

ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 669.162

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142528

© Хаджинов А.С.¹, Хаджинов Е.А.², Гриценко К.Э.³

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ОГНЕУПОРНЫХ БЛОКОВ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ НАГРЕВА ДУТЬЯ

Проанализировано влияние геометрических размеров насадки воздухонагревателя и расхода топлива на температуру дутья. Для этого использовалась двумерная математическая модель работы доменного воздухонагревателя. Модель адаптирована по результатам работы воздухонагревателей на доменной печи №3 ММК им. Ильича. Увеличение расхода доменного газа на 30% позволяет увеличить температуру дутья на 137°C. При этом увеличиваются потери тепла с уходящими газами на 2,6%. Переход со стандартного 6-гранного блока с размером ячейки 41 мм на такой же блок с размером ячейки 30 мм позволяет повысить температуру на 33°C за счет интенсификации теплообмена от продуктов горения к насадке и снижения потерь тепла с уходящими газами.

Ключевые слова: доменный воздухонагреватель, температура дутья, математическая модель.

Хаджинов О.С., Хаджинов Е.О., Гриценко К.Е. Дослідження впливу витрати палива і геометричних розмірів вогнетривких блоків насадки доменного повітрянагрівача на температуру нагрівання дуття. В даний час середня температура гарячого дуття на доменних печах України істотно знизилася і становить близько 1000°C. Це не пов'язано з можливостями його нагрівання, а викликано дефіцитом і вартістю природного газу, неритмічною подачею сировини і її якістю. Збільшення температури нагріву дуття в доменному виробництві – це один з ефективних шляхів скорочення витрати дорогого коксу і поліпшення параметрів роботи доменної печі. Поширені способи збільшення температури дуття, такі як збагачення природним газом або киснем, є досить дорогими, а тому в даний час і малопривабливими для промислових підприємств. У зв'язку з цим, стають актуальними альтернативні мало затратні способи збільшення температури дуття і методи оцінки їх ефективності. Проаналізовано вплив геометричних розмірів насадки повітрянагрівача і витрати палива на температуру дуття. Для цього використовувалася двовимірна математична модель роботи доменного повітрянагрівача. Модель адаптована за результатами роботи повітрянагрівачів на доменній печі №3 ММК ім. Ілліча. Збільшення витрати доменного газу на 30% дозволяє збільшити температуру дуття на 137°C. При цьому збільшуються втрати тепла з газами, що йдуть, на 2,6%. Проте збільшення споживання доменного газу обмежується наступними чинниками: наявністю резерву газу доменної печі на заводі, ємністю пальника, характеристиками вентилятора для подачі повітря та вихлопного газу. Перехід зі стандартного 6-гранного блоку з розміром осередку 41 мм на такий же блок з розміром осередку 30 мм дозволяє підвищити температуру на 33°C за рахунок інтенсифікації теплообміну від продуктів горіння до насадки і

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, a.khadzhinov@mail.ru

² мл. науч. сотр., Институт газа НАН Украины, г. Киев, evgen.visi@gmail.com

³ магистр, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

зниження втрат тепла з газами. У цьому випадку, у зв'язку зі зменшенням об'єму твердого тіла насадки, її теплова потужність зменшиться.

Ключові слова: доменний повітрянагрівач, температура дуття, математична модель.

O.S. Khadzhyonov, Y.O. Khadzhyonov, K.E. Gritsenko. Investigation of the influence of fuel consumption and geometric dimensions of the refractory blocks of the blast furnace nozzle on the blast-heating temperature. At present, the average temperature of hot blast on blast furnaces in Ukraine has significantly decreased and is about 1000°C. This is not related to the possibilities of its heating, but is caused by the shortage and cost of natural gas, the irregular feed of raw materials and their quality. An increase in the blast-furnace heating temperature in blast-furnace production is one of the effective ways to reduce the expensive coke rate and improve the parameters of the blast furnace operation. The common ways to increase the blast temperature, such as enrichment with natural gas or oxygen, are very expensive, and therefore are not currently in practice at industrial enterprises. Due to that, alternative low-cost ways to increase the blast temperature and methods for evaluating their effectiveness become relevant. The influence of the geometric dimensions of the air heater nozzle and the fuel consumption on the blast temperature have been analyzed. For this, a two-dimensional mathematical model of the operation of the blast air heater was used. The model results from the operation of the air heaters at the blast furnace No. 3 of «Ilyich iron and steel works». An increase in the blast furnace gas consumption by 30% makes it possible to increase the blast temperature by 137°C. In this case, heat losses with outgoing gases increase by 2,6%. However, an increase in blast furnace gas consumption is restricted by the following factors: blast furnace gas proper reserve at the plant, the capacity of the burner, the operational features of the fan for supplying air and exhaust gases. The change-over from the standard 6-gang block with a 41 mm cell size to the same block with a 30 mm cell size makes it possible to raise the temperature by 33°C due to the intensification of heat exchange from the combustion products to the nozzle and to reduce heat losses with the outgoing gases. In this case, owing to the volume reduction of the nozzle solid body, its thermal power will decrease.

Keywords: blast air heater, blast temperature, mathematical model.

Постановка проблеми. Увеличение температуры нагрева дутья в доменном производстве – один из эффективных путей сокращения расхода дорогостоящего кокса и улучшения параметров работы доменной печи. Температура горячего дутья на выходе из воздухонагревателя при использовании в качестве топлива доменного газа обычно составляет 800-1000°C, что связано с его низкой калорийностью. Распространенные способы увеличения температуры дутья, такие как обогащение природным газом или кислородом, являются весьма дорогостоящими, а поэтому в настоящее время и малопривлекательными для промышленных предприятий. В связи с этим, становятся актуальными альтернативные мало затратные способы увеличения температуры дутья и методы оценки их эффективности.

Анализ последних исследований и публикаций. В ходе анализа литературных данных можно выделить следующие мало затратные методы повышения температуры нагрева дутья: увеличение тепловой мощности воздухонагревателя за счет повышения расхода топлива, улучшение интенсивности теплообмена с помощью изменения геометрических параметров насадки, оптимизация цикла работы блока воздухонагревателей [1, 2].

Подобные методы мало исследовались в связи с широким применением природного газа, обогащенного кислородом воздуха, подогрева воздуха и других более эффективных методов повышения температуры дутья. Однако в настоящее время средняя температура горячего дутья на доменных печах Украины существенно снизилась и составляет около 1000°C. Это не связано с возможностями его нагрева, а вызвано дефицитом и стоимостью природного газа, неритмичной подачей сырья и его качеством [3].

Анализ различных диаметров насадки приведен в монографии Л.П. Греса [4]. При увеличении живого сечения насадок с заданным диаметром ячеек их удельная поверхность нагрева растет, что должно привести к повышению температуры нагрева дутья или к уменьшению га-

баритов насадки для заданной температуры нагрева дутья. Но одновременно с увеличением живого сечения насадки уменьшается масса кирпича, и, как следствие, увеличивается скорость снижения температуры дутья за период. Снижается также и температура нагрева дутья, которая поступает в печь, если не выбрать рациональную продолжительность периодов. Поэтому существует оптимальная величина живого сечения, при котором температура нагрева дутья будет максимальной, а габариты насадки минимальными.

Таким образом, необходимо одновременно иметь значительное увеличение поверхности нагрева насадки, теплоаккумулирующей массы и живого сечения, допустимую величину газодинамического сопротивления насадки. Следует ожидать, что лучшей будет насадка, которая имеет максимальное отношение поверхности нагрева к ее массе. Оптимизация режимов работы воздухонагревателей позволяет повысить температуру дутья на 20-50°C практически без капитальных вложений. Подробно данный вопрос рассмотрен в работах [1, 2, 5].

Цель статьи – с помощью математической модели оценить влияние геометрических размеров насадки воздухонагревателя и расхода топлива на температуру дутья.

Изложение основного материала. Решение поставленной выше задачи осуществлялось с помощью математической модели работы доменного воздухонагревателя, описанной в [6].

Одним из способов повышения температуры дутья является увеличение расхода доменного газа на нагрев воздухонагревателя. Исследуемый воздухонагреватель работает при следующих режимных параметрах: расход доменного газа – 25000 м³/ч, температура дутья – 995°C, время периода дутья – 1,5 часа, максимальная температура дымовых газов на выходе из воздухонагревателя – 400°C (модель адаптирована по результатам работы воздухонагревателей на доменной печи №3 ММК им. Ильича). Для определения влияния расхода топлива на параметры нагрева необходимо для каждого исследуемого значения расхода найти оптимальный режим, позволяющий достичь максимальной температуры дутья. Так, при одном и том же расходе топлива, но разной длительности периода дутья, различны его температуры.

Анализ влияния расхода доменного газа, используемого для нагрева воздухонагревателя на максимально возможную температуру дутья, время нагрева, мощность воздухонагревателя, потери тепла с уходящими дымовыми газами и температуру дымовых газов на выходе из воздухонагревателя проводился с помощью разработанной математической модели. На данный момент на исследуемой доменной печи расход доменного газа на нагрев составляет 25000 м³/ч. Для такого расхода максимально возможная температура дутья – 999°C. Поиск максимально возможной температуры выполнялся путем моделирования работы воздухонагревателя, изменяя длительность периода дутья в диапазоне 0,9-1,5 часа (54-90 мин). При этом изначально снижение длительности дутья приводит к повышению его температуры, затем достигая экстремума – снижается (рис. 1).

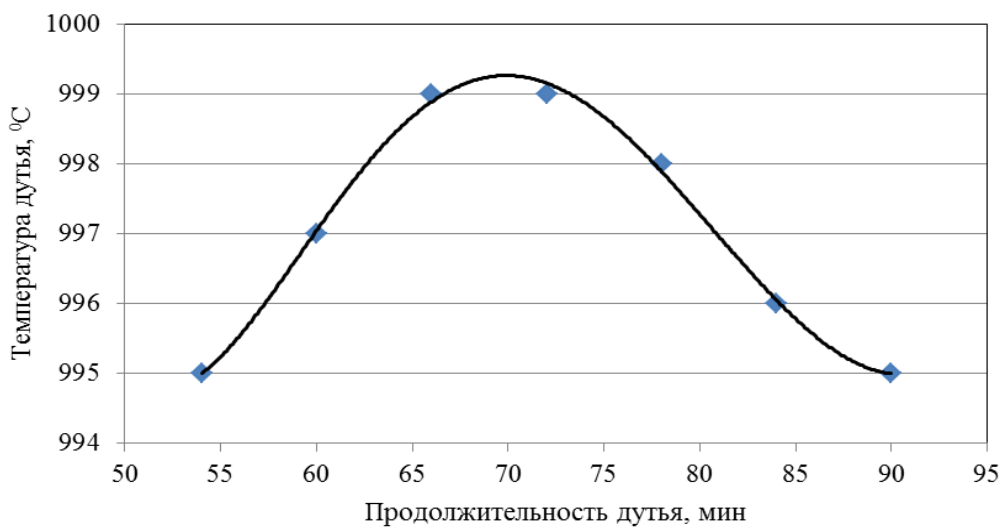


Рис. 1 – Влияние продолжительности периода дутья на его температуру при расходе доменного газа 25000 м³/ч

Такое изменение объясняется снижением эффективности нагрева при повышении длительности периода нагрева (зависящего от длительности периода дутья) и снижением количества с аккумулированной насадкой теплоты при снижении длительности периода нагрева. Таким образом, есть оптимальный режим, при котором насадка воспринимает максимальное количество теплоты, отнесенное к суммарному расходу дутья. Это подтверждается графиком изменения мощности воздухонагревателя (суммарной теплоты передаваемой воздуху за все время нагрева) от длительности дутья – см. рис. 2.

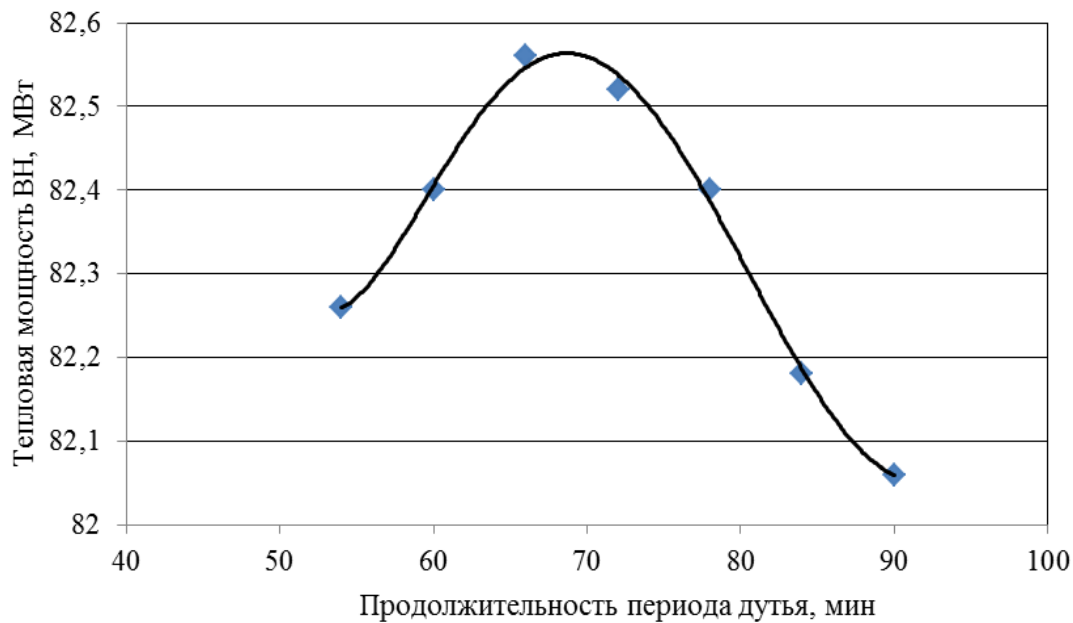


Рис. 2 – Влияние продолжительности периода дутья на мощность воздухонагревателя при расходе доменного газа 25000 м³/ч

При этом суммарные потери тепла с уходящими газами возрастают при повышении длительности периода дутья – см. рис. 3.

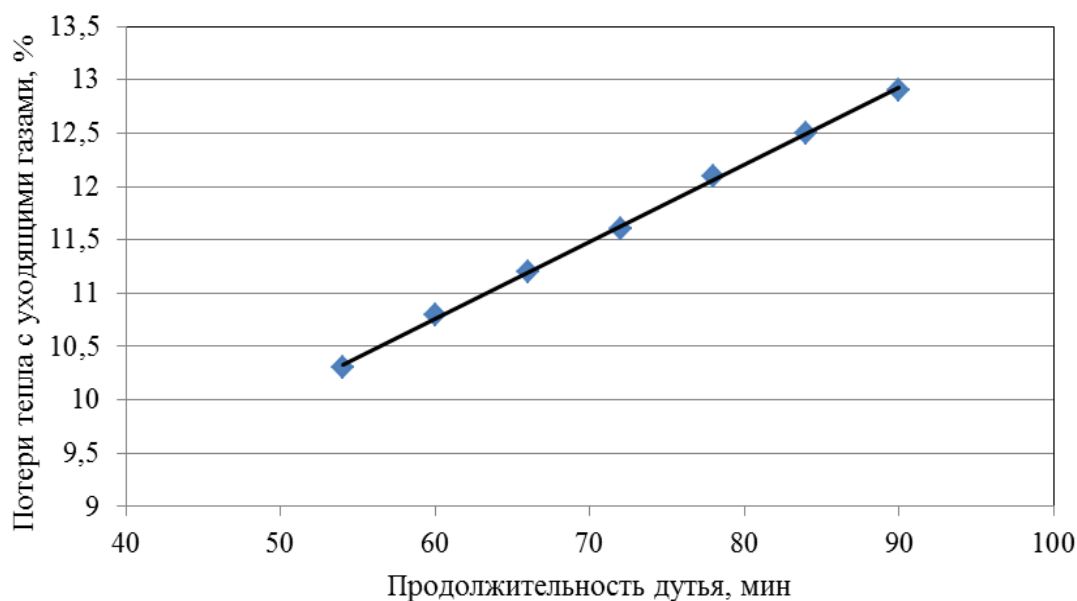


Рис. 3 – Влияние продолжительности периода дутья на потери тепла с уходящими газами при расходе доменного газа 25000 м³/ч

В ходе исследования влияния расхода доменного газа на параметры дутья осуществлялся поиск оптимальных режимов его работы при расходах доменного газа 26250 м³/ч, 27500 м³/ч, 28750 м³/ч, 29250 м³/ч, 30000 м³/ч, 32500 м³/ч (соответствует увеличению расхода от номинального на 5%, 10%, 15%, 17%, 20%, 30%). Была получена максимально возможная температура дутья ~ 1136°С. При этом продолжительность дутья снизилась до 39 мин (0,65 часа). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние расхода доменного газа на параметры дутья

Увеличение расхода д. г. от базового, %	Время дутья, мин	Максимальная температура дутья, °С	Мощность ВН, МВт	Потери с ух. газами, %	Относительное увеличение расхода д. г.
0	72	999	82,52	11,6	1
5	72	1027	85,31	12,6	1,05
10	66	1054	88,04	13,1	1,1
15	60	1078	90,48	13,7	1,15
17	60	1088	91,49	14	1,17
20	54	1101	92,85	14,1	1,2
30	39	1136	96,6	14,1	1,3

Зависимость температуры дутья от относительного увеличения расхода доменного газа представлена на рис. 4, где наглядно видно, что температура дутья увеличивается пропорционально увеличению расхода доменного газа.

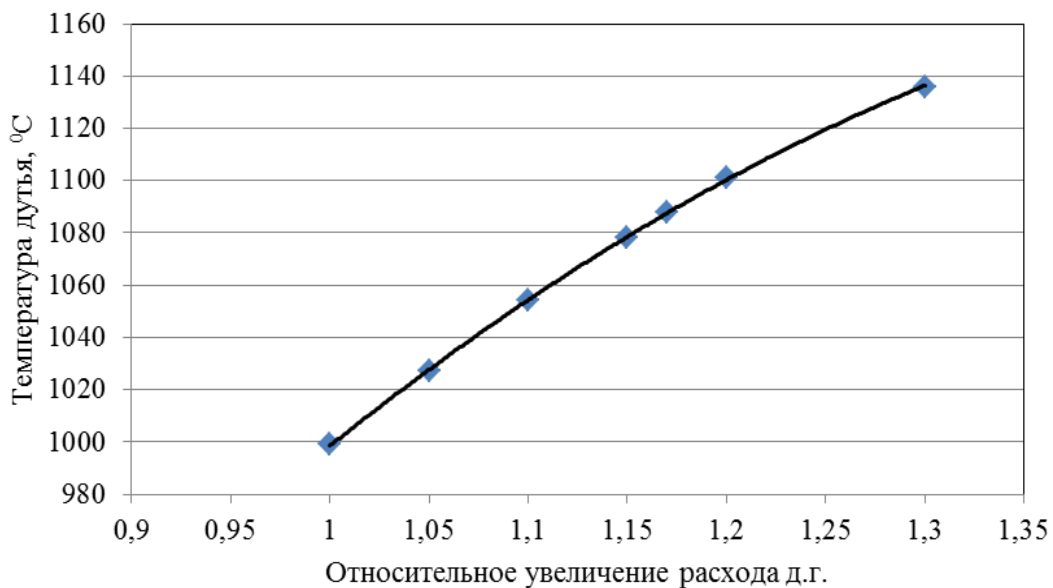


Рис. 4 – Влияние относительного увеличения расхода доменного газа на температуру дутья

Учитывая все выше сказанное, увеличение расхода доменного газа на нагрев воздухонагревателя позволяет получить повышение температуры дутья, но ограничивается следующими факторами:

- наличием резерва доменного газа на предприятии;
- чрезмерным снижением продолжительности дутья, которое становится соизмеримым со временем «перекидки» клапанов;
- пропускной способностью горелки;
- характеристиками вентилятора для подачи воздуха и дымососа.

Другой способ повышения температуры дутья, рассмотренный в данном исследовании, это изменение геометрических размеров насадки воздухонагревателя. Как известно, на тепловую работу воздухонагревателя сильно влияет площадь поверхности теплообмена, которая, в свою очередь, зависит от диаметра и количества отверстий в насадке.

Исследовались два стандартных шестигранных блока (ГОСТ 20961-75) с диаметрами отверстий 41 и 30 мм и количеством отверстий 12 и 27 штук, соответственно. Геометрические характеристики данных насадок приведены в табл. 2.

Таблица 2

Геометрические характеристики насадок воздухонагревателя

Геометрические характеристики насадки ВН	6-гранный блок с диаметром канала 41 мм	6-гранный блок с диаметром канала 30 мм	Насадка с квадратными ячейками 45×45 мм [7]
Гидравлический диаметр ячеек, мм	41	30	45
Относительное «живое» сечение насадки, %	33,5	31,6	28
Масса насадки, т	723,3	691,7	-
Удельная поверхность нагрева, м ² /м ³	32,7	50,1	24,85
Объем кирпича в 1м ³ насадки	0,66	0,62	0,72

Исследование влияния указанных геометрических параметров на тепловую работу воздухонагревателя проводилось при следующих постоянных режимных параметрах:

- расход топлива 25000 м³/ч;
- расход дутья 2600 м³/мин;
- высота насадки 35 м;
- топливо доменный газ (СН₄ = 0,01%; СО₂ = 17,02%; N₂ = 54,8%; СО = 24,68%; Н₂ = 3,47%)

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты моделирования тепловой работы доменного воздухонагревателя с изменением геометрических параметров насадки

Параметр	Базовый вариант				Исследуемый вариант			
Диаметр насадки, мм	41				30			
Кол-во отверстий, шт.	12				27			
Поверхность теплообмена, м ²	20181				30925			
Время дутья, мин	60	66	72	78	66	72	78	84
Максимальная тем-ра дутья, °С	997	999	999	997	1030	1032	1032	1031
Мощность ВН, МВт	82,40	82,56	82,52	82,40	80,60	80,70	80,74	80,63
Потери с ух. г., %	10,8	11,2	11,6	12,1	9,2	9,5	9,8	10,2

Как видно из представленных данных, уменьшение диаметра отверстий с 41 мм на 30 мм при одновременном увеличении их количества с 12 шт. до 27 шт. позволяет повысить температуру на 33°С (с 999°С до 1032°С). При этом продолжительность периода дутья будет увеличена на 6 мин. В связи с уменьшением объема твердого тела насадки, тепловая мощность, аккумулированная ею, также снижается. За счет увеличения площади теплообмена интенсифицируется отдача теплоты от дымовых газов к насадке и, следовательно, снижается их температура на выходе из воздухонагревателя и потери теплоты с ними.

Выводы

С помощью математической модели было проанализировано влияние геометрических размеров насадки воздухонагревателя и расхода топлива на температуру дутья.

Увеличение расхода доменного газа на 30% (с 25000 м³/ч до 32500 м³/ч) позволяет увеличить температуру дутья на 137°С (с 999°С до 1136°С). При этом увеличиваются потери тепла с уходящими газами на 2,6%.

Переход со стандартного 6-гранного блока с размером ячейки 41 мм (кол-во отверстий в блоке 12) на такой же блок с размером ячейки 30 мм (кол-во отверстий в блоке 27) позволяет повысить температуру на 33°С (с 999°С до 1032°С) за счет интенсификации теплообмена от дымовых газов к насадке и снижения потерь тепла с уходящими газами.

Список использованных источников:

1. Грес Л.П. Высокоэффективный нагрев дутья: монография / Л.П. Грес. – Днепропетровск : Пороги, 2008. – 492 с.
2. Грес Л.П. Энергосбережение при нагреве доменного дутья : монография / Л.П. Грес. – Днепропетровск : Пороги, 2004. – 209 с.
3. Койфман А.А. Повышение эффективности работы доменных воздухонагревателей путем увеличения давления газа-теплоносителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Койфман Алексей Александрович. – Мариуполь, 2016. – 165 с.
4. Грес Л.П. Теплообменники доменных печей / Л.П. Грес. – Днепропетровск : Пороги, 2012. – 491 с.
5. Оптимизация работы воздухонагревателей / Р. Стокман [и др.] // Сталь. – 2003. – № 2. – С. 18-21.
6. Хаджинов А.С. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздухонагревателя / А.С. Хаджинов, Е.А. Хаджинов, В.А. Тищенко // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 20. – С. 154-159. – (Серія: Технічні науки).
7. Авдеев В.А. Основы проектирования металлургических заводов : справочник / В.А. Авдеев, В.М. Друян, Б.И. Кудрин. – М. : Интернет Инжиниринг, 2002. – 462 с.

References:

1. Gres L.P. *Vysokoeffektivnyj nagrev dut'ja* [Highly effective blast heating]. Dnepropetrovks, Porogi Publ., 2008. 492 p. (Rus.)
2. Gres L.P. *Jenergoberezenie pri nagreve domennogo dut'ja* [Energy saving during blast-furnace heating]. Dnepropetrovks, Porogi Publ., 2004. 209 p. (Rus.)
3. Kojfman A.A. *Povyshenie jeffektivnosti raboty domennyh vozduhonagrevatelej putem uvelichenija davlenija gaza-teplonositelja*. Diss. kand. techn. nauk [Improving the efficiency of blast-furnace heaters by increasing the pressure of the heat carrier gas. Cand. tech. sci.diss.]. Mariupol, 2016. 165 p. (Rus.)
4. Gres L.P. *Teploobmenniki domennyh pechej* [Blast Furnace Heat Exchangers]. Dnepropetrovks, Porogi Publ., 2012. 491 p. (Rus.)
5. Stokman R. *Optimizacija raboty vozduhonagrevatelej* [Optimizing the operation of air heaters]. *Stal' – Steel*, 2003, no 2, pp. 18-21. (Rus.)
6. Hadjinov A.S., Hadjinov Y.A., Tishenko V.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoj raboty domennogo vozduhonagrevatelja* [Mathematical modeling of blast-stove functioning]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serii: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2010, vol. 20, pp. 154-159. (Rus.)
7. Avdeev V.A., Drujan V.M., Kudrin B.I. *Osnovy proektirovanija metallurgicheskikh zavodov* [Basics of design of metallurgical plants]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2002. 462 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 23.01.2018