31,8	2,9	1209,4	1287,0	-77,6	6,4
2	812,9	804,4	8,5	1,0	993,9	941,0	52,9	5,3
Низ					Низ			
1	1134,9	1116,3	18,6	1,6	1209,8	1261,4	-51,6	4,3
2	1012,5	935,2	77,3	7,6	1097,5	1016,4	81,1	7,4
<i>Подогревательная зона</i>					<i>Томильная зона</i>			
Верх					Верх			
1	924,2	835,7	88,5	9,6	1227,9	1237,1	-9,3	0,8
2	512,8	513,6	-0,9	0,2	1168,0	1142,3	25,7	2,2
Центр					Центр			
1	784,5	737,9	46,6	5,9	1218,9	1245,6	-26,7	2,2
2	485,9	471,4	14,5	3,0	1127,7	1091,2	36,5	3,2
Низ					Низ			
1	906,4	854,0	52,4	5,8	1207,8	1198,6	9,2	0,8
2	620,3	571,6	48,7	7,9	1148,7	1158,8	-10,0	0,9

График наглядно показывает, что рассчитанные по СММ значения достаточно близки к реальным показателям, в то время как значения ММ в некоторых точках, а именно с начала зоны предварительного нагрева и до начала зоны нагрева № 2 отличаются более, чем на 150 °С.

Проведена адаптация СММ посредством расчета температур верхней поверхности, центра и нижней поверхности металла по полученным уравнениям регрессии на основании данных двух дополнительных экспериментов. Результаты расчета температуры сляба на выдаче из печи, представленные в таблице, отличаются от экспериментальных не более, чем на 3,2 %, что говорит о высокой точности созданной модели.

Поскольку функция регрессии определена, интерпретирована и обоснована, а оценка точности регрессионного анализа соответствует требованиям, можно считать, что построенная модель и прогнозные значения обладают достаточной надежностью и являются средними значениями, которые можно ожидать.

Промышленные исследования позволяют изучать реальные температурные режимы нагрева металла по мере его продвижения в рабочем пространстве печи и на выдаче, а также сформулировать рекомендации по совершенствованию работы печи на базе результатов проведенных исследований.

Выводы

В результате использования регрессионного анализа в пакете Microsoft Excel построено 15 уравнений регрессии, составляющих СММ, для поверхности, центра и низа сляба в рамках пяти зон печи; установлена форма зависимости и направление связи между переменными; оценено качество полученной регрессионной прямой; подсчитаны отклонения расчетных данных от данных исходного набора; рассчитаны будущие значения зависимой переменной.

Таким образом создана адекватная статистическая модель, описывающая температурные режимы работы пятизонной методической печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Бельский А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Чибизова С.И. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей станов горячей прокатки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. 2015. № 2. С. 62–69.
2. Бельский А.М., Бурсин А.Н., Мордовкин Д.С., Улановский А.А., Чибизова С.И. Задачи совершенствования тепловой работы и конструкции нагревательных печей станов горячей прокатки // Труды XI конгресса прокатчиков: Сборник трудов. Т. 1. Магнитогорск, 2017. С. 29–35.
3. Мордовкин Д.С. Исследование и оптимизация технологии нагрева непрерывнолитых слябов в методических печах: Дисс. ... канд. техн. наук. Липецк, 2011. 214 с.
4. Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А., Подгородецкий Г.С. Модель расчета концентрации вторичных металлургических выбросов в атмосфере // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 5. С. 300–305.
<http://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-300-305>
5. Favennec Y., Labb V., Bay F. Induction heating processes optimization a general optimal control approach // Journal of Computational Physics. 2003. Vol. 187. No. 1. P. 68–94.
[http://doi.org/10.1016/S0021-9991\(03\)00081-0](http://doi.org/10.1016/S0021-9991(03)00081-0)
6. Feischl M., Führer T., Niederer M., Strommer S., Steinboeck A., Praetorius D. Efficient numerical computation of direct exchange areas in thermal radiation analysis // Numerical Heat Transfer, Part B – Fundamentals. 2016. Vol. 69. No. 6. P. 511–533.
<http://doi.org/10.1080/10407790.2016.1173469>
7. Wang H. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature // ISIJ International. 2005. Vol. 45. No. 9. P. 1291–1296.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1291>
8. Антипкина М.Е., Крупенников С.А., Левицкий И.А. Определение оптимальной толщины футеровки нагревательной печи // Новые Огнеупоры. 2019. № 10. С. 42–47.
9. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
10. Арутюнов В.А., Левицкий И.А., Ибадуллаев Т.Б. Разработка методов математического моделирования теплофизических про-
1. Belen'kii A.M., Bursin A.N., Ulanovskii A.A., Chibizova S.I. Improvement in thermal operation of heating furnaces for hot rolling mills. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015, no. 2, pp. 62–69. (In Russ.).
2. Belen'kii A.M., Bursin A.N., Mordovkin D.S., Ulanovskii A.A., Chibizova S.I. Problems of improvement in thermal operation of heating furnaces for hot rolling mills. In: *XI Congress of Rollermen: Proceedings*. Vol. 1. Magnitogorsk, 2017, pp. 29–35. (In Russ.).
3. Mordovkin D.S. *Research and optimization of heating technology of continuously cast slabs in continuous furnace: Cand. Tech. Sci. Diss.* Lipetsk: 2011, 214 p. (In Russ.).
4. Orelikina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A., Podgorodetskii G.S. Calculation model for the concentration of secondary metallurgical emissions into the atmosphere. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 5, pp. 300–305. (In Russ.).
<http://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-300-305>
5. Favennec Y., Labb V., Bay F. Induction heating processes optimization a general optimal control approach. *Journal of Computational Physics*. 2003, vol. 187, no. 1, pp. 68–94.
[http://doi.org/10.1016/S0021-9991\(03\)00081-0](http://doi.org/10.1016/S0021-9991(03)00081-0)
6. Feischl M., Führer T., Niederer M., Strommer S., Steinboeck A., Praetorius D. Efficient numerical computation of direct exchange areas in thermal radiation analysis. *Numerical Heat Transfer, Part B – Fundamentals*. 2016, vol. 69, no. 6, pp. 511–533.
<http://doi.org/10.1080/10407790.2016.1173469>
7. Wang H. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 9, pp. 1291–1296.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1291>
8. Antipkina M.E., Krupennikov S.A., Levitskii I.A. Determination of optimum lining thickness for a heating furnace. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020, vol. 60, no. 5, pp. 510–515.
<http://doi.org/10.1007/s11148-020-00395-2>
9. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Mathematical Modeling of Industrial Furnaces Thermal Operation*. Moscow: Metallurgiya, 1990, 239 p. (In Russ.).
10. Arutyunov V.A., Levitskii I.A., Ibadullaev T.B. Development of methods for mathematical modeling of thermophysical processes

- цессов в топливных промышленных печах // *Металлург*. 2011. № 1–2. С. 33–37.
11. Alizadeh M., Edris H., Shafyei A. Mathematical modeling of heat transfer for steel continuous casting process // *International Journal of ISSI*. 2006. Vol. 3. No. 2. P. 7–16.
 12. Chen W.H., Chung Y.C., Liu J.L. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 32. No. 5. P. 695–706. <http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.019>
 13. Chen Y.W., Chai T.Y. Modelling and prediction for steel billet temperature of heating furnace // *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*. 2010. Vol. 2. No. 5-6. P. 342–349.
 14. Storck J., Lindberg B. A cost model for the effect of setup time reduction in stainless steel strip production // *Proceedings, 1st Swedish Production Symposium*. Gothenburg, Sweden, 2007. P. 1–8.
 15. Han S.H., Chang D., Kim C.Y. A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. No. 19-20. P. 3855–3861. <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.002>
 16. Wild D., Meurer T., Kugi A. Modelling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2009. Vol. 15. No. 3. P. 209–232. <http://doi.org/10.1080/13873950902927683>
 17. Бельский А.М., Дубинский М.Ю., Калимулина С.И. Промышленный эксперимент – основа проведения энергосберегающей политики в металлургической теплотехнике // *Металлург*. 2010. № 5. С. 26–29.
 18. Бельский А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г. Температура: теория, практика, эксперимент. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике. М.: Теплотехник, 2007. 736 с.
 19. Улановский А.А., Тааке М., Бельский А.М., Бурсин А.Н., Чибизова С.И. Использование автономной автоматизированной системы компании Phoenix TM для мониторинга температурного поля нагреваемого металла в металлургических печах // *Черные металлы*. 2019. № 9. С. 59–64.
 20. Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки // *Труды IX Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» 12–14 декабря 2018 г., Москва*. С. 196–203.
 21. Радченко Ю.С. Основы статистического моделирования: Учебное пособие для вузов. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2010. 30 с.
 22. Улановский А.А., Бельский А.М. Повышение эффективности нагревательных печей станов горячей прокатки // *Труды VI Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология»*. М.: МИСиС, 2012. С. 472–484.
 23. Carlsson L.S., Samuelsson P.B., Jönsson P.G. Using statistical modeling to predict the electrical energy consumption of an electric arc furnace producing stainless steel // *Metals*. 2020. Vol. 10. No. 1. Article 36. <http://doi.org/10.3390/met10010036>
 24. Hsieh C.T., Huang M.J., Lee S.T. Numerical modeling of a walking-beam-type slab reheating furnace // *Numerical Heat Transfer; Part A – Applications*. 2008. Vol. 53. No. 9. P. 966–981. <http://doi.org/10.1080/10407780701789831>
 25. Kim J.G., Huh K.Y., Kim I.T. Three-dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace in hot strip mills // *Numerical Heat Transfer; Part A – Applications*. 2000. Vol. 38. No. 6. P. 589–609. <http://doi.org/10.1080/104077800750021152>
 26. Santos C.P., Giacomini C.N. Computer simulation of slab reheating process in walking beam furnaces // *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008. Vol. 5. No. 1. P. 35–39.
 - in industrial fuel furnaces. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 1–2, pp. 3–9. <http://doi.org/10.1007/s11015-011-9385-7>
 11. Alizadeh M., Edris H., Shafyei A. Mathematical modeling of heat transfer for steel continuous casting process. *International Journal of ISSI*. 2006, vol. 3, no. 2, pp. 7–16.
 12. Chen W.H., Chung Y.C., Liu J.L. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2005, vol. 32, no. 5, pp. 695–706. <http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.019>
 13. Chen Y.W., Chai T.Y. Modelling and prediction for steel billet temperature of heating furnace. *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*. 2010, vol. 2, no. 5-6, pp. 342–349.
 14. Storck J., Lindberg B. A cost model for the effect of setup time reduction in stainless steel strip production. In: *Proceedings, 1st Swedish Production Symposium*. Gothenburg, Sweden, 2007, pp. 1–8.
 15. Han S.H., Chang D., Kim C.Y. A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010, vol. 53, no. 19-20, pp. 3855–3861. <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.002>
 16. Wild D., Meurer T., Kugi A. Modelling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2009, vol. 15, no. 3, pp. 209–232. <http://doi.org/10.1080/13873950902927683>
 17. Belen'kii A.M., Dubinskii M.Yu., Kalimulina S.I. Factory testing – The basis for implementing an energy-saving policy in metallurgical heat engineering. *Metallurgist*. 2010, vol. 54, no. 5-6, pp. 263–267. <http://doi.org/10.1007/s11015-010-9290-5>
 18. Belen'kii A.M., Dubinskii M.Yu., Ladygichev M.G. *Temperature: Theory, Practice, Experiment. Vol. 2: Temperature Measurement in Industry and Power Engineering*. Moscow: Teplotekhnik, 2007, 736 p. (In Russ.).
 19. Ulanovskii A.A., Taake M., Belen'kii A.M., Bursin A.N., Chibizova S.I. Using a Phoenix TM autonomous automated system for monitoring temperature field of metal to be heated in metallurgical furnaces. *Chernye metallurgiya*. 2019, no. 9, pp. 59–64. (In Russ.).
 20. Bogatova M.Zh., Chibizova S.I. Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for strip hot rolling mill. In: *Proceedings of the IX Int. Sci. and Pract. Conf. "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies. Furnace Aggregates. Ecology" December 12–14, 2018, Moscow*, pp. 196–203. (In Russ.).
 21. Radchenko Yu.S. *Basics of Statistical Modeling: Manual for Universities*. Voronezh: VSU, 2010, 30 p. (In Russ.).
 22. Ulanovskii A.A., Belen'kii A.M. Improving efficiency of heating furnaces of rolling mills. In: *Proceedings of the IX Int. Sci. and Pract. Conf. "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies. Furnace Aggregates. Ecology"*. Moscow: NUST "MISIS", 2012, pp. 472–484. (In Russ.).
 23. Carlsson L.S., Samuelsson P.B., Jönsson P.G. Using statistical modeling to predict the electrical energy consumption of an electric arc furnace producing stainless steel. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 1, article 36. <http://doi.org/10.3390/met10010036>
 24. Hsieh C.T., Huang M.J., Lee S.T. Numerical modeling of a walking-beam-type slab reheating furnace. *Numerical Heat Transfer; Part A – Applications*. 2008, vol. 53, no. 9, pp. 966–981. <http://doi.org/10.1080/10407780701789831>
 25. Kim J.G., Huh K.Y., Kim I.T. Three-dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace in hot strip mills. *Numerical Heat Transfer; Part A – Applications*. 2000, vol. 38, no. 6, pp. 589–609. <http://doi.org/10.1080/104077800750021152>
 26. Santos C.P., Giacomini C.N. Computer simulation of slab reheating process in walking beam furnaces. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008, vol. 5, no. 1, pp. 35–39.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Майя Жемлейловна Богатова, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: ma95bers@gmail.com

Светлана Игоревна Чибизова, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: s_kalimulina@mail.ru

Maiya Zh. Bogatova, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

E-mail: ma95bers@gmail.com

Svetlana I. Chibizova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

E-mail: s_kalimulina@mail.ru

Поступила в редакцию 29.10.2020

После доработки 02.11.2020

Принята к публикации 01.03.2021

Received 29.10.2020

Revised 02.11.2020

Accepted 01.03.2021