

Список використаних джерел:

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.
2. Дюк В.А. Data Mining. Учебный курс / В.А. Дюк, А.Б. Самойленко. – СПб : Питер, 2001. – 368 с.
3. Мірошніченко В.І. Аналітичне визначення режиму охолодження листового прокату при застосуванні водоповітряної суміші / В.І. Мірошніченко // *Металургійна і гірничорудна промисловість* : Зб. наук. пр. – Дніпропетровськ : ООО «Укрметаллургинформ «НТА», 2011. – Вип. 6. – С. 35-37.
4. Мірошніченко В.І. Моделювання процесу охолодження листового прокату як складової об'єкта управління / В.І. Мірошніченко, О.І. Сімкін // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 232-236.

Bibliography:

1. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – M. : Vysshaya shkola, 2003. – 479 p. (Rus.)
2. Duke V.A. Data Mining. Training course / V.A. Duke, A.B. Samoilenko. – St. Petersburg : Piter, 2001. – 368 p. (Rus.)
3. Miroshnichenko V.I. Analytical determination mode cooling sheet products in the application of water-mix / V.I. Miroshnichenko // *Metallurgical and Mining Industry : Collection of scientific works*. – Dnepropetrovsk : ООО «Ukrmetallurhinform «NTA», 2011. – Issue 6 – P. 35-37. (Ukr.)
4. Miroshnichenko V.I. Simulation of cooling sheet products as part of the control object / V.I. Miroshnichenko, A.I. Simkin // *Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / SHEE «PSTU»*. – Mariupol, 2011. – Issue 22. – P. 232-236. (Ukr.)

Рецензент: В.О. Маслов

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 16.11.2015

УДК 669.162.23

© Койфман А.А.¹, Симкін А.І.²ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА
ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С НАГРЕВОМ НАСАДКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Выполнен сравнительный анализ известных методик определения временных параметров работы блока воздухонагревателей доменной печи. С использованием базы данных значений основных технологических параметров работы блока осуществлена настройка математической модели работы каждого из воздухонагревателей группы. Разработана методика определения основных параметров работы блока на основании требуемой температуры дутья. Показано, что при повышении давления в рабочем пространстве в течение периода нагрева насадки температура горячего дутья может быть увеличена за счет большего количества теплоты, усвоенной насадкой.

Ключевые слова: *нагрев доменного дутья, группа доменных воздухонагревателей, математическая модель, температура дутья, давление газа-теплоносителя, режим работы.*

¹ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, koifman@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, simkin@ukr.net

Койфман О.О., Сімкін О.І. Особливості визначення параметрів блоку повітрянагрівачів з нагрівом насадки під тиском. Виконано порівняльний аналіз відомих методів визначення часових параметрів роботи блоку повітрянагрівачів доменної печі. З використанням бази даних значень основних технологічних параметрів роботи блоку здійснена настройка математичної моделі роботи кожного з повітрянагрівачів групи. Розроблено методику визначення основних параметрів роботи блоку на підставі необхідної температури дуття. Показано, що при підвищенні тиску в робочому просторі протягом періоду нагріву насадки температура гарячого дуття може бути збільшена за рахунок більшої кількості теплоти, засвоєної насадкою.

Ключові слова: нагрів доменного дуття, група доменних повітрянагрівачів, математична модель, температура дуття, тиск газу-теплоносія, режим роботи.

O.O. Koifman, O.I. Simkin. Features of the definition of parameters of a block of hot blast stoves with heating of a checker under pressure. An issue of improvement of the effectiveness of the operation of a block of hot blast stoves of the blast furnace in order to rise the temperature of the blast-furnace air was considered. It was shown that an increase of the temperature of the blast-furnace air without the use of natural gas and oxygen for combustion is possible due to the changing of the operation modes of a block of hot blast stoves and at the increase of the pressure of the exchange gas. An analysis of the recent researches and publications describing the methods for determining the parameters of the operation of the block of hot blast stoves of the blast furnace was performed; their advantages and disadvantages were described. The goal of the research was set. A database of process parameters of the block was processed to determine the main characteristics of the operation of hot blast stoves of the blast furnace. Averaged values of the basic technical and design parameters were obtained; they characterize the operation of each hot blast stove of the block with the use of which the adjustment of a mathematical model of the operation of each of hot blast stove of the block was achieved. A method for determining the main unit operating parameters on the block on the account of the desired blast temperature was designed. The values of the duration of the cycle "heating + air blasting" depending on the set-point temperature of the smoke at various values of air blasting temperatures were determined for each hot blast stove of the block using a mathematical model. The authors suggested to use such dependencies to determine the temporal parameters of the operation of the block of hot blast stoves. The obtained values of the duration of heating periods and air blasting of each hot blast stove of the block should be corrected if the continuity of the air blast supply to the blast furnace is not ensured. The examples of the use of this technique were given and the obtained results were described. It is shown that an increase of the pressure in the operating space in the course of the heating period of the checker the temperature of the hot air blasting can be increased due to a larger amount of heat accumulated by the checker. As seen from the results of the research the set blast conditions of the blast furnace can be ensured with fewer hot blast stoves in the block due to the increase of the pressure.

Keywords: heating blast air, a group of blast stoves, mathematical model, the blast temperature, gas-coolant pressure, mode.

Постановка проблеми. Одним из самых известных методов интенсификации доменной плавки является увеличение температуры горячего дутья, что является одним из самых действенных факторов по снижению расхода кокса. Физическое тепло, поступающее в доменную печь с дутьем, заменяет тепло, которое выделяется при сжигании кокса. Тепло дутья практически полностью используется на прямое восстановление элементов, перевод серы в шлак и нагрев чугуна и шлака, в то время как часть тепла при сжигании кокса уносится с образовавшимися при его горении газами. Уменьшение расхода кокса, в свою очередь, снижает количество формирующегося шлака за счет уменьшения количества золы кокса и расхода флюса на ее ошлакование. При снижении количества шлака уменьшается расход тепла на его формирование и нагрев.

В настоящее время период эксплуатации большинства воздухонагревателей доменных печей (далее – ВН) металлургических предприятий Украины превышает межремонтный срок службы. Это объясняется тем, что при проведении ремонтов доменных печей воздухонагревателям не уделяют должного внимания [1].

В связи с дефицитом и высокой стоимостью природного газа основным путем повышения температуры дутья является оптимизация режимов работы группы воздухонагревателей. При этом в составе группы могут эксплуатироваться воздухонагреватели с различными техническими характеристиками и степенью износа элементов их конструкций.

Увеличение температуры доменного дутья и изменение режимов работы воздухонагревателей без использования природного газа и кислорода для горения возможно в случае наличия хотя бы небольшого резерва доменного газа, который можно использовать для интенсификации нагрева насадки, используя повышение давления газа-теплоносителя [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Для нахождения оптимального времени дутьевого периода по критерию максимума теплоусвоения дутьем в [3, 4] предложено выражение, исходя из теплового баланса воздухонагревателя. Расчет по предложенному выражению довольно прост, т.к. все входящие в формулы величины легко определяются по эксплуатационным данным воздухонагревателей. При этом при сведении баланса в статье прихода не учитывается физическая теплота компонентов горения. Грес Л.П. [5] предложил методику расчета оптимального по теплоусвоению дутьем режима работы блока воздухонагревателей при отличных от нуля температурах газа и воздуха. Приведенная методика наиболее просто реализуется для блока воздухонагревателей, имеющих одинаковые или близкие теплотехнические характеристики.

Малкин В.М. [6, 7] предлагает методику выбора режима работы блока воздухонагревателей (последовательный, попарно-параллельный, режим работы со смещением в дутьевой период), при котором в среднем за период дутья удовлетворяется условие постоянства тепла, поступающего в доменную печь. Методика основана на следующих допущениях: воздухонагреватели в блоке считаются одинаковыми, теплоемкость дутья постоянна и равна средней, расход дутья через воздухонагреватель постоянный.

Соломенцев С.Л. [8, 9] предложил упрощенный метод оптимизации режима работы блока доменных воздухонагревателей, учитывающий их индивидуальные особенности. В соответствии с этим методом, каждый воздухонагреватель в блоке временно переводится на последовательный режим работы без смесителя. При этом через определенные промежутки времени контролируются температура купола, отходящих газов, дутья и расходы газовых сред. Используемый воздухонагреватель снимается с дутья и ставится на нагрев при снижении температуры дутья до заданного минимального значения. Нагрев производится при максимальном возможном расходе газа с учетом полноты его сгорания, а также с фиксацией номинальных значений температуры купола и отходящих газов. Результаты экспериментов представляются в виде средней зависимости температуры дутья от времени. На основании предложенной методики выбирается минимальная продолжительность периода дутья, исходя из условий удобства обслуживания воздухонагревателя, что определяет максимальную температуру дутья. Данный метод применим для смешанного режима работы блока воздухонагревателей.

Целью данной работы является разработка методики определения параметров работы блока воздухонагревателей, в том числе и работающих под давлением в период нагрева насадки.

Изложение основного материала. Авторами в рамках НИР «Обследование состояния блока воздухонагревателей доменной печи и оптимизация его режимов работы» в 2012 г. было проведено обследование блока воздухонагревателей (далее БВН) одной из доменных печей металлургического комбината «Азовсталь».

Блок воздухонагревателей включал 5 воздухонагревателей (далее ВН №1 - ВН №5), причем их состояние и технические характеристики существенно отличались.

На момент обследования ВН №5 находился на капитальном ремонте, ВН №1, ВН №3 и ВН №4 - в удовлетворительном состоянии, а ВН №2 – в неудовлетворительном. В связи с возникшей ситуацией блок воздухонагревателей функционирует в последовательном режиме, причем этот режим поддерживается последовательной работой воздухонагревателей ВН №1 и ВН №4, находящихся в удовлетворительном состоянии, и одновременной (параллельной) рабо-

той воздухонагревателя ВН №3 и «слабого» воздухонагревателя ВН №2.

Во время обследования оценивались значения основных технологических параметров работы воздухонагревателей, текущие производственные ситуации и действия технологического персонала в этих ситуациях, продолжительности периодов нагрева насадки и дутьевого периода, продолжительность переключения воздухонагревателе с режима на режим и пр. Информация по каждому из работающих воздухонагревателей накапливалась. Значения технологических параметров по периодам нагрева и дутья сравнивались для различных периодов, как для каждого воздухонагревателя, так и между разными воздухонагревателями блока.

Заданная температура купола обеспечивалась изменением расхода топлива при постоянном расходе воздуха, т.к. регулирование расхода подаваемого на горение воздуха было невозможно по техническим причинам (отсутствие соответствующих средств контроля и регулирования). Заборы воздуха напорных вентиляторов горелок воздухонагревателей, у которых пропускная способность насадки снижена, были частично перекрыты (от 50% до 75% площади заборных отверстий). Непрерывный контроль калорийности доменного газа отсутствовал, 2 раза в сутки производилось измерение калорийности (750 - 820 ккал/м³).

Паспортная производительность горелок всех воздухонагревателей блока одинакова (48000 м³/ч). При этом на ВН №2 максимальный расход газа – 18000 м³/ч, на воздухонагревателе ВН №3 – 40000 м³/ч.

Были обработаны базы технологических параметров по воздухонагревателям за период с сентября 2010 г. по март 2011 г. Из обработки исключены периоды, которые были значительно меньше или больше средней длительности периодов, а также периоды, для которых значения технологических параметров не соответствует рабочему диапазону.

В табл. 1 представлено распределение количества периодов нагрева насадки и дутья в зависимости от длительности периода. Для периода нагрева насадки наибольшее количество периодов относится к диапазону от 3 до 4 часов, а для периодов нагрева дутья - от 2 до 3 часов.

Таблица 1

Оценка временных параметров работы блока в рассматриваемый период

Длительность периода, мин	Количество обработанных периодов (значимых)			
	ВН №1	ВН №2	ВН №3	ВН №4
Нагрева насадки				
От 121 до 180	50	49	25	19
От 181 до 240	505	470	293	308
Более 241	98	156	144	121
Нагрева дутья				
До 120	25	71	64	86
От 121 до 180	387	522	253	461
От 181 до 240	109	71	98	74

Технические и расчетные параметры воздухонагревателей блока в рассматриваемый период приведены в табл. 2.

Таблица 2

Техническая характеристика и эксплуатационные параметры работы воздухонагревателей

Параметр	Единица измерения	Номер воздухонагревателя			
		ВН №1	ВН №2	ВН №3	ВН №4
Высота насадки	м	38,826	38,826	38,731	35,354
Диаметр насадки	м	7,8	7,8	7,8	7,8
Площадь сечения насадки	м ²	47,78	47,78	47,78	47,78
Диаметр ячейки насадки	м	0,04	0,04	0,04	0,04
Порозность насадки	м ³ /м ³	0,376	0,376	0,376	0,376
Номинальная производительность горелок	кг/м ³	48000	48000	48000	48000
Средний расход доменного газа	м ³ /ч	40405	17473	40275	51816

Продолжение таблицы 2

Средняя температура дыма после окончания периода нагрева	°С	387	374	391	387
Средняя температура купола после окончания периода нагрева	°С	1297	1190	1276	1274
Время нагрева насадки	с	12948	13215	13668	13601
Температура холодного дутья	°С	100	100	100	100
Средняя температура купола после окончания периода дутья	°С	1243	1134	1189	1203
Время дутья	с	7257	8939	9349	8818
Заданная температура дутья	°С	980	980	980	980
Расход дутья	м ³ /мин	2500	967,5	1532,5	2500

Ранее авторами была разработана математическая модель оценки теплового состояния насадки доменного воздуходувателя, работающего в различных режимах [10] (далее – модель), учитывающая как конвективный теплообмен, так и радиационный.

Модель основана на решении общей задачи теплообмена в насадке при неравномерном начальном распределении температуры по высоте насадки и различной температуре газа-теплоносителя на входе в насадку.

С целью дальнейшего исследования режимов работы БВН модель была адаптирована к производственным условиям с помощью настроечных коэффициентов, которые позволяют учесть текущее состояние воздуходувателей, в первую очередь – регенеративной насадки.

В качестве исходных данных для моделирования использовались параметры воздуходувателей, приведенные в табл. 2.

На графиках (рис. 1) представлены результаты моделирования на примере ВН №1.

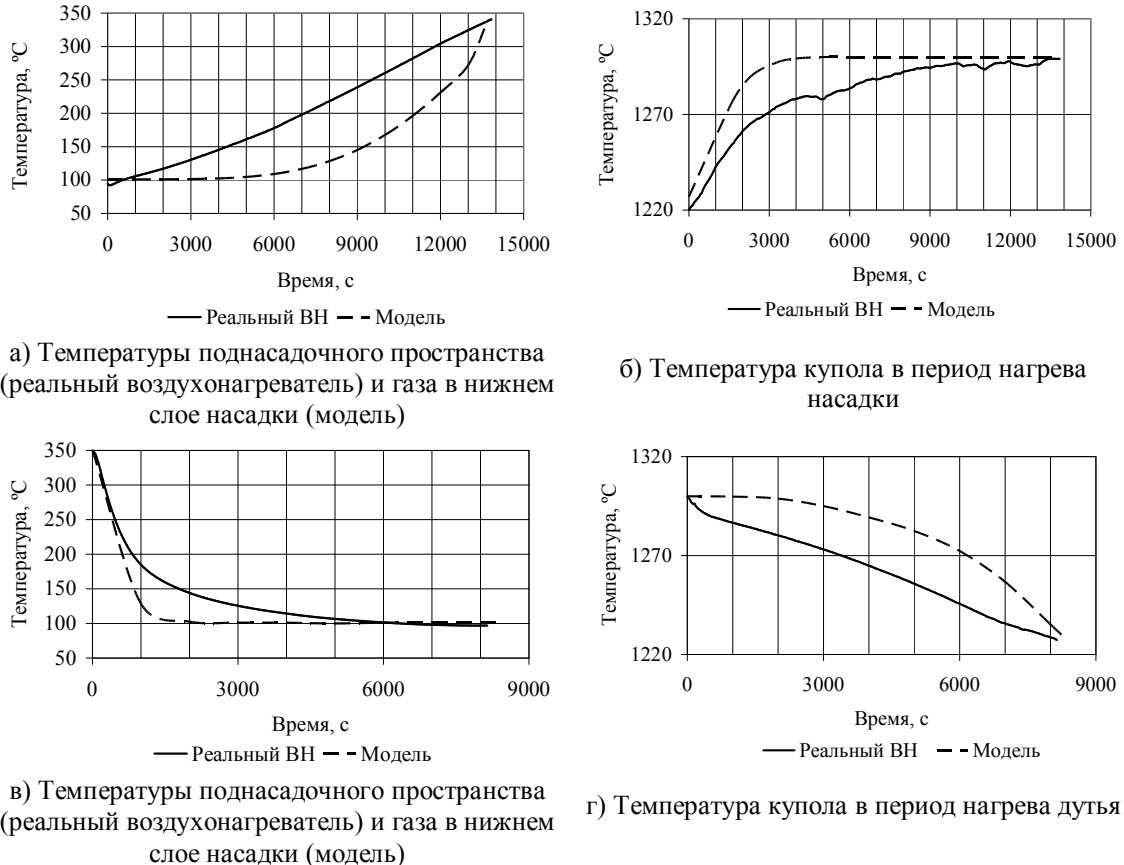


Рис. 1 – Сравнение работы реального воздуходувателя и результатов моделирования: а, б – период нагрева; в, г – период дутья

Как видно из графиков, результаты моделирования соответствуют заводским данным. Следует заметить, что температура отходящих газов (рис.1, а) в период нагрева измеряется в поднасадочном пространстве и, естественно, не соответствуют температуре газа в нижнем слое насадки.

Для оценки правильности функционирования модели одновременно производился расчет теплового баланса в соответствии с методикой [11]. Данные (табл. 3) свидетельствуют о том, что отдельные статьи баланса представляют собой числа одинакового порядка и отличаются в диапазоне от 1 до 8%.

Таблица 3

Тепловой баланс реального воздухонагревателя и результатов моделирования

Параметр	Реальный ВН	Модель	Отклонение
Период нагрева насадки			
Исходная теплота в насадке	$9,76 \cdot 10^{11}$	$1,01 \cdot 10^{12}$	4%
Теплота в насадке после нагрева	$1,40 \cdot 10^{12}$	$1,47 \cdot 10^{12}$	5%
Теплота, накопленная насадкой	$4,22 \cdot 10^{11}$	$4,57 \cdot 10^{11}$	8%
Теплота, внесенная газом-теплоносителем	$6,08 \cdot 10^{11}$	$6,28 \cdot 10^{11}$	3%
Теплота, унесенная с дымовыми газами	$1,96 \cdot 10^{11}$	$2,11 \cdot 10^{11}$	8%
Теплота, отданная газами насадке	$4,12 \cdot 10^{11}$	$4,17 \cdot 10^{11}$	1%
Период нагрева дутья			
Тепло, переданное от насадки доменному дутью	$4,40 \cdot 10^{11}$	$4,57 \cdot 10^{11}$	4%

Используя данные табл. 2, для каждого воздухонагревателя блока с помощью математической модели определены значения продолжительности цикла «нагрев + дутье» в зависимости от заданного значения температуры дыма при различных заданных значениях температурах дутья. Результаты расчетов в виде графиков приведены на рисунках 2 и 3.

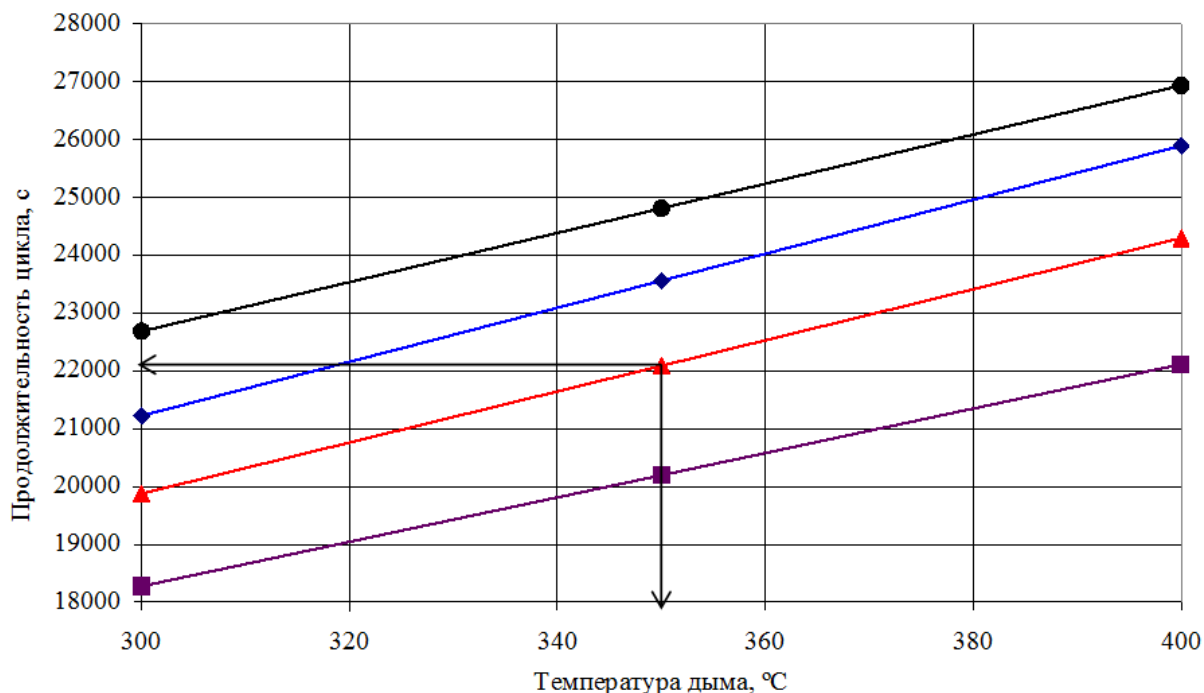


Рис. 2 – Зависимости продолжительности цикла «нагрев+дутье» от температуры дыма при различных заданных значениях температуры дутья для ВН№1: ● – $T_{дуть} = 1190^\circ\text{C}$; ◆ – $T_{дуть} = 1210^\circ\text{C}$; ▲ – $T_{дуть} = 1230^\circ\text{C}$; ■ – $T_{дуть} = 1250^\circ\text{C}$

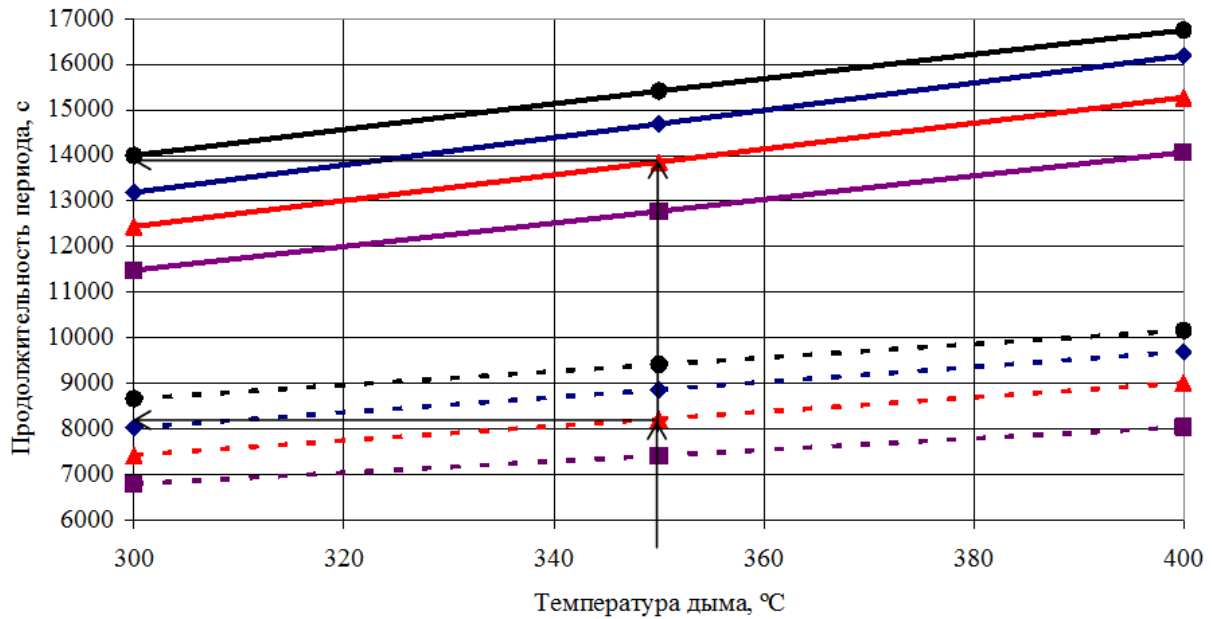


Рис. 3 – Зависимости продолжительности периодов нагрева насадки и нагрева дутья от температуры дыма при различных заданных значениях температуры дутья для ВН№1: ● – нагрев $T_{\text{дуть}} = 1190^{\circ}\text{C}$; ●• – дутье $T_{\text{дуть}} = 1190^{\circ}\text{C}$; ◆ – нагрев $T_{\text{дуть}} = 1210^{\circ}\text{C}$; ◆• – дутье $T_{\text{дуть}} = 1210^{\circ}\text{C}$; ▲ – нагрев $T_{\text{дуть}} = 1230^{\circ}\text{C}$; ▲• – дутье $T_{\text{дуть}} = 1230^{\circ}\text{C}$; ■ – нагрев $T_{\text{дуть}} = 1250^{\circ}\text{C}$; ■• – дутье $T_{\text{дуть}} = 1250^{\circ}\text{C}$

Задаваясь требуемым значением температуры горячего дутья на выходе из воздухонагревателя (рис. 2, 3), определяем продолжительности цикла, периодов нагрева насадки и нагрева дутья, ориентируясь на заданное значение температуры дымовых газов в период нагрева, при котором воздухонагреватель переключается в режим «дутье». Например, для получения дутья с температурой 1230°C выбираем продолжительность цикла 22000 с при заданной температуре дыма 350°C .

Аналогичные зависимости определены для каждого из ВН группы. В результате формируем режимную карту блока воздухонагревателей (рис. 4), работающего в последовательном режиме.

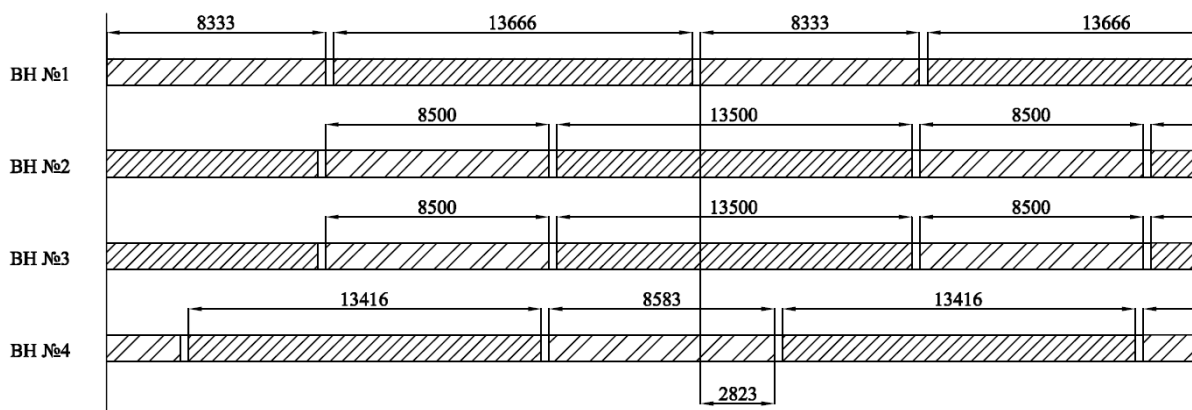


Рис. 4 – Режимная карта БВН: ▨ – нагрев насадки, ▩ – нагрев дутья, □ – переключение

Как видно из рис. 4, в данном случае карта не удовлетворяет принципу непрерывности подачи доменного дутья в доменную печь: для ВН №1 и 4 периоды нагрева дутья перекры-

ваються на 2823 с.

Для обеспечения непрерывности подачи дутья необходимо скорректировать продолжительность периода нагрева насадки каждого воздухонагревателя на величину перекрытия при условии сохранения количества теплоты, получаемой соответствующей насадкой (рис. 5). Это достигается за счет снижения текущего расхода доменного газа.

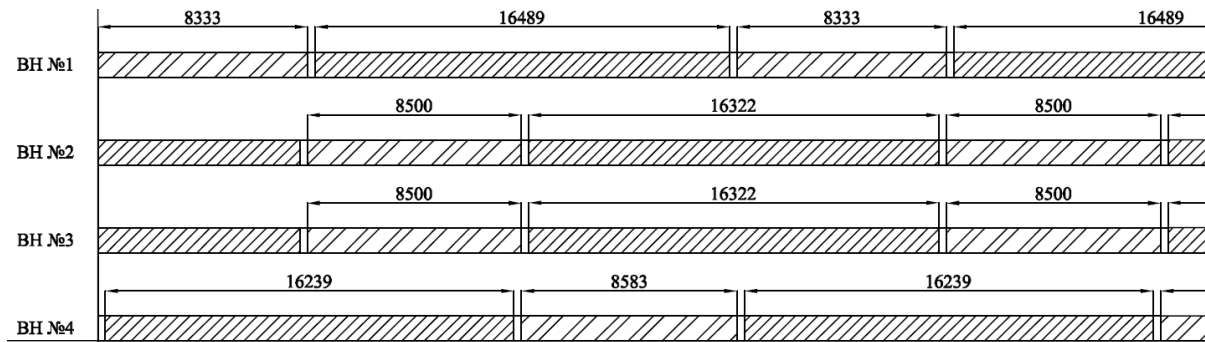


Рис. 5 – Скорректированная режимная карта БВН: – нагрев насадки, – нагрев дутья, – переключение

Если режимная карта удовлетворяет принципу непрерывности подачи дутья, корректировки периодов нагрева дутья не требуется.

В табл. 4 приведены данные, полученные по вышеописанной методике, для девяти режимных карт, отличающихся избыточным давлением в рабочем пространстве воздухонагревателя в период нагрева насадки, количеством воздухонагревателей в группе, температурой горячего дутья. Режимные карты 3-9 составлены на 3 воздухонагревателя, т.к. воздухонагреватель №2 не может обеспечить задаваемую температуру дутья.

Таблица 4

Сводная таблица режимов блока воздухонагревателей

Номер режимной карты	Количество ВН в блоке	Номер воздухонагревателя	Избыточное давление в воздухонагревателе в период нагрева, кПа	Заданные значения			Температура дутья, поступающего в доменную печь, °С	Параметры цикла «Нагрев-Дутье»			Расход		Объем израсходованного доменного газа за сутки, $\times 10^5 \text{ м}^3$	Объем дутья за сутки, $\times 10^5 \text{ м}^3$	Изменение суточного потребления газа, %
				Температура купола в период нагрева, °С	Температура дыма в период нагрева, °С	Температура дутья в конце режима дутья, °С		Время нагрева, с	Время дутья, с	Среднее количество переключений за сутки	Доменного газа, $\text{м}^3/\text{с}$	Дутья, $\text{м}^3/\text{мин}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	4	1	0	1300	300	1200	980	16489	8333	7	36937	2500	18	36	-
		2		1195	340	1150		16322	8500		15695	967,5			
		3		1295	365	1230		16322	8500		30311	1532,5			
		4		1300	375	1210		16239	8583		39471	2500			
2	4	1	0	1300	300	1220	990	14900	7750	7,75	38507	2500	17,4	36	-3
		2		1195	400	1175		15150	7500		16172	967,5			
		3		1295	350	1235		13150	9500		33207	1532,5			
		4		1300	400	1240		14650	8000		41502	2500			
3	3	1	0	1300	300	1250	992	11650	6750	9	44099	2500	18,4	36	+2
		3		1295	400	1250		13150	5250		31432	2500			
		4		1300	300	1230		11400	7000		45965	2500			

Продолжение таблицы 4

4	3	1	25	1300	300	1250	996	11316	6250	9,7	33802	2500	16,5	36	-8
		3		1295	400	1250		12400	5166		25806	2500			
		4		1300	300	1230		10816	6750		36612	2500			
5	3	1	25	1300	320	1250	1000	11166	6500	10,7	35935	2500	18,8	36	+2
		3		1295	400	1250		12500	5167		25600	2500			
		4		1300	340	1250		11066	6600		36436	2500			
6	3	1	25	1300	300	1270	1011	8800	5250	11,7	37926	2500	18,0	36	0
		3		1295	400	1270		9850	4200		27939	2500			
		4		1300	340	1270		8850	5200		37966	2500			
7	3	1	25	1300	310	1280	1015	7600	4500	14,7	39079	2500	19,6	36	+9
		3		1295	400	1280		8500	3600		27733	2500			
		4		1300	357,5	1280		7500	4600		40747	2500			
8	3	1	50	1300	300	1280	1021	6600	4100	15,3	34091	2500	20,0	36	+11
		3		1295	390	1280		7600	3100		23860	2500			
		4		1300	340	1280		6600	4100		34667	2500			
9	3	1	50	1300	300	1285	1023	5800	3700	17,0	35690	2500	20,5	36	+14
		3		1295	400	1285		6700	2800		25313	2500			
		4		1300	300	1285		5900	3600		34983	2500			

При разработке режимов продолжительность переключения воздухонагревателя с одного режима на другой принята 300 с.

Выборочное описание режимных параметров (табл. 4):

1. Режимная карта №1. Режимная карта для существующего блока ВН, обеспечивающих температуру дутья 980°C. Продолжительность цикла составляет 25066 с.
2. Режимная карта №2. Обеспечивается подъем температуры дутья на 10°C при условии снижения потребления доменного газа блоком в сутки на 3% по сравнению с режимом №1. Продолжительность цикла 22650 с.
3. Режимная карта №3. Обеспечивается температура дутья 992°C при условии повышения потребления доменного газа блоком в сутки на 2% по сравнению с режимом №1. Продолжительность цикла 18400 с.
4. Режимная карта №4. Избыточное давление газа-теплоносителя 0,25кПа. Обеспечивается температура дутья 996°C при условии снижения потребления доменного газа блоком в сутки на 8% по сравнению с режимом №1. Продолжительность цикла 17566 с.
5. Режимная карта №7. Избыточное давление газа-теплоносителя 0,25кПа. Обеспечивается температура дутья 1015°C при условии повышения потребления доменного газа блоком в сутки на 9% по сравнению с режимом №1. Продолжительность цикла 12100 с.
6. Режимная карта №9. Избыточное давление газа-теплоносителя 0,5кПа. Обеспечивается температура дутья 1023°C при условии повышения потребления доменного газа блоком в сутки на 14% по сравнению с режимом №1. Продолжительность цикла 9500 с.

Полученные значения продолжительности цикла необходимо увеличить на период времени, необходимый для переключения воздухонагревателей с одного режима на другой.

Как видно из данных табл. 4, часть полученных режимных карт не являются оптимальными с точки зрения суточного потребления доменного газа.

Вместе с тем, результаты расчетов показывают целесообразность повышения давления газа-теплоносителя в периоде нагрева насадки.

Выводы

1. Разработана методика определения основных параметров работы блока на основании требуемой температуры дутья, отличающаяся от известных методик возможностью учитывать техническое состояние воздухонагревателей блока.

2. Показано, что при повышении давления в рабочем пространстве воздухонагревателя в течение периода нагрева насадки температура горячего дутья может быть увеличена за счет большего количества теплоты, усвоенной насадкой.

3. Повышение давления газа-теплоносителя на 25 кПа дает возможность повысить тем-

пературу дутья на 35°C, вывести один воздухонагреватель из блока, повысить производительность доменной печи на 0,9% и снизить расход кокса на 0,9% [12].

4. Повышение давления на 50 кПа дает возможность повысить температуру дутья на 45°C, повысить производительность доменной печи на 1,2% и снизить расход кокса на 1,2% [12].

Список использованных источников:

1. Информационный ресурс : <http://metallurgprom.org/?cat=18>.
2. Пат. 88584 Україна, МПК С 21 В 9/14. Спосіб нагрівання насадки регенеративного теплообмінника / О.О. Койфман, О.А. Томаш, О.І. Сімкін, І.А. Нікош, Д.А. Лівшиц, О.А. Третьяков, О.Б. Ковура, Ю.А. Зінченко, М.Я. Васькевич; ВАТ «МК «Азовсталь», Приазов. держ. техн. ун-т. – № а200811670; заявл. 30.09.08; опубл. 26.10.09, Бюл. № 20.
3. Грес Л.П. Теплообменники доменных печей / Л.П. Грес, С.А. Карпенко, А.Е. Миленина. – Днепропетровск : Пороги, 2012. – 491 с.
4. Оптимальный тепловой режим работы воздухонагревателей доменных печей / И.М. Лобов, [и др.] // Сталь. – 1962. – № 8. – С. 695-696.
5. Грес Л.П. Оптимизация периодов работы воздухонагревателей доменных печей / Л.П. Грес, А.Е. Миленина, Ю.М. Флейшман // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2008. – № 3Е(14). – С. 40-42.
6. Тепловой расчет доменных воздухонагревателей для различных режимов их работы. Сообщение 1 / В.М. Малкин, Б.Б. Вегнер, Ф.Р. Шкляр, В.Л. Советкин // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1981. – № 12. – С. 83-86.
7. Тепловой расчет доменных воздухонагревателей для различных режимов их работы. Сообщение 2 / В.М. Малкин, Б.Б. Вегнер, Ф.Р. Шкляр, В.Л. Советкин // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1982. – № 2. – С. 94-96.
8. Соломенцев С.Л. Рациональные типы насадок и доменных воздухонагревателей / С.Л. Соломенцев. – Липецк : ЛГТУ, 2001. – 432 с.
9. Упрощенный метод оптимизации режимов работы блока доменных воздухонагревателей / С.Л. Соломенцев [и др.] // Сталь. – 1986. – № 5. – С. 16-18.
10. Койфман А.А. Моделирование нагрева насадки доменного воздухонагревателя, работающего под давлением / А.А. Койфман, А.И. Симкин, А.А. Томаш // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2009. – Вип. 19. – С. 203-206.
11. Койфман А.А. Тепловой баланс регенеративного теплообменника, работающего под давлением / А.А. Койфман, А.И. Симкин, А.А. Томаш // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – Ч. 2. – С. 141-144.
12. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы / И.Г. Товаровский. – Днепропетровск : Пороги, 2003. – 597 с.

Bibliography:

1. Information resourcec : <http://metallurgprom.org/?cat=18>.
2. Pat. 88584 Ukraine, Int. Cl. C 21 B 9/14. Mode of heating of checker of regenerative heat exchanger / O.O. Koifman, O.A. Tomash, O.I. Simkin, I.A. Nikosh, D.A. Livshits, O.A. Tretyakov, O.B. Kovura, Y.A. Zinchenko, M.Y. Vaskevich; PJSC «Azovstal Iron and Steel Works», Priazovskyi state technical university. – № а200811670; filed 30.09.08; pub. date 26.10.09, Bulletin № 20. (Ukr.)
3. Gres L.P. Heat exchangers of blast furnaces / L.P. Gres, S.A. Karpenko, A.E. Milenina. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2012. – 491 p. (Rus.)
4. Optimal heating mode of operation of hot blast stoves of blast furnaces / I.M. Lobov [et al.] // Steel. – 1962. – № 8. – P. 695-696. (Rus.)
5. Gres L.P. Optimization of operational periods of hot blast stoves of blast furnaces / L.P. Gres, A.E. Milenina, Y.M. Fleyshman // Reporter of Donbass State Machine Building Academy. – 2008. – № 3Е(14). – P. 40-42. (Rus.)
6. Thermal calculation of hot blast stoves for their verious modes of operation. Massage 1 / V.M. Malkin, B.B. Vegner, F.R. Shklyar, V.L. Sovetkin // News of Higher Educational Institu-

- tions. Iron and Steel Industry. – 1981. – № 12. – P. 83-86. (Rus.)
7. Thermal calculation of hot blast stoves for their various modes of operation. Massage 1 / V.M. Malkin, B.B. Vegner, F.R. Shklyar, V.L. Sovetkin // News of Higher Educational Institutions. Iron and Steel Industry. – 1982. – № 2. – P. 94-96. (Rus.)
 8. Solomentsev S.L. Rational types of checkers and hot blast stoves / S.L. Solomentsev. – Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2001. – 432 p. (Rus.)
 9. Simplified method of optimization of operating modes of block of hot blast stoves / S.L. Solomentsev [et al.] //Steel. – 1986. – № 5. – P. 16-18. (Rus.)
 10. Koifman A.A. Modeling of heating of checker of hot blast stove operating under pressure / A.A. Koifman, A.I. Simkin, A.A. Tomash // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2009. – Issue 19. – P. 203-206. (Rus.)
 11. Koifman A.A. Thermal balance of regenerative heat exchanger operating under pressure / A.A. Koifman, A.I. Simkin, A.A. Tomash // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / PSTU. – Mariupol, 2008. – Issue 18. – Part 2. – P. 141-144. (Rus.)
 12. Tovarovskyi I.G. Blast-furnace smelting. Evolution, process operation, challenges and opportunities / I.G. Tovarovskyi. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2003. – 597 p. (Rus.)

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

Статья поступила 23.11.2015