

in the column of charge materials and the full use of chemical and thermal energy of gases. Studies of existing blast distribution systems have shown the reasons for their inoperability. This was because the measuring equipment, the control devices and the actuators do not withstand high temperatures. As a solution to this problem, it was proposed to add carbon fiber in the development of the actuators that will significantly reduce the abrasive wear and increase the resistance to high temperatures.

A system of automatic control of the blast distribution for each tuyere separately was also developed. The airflow in the system is measured with Venturi tubes using a variable differential method. Regulation in the system is carried out by means of a carbon fiber-reinforced butterfly valve installed in the fixed knee of the tuyere device behind Venturi tube. In the environment of object-oriented programming, special software for controlling the process of the blast distribution through the tuyeres, its uniform distribution and redistribution between all tuyeres, with the option to set the total flow rate and the flow rate for a single tuyere was developed.

Using the developed system of automatic distribution of blast by tuyeres will ensure a uniform supply of blast to the furnace of the blast furnace through separate tuyeres, which will increase the productivity of the furnace itself while reducing coke consumption.

Keywords: *automatic blast distribution system, ABDS, blast furnace, control, regulation, tuyere, blast, model, controller, Venturi, moth valve*

Рецензент: доц., к.т.н., Кравченко В.П.

Статья поступила 14.11.2019

УДК 669.162.23/25-52

Койфман А.А., Король М.О., Симкин А.И.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ НАСАДКИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ВОЗДУХЕ ГОРЕНИЯ

Температура доменного дутья в значительной степени определяется температурой под куполом воздухонагревателей. Исследовано влияние содержания кислорода в обогащенном воздухе, идущего на горение в горелке воздухонагревателя доменной печи, на повышение температуры купола, а, следовательно, и повышение температуры горячего дутья. Приведены основные формулы расчета горения при обогащении в общем виде. С увеличением содержания кислорода в обогащенном воздухе растет температура горения газа и при этом уменьшается количество продуктов горения, что непосредственно повлияет на скорость нагрева купола и насадки. Для компенсации снижения теплообмена в насадке необходимо увеличивать расход доменного газа. При повышении содержания кислорода в воздухе горения с 21 до 50% наблюдается повышение калориметрической температуры горения доменного газа с 1451 до 1821°C, а температуры горения - с 1306 до 1639°C.

С использованием архивной базы данных за 7 месяцев системы автоматического управления блока доменных воздухонагревателей металлургического комбината был проведен расчет основных показателей работы блока с повышенным содержанием кислорода в воздухе горения. Повышение содержания кислорода с 21 до 30% может увеличить температуру дутья на 100 °С, что позволит снизить расход кокса и повысить производительность работы доменной печи.

Разработана система автоматического управления температурой купола воздухонагревателя с возможностью регулирования содержания кислорода в воздухе горения. Использование предложенной системы даст возможность более гибко

регулировать температуру купола за счет изменения содержания кислорода воздухе горения и расхода доменного газа.

Ключевые слова: *воздухонагреватель, доменный газ, кислород, обогащение кислородом, температура купола, температура дутья, управление*

Постановка проблемы.

При нагреве насадки воздухонагревателей особо важное значение имеет надежность контроля и регулирования температуры купола для обеспечения экономичности и стойкости воздухонагревателей. Температура доменного дутья в значительной степени определяется температурой под куполом воздухонагревателей. Для обеспечения заданной температуры под куполом обычно доменный газ обогащают природным или коксовым газом. Но в настоящее время стала актуальной проблема рационального использования топлива в связи с его высокой стоимостью. Поэтому добавка природного газа к доменному ограничена его дефицитом и стоимостью. Давление коксового газа является недостаточным и для его повышения необходимо строить дорогие и громоздкие газоповысительные станции. Кроме того, на современном этапе эксплуатации доменных печей Украины в связи с внедрением вдувания пылеугольного топлива вместо дорогостоящего природного газа наблюдается снижение калорийности доменного газа, что в свою очередь снижает температуру купола.

Анализ последних достижений и публикаций.

Одним из известных путей увеличения температуры горения является подогрев газа и воздуха, идущих на горение, за счет температуры отходящих газов [1], что в свою очередь позволяет интенсифицировать процесс сжигания топлива и дает повысить тепловую мощность воздухонагревателя. Применение данного способа на существующем блоке воздухонагревателей затруднительно, т.к. в большинстве случаев отсутствует необходимое пространство для установки регенераторов.

В [2] приводится способ обогащения воздуха горения технологическим кислородом до 26%, что позволяет повысить температуру сгорания доменного газа для обеспечения заданной температуры под куполом воздухонагревателя. С другой стороны, в связи со снижением количества азота в обогащенном воздухе горения, уменьшается расход продуктов сгорания.

В качестве альтернативы использования природного газа для повышения теплотворной способности доменного газа кислородом обогащают воздух для горения, используемый в печных горелках. Обычно уровни обогащения, необходимые для уменьшения или исключения необходимости в дополнительных высококалорийных топливах, таковы, что конечное содержание кислорода в окислителе в воздухе для горения составляет около 28-30% [3].

Предлагается использовать часть воздушного дутья доменных печей в качестве окислителя [4], т.к. обычное доменное дутье обогащают кислородом до 25-28%. Повышенное содержание кислорода в дутье дает дополнительное преимущество при его использовании для горения при нагреве насадки доменного воздухонагревателя.

Также существует способ подачи холодного дутья для горения газа непосредственно в камеру горения через трубу с загнутым кверху рабочим концом, струя из которой движется почти параллельно оси камеры горения [1].

В соответствии с изобретением [5], для нагрева воздухонагревателя используется сжигание низкосортного топлива (доменный газ и отходящие газы конвертора) с окислителем, содержащим по меньшей мере 85% кислорода, вместо воздуха. Предполагается существенное увеличение эффективности использования топлива, поскольку не требуется нагревать азот, в качестве балласта присутствующего в воздухе.

Разработка системы автоматического регулирования температуры купола воздухонагревателя с возможностью регулирования содержания кислорода в воздухе горения является актуальной задачей [6, 7].

Цель работы.

Разработка и обоснование использования автоматизированной системы регулирования температуры купола воздухонагревателя с целью увеличения температуры дутья без использования высококалорийной добавки.

Основной материал исследования.

Для обеспечения полного сжигания топлива вводится коэффициент избытка воздуха α . Величина коэффициента избытка воздуха зависит от таких факторов как: способ сжигания топлива, вид сжигаемого топлива, температура подогрева газа и воздуха, конструкция горелочного устройства и т.д. Недостаток воздуха приводит к неполному сгоранию топлива, следовательно, чем выше коэффициент α , тем полнее протекает процесс. Для полного сжигания топлива, коэффициент избытка воздуха должен быть больше теоретического значения избытка воздуха, т.е. больше единицы [8]. При расчетах принимаем $\alpha=1,2$.

Выход продуктов горения – V_0 , в общем случае горения газа в теоретических условиях (когда $\alpha = 1,0$) представляет собой сумму объемов:

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} \tag{1}$$

где $V_0^{CO_2}, V_0^{H_2O}, V_0^{N_2}$ - объемы продуктов горения: оксида - CO_2 , водяного пара - H_2O и азота - N_2 соответственно, $м^3$.

Выражение, с помощью которого можно рассчитать объем кислорода, необходимого для полного окисления горючих компонентов газообразного топлива, $V_{O_2}^{ТОП}$ [$м^3 O_2 / м^3$ газа] принимает вид:

$$V_{O_2}^{ТОП} = 0,01 \left[0,5CO^B + 0,5H_2^B + 1,5H_2S^B + 2,0CH_4^B + \left(m + \frac{n}{4} \right) C_mH_n^B - -O_2^B \right], \tag{2}$$

где $CO^B, H_2^B, H_2S^B, CH_4^B, C_mH_n^B, O_2^B$ - содержание компонентов влажного доменного газа, %.

Здесь коэффициент 0,01 учитывает переход от оценки компонентов газообразного топлива в процентах к объемным долям их содержания в $1 м^3$ топлива.

В условиях, когда $\alpha > 1,0$, за счет избыточного воздуха в продуктах горения:

- увеличится количество влаги за счет того объема, который вносится избыточным воздухом;
- увеличится по той же причине количество азота;
- появится избыточный кислород и его объем будет тем больше, чем выше будет значение коэффициента избытка воздуха.

Следовательно, можно записать следующее выражение [8]:

$$V_\alpha = V_\alpha^{CO_2} + V_\alpha^{H_2O} + V_\alpha^{N_2} + V_{изб}^{O_2}, \tag{3}$$

где $V_\alpha^{CO_2}, V_\alpha^{H_2O}, V_\alpha^{N_2}, V_{изб}^{O_2}$ - объемы продуктов горения, при $\alpha=1,2$: оксида CO_2 , водяного пара H_2O и азота N_2 соответственно.

Тогда объем кислорода (при $\alpha=1,2$) можно вычислить по формуле:

$$V_{изб}^{O_2} = (\alpha - 1,0)V_{O_2}^{ТОП} \tag{4}$$

Для исследования влияния обогащения воздуха горения кислородом на горение доменного газа в воздухонагревателе и, следовательно, на температуру купола, были взяты

параметры реального блока воздухонагревателей доменной печи МК «Азовсталь» (табл. 1) за промежутков в 7 месяцев [9].

Таблица 1 – Исследуемый блок 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
Номинальная производительность горелок	кг/м ³	48000	48000	48000	48000
Средний расход доменного газа	м ³ /ч	40405	17473	40275	51816
Время нагрева насадки	с	12948	13215	13668	13601
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

Расчетная зависимость температуры горения доменного газа от содержания кислорода в воздухе горения (рис.1) показывает, что при повышении содержания кислорода в воздухе горения с 21 до 50% наблюдается повышение calorиметрической температуры горения доменного газа с 1451 до 1821°С, а температуры горения с 1306 до 1639°С (рис. 1). Пирометрический коэффициент в расчете температуры горения доменного газа принят равным 0,9 [10].

Отрицательным эффектом является снижение количества продуктов сгорания при увеличенном содержании кислорода в воздухе горения, что непосредственно повлияет на скорость нагрева купола и насадки (рис. 2). Для компенсации снижения теплообмена в насадке необходимо поднять расход доменного газа (рис. 3).

Моделирование нагрева доменного дутья с использованием математической модели воздухонагревателя [11] показало, что повышение содержания кислорода с 21% до 30% позволит поднять температуру дутья на 100 °С.

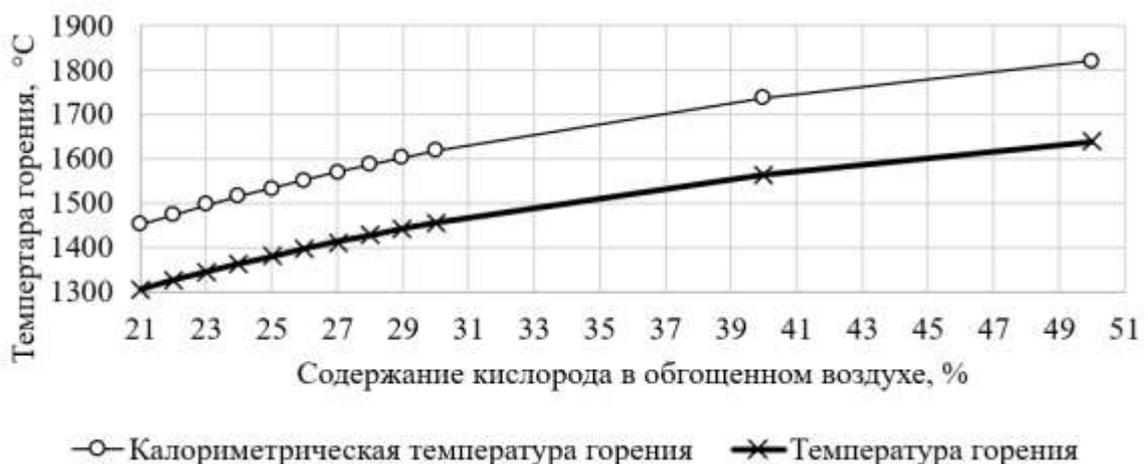


Рисунок 1 – Зависимость calorиметрической температуры горения доменного газа от содержания кислорода в обогащенном воздухе горения

Інформаційні технології

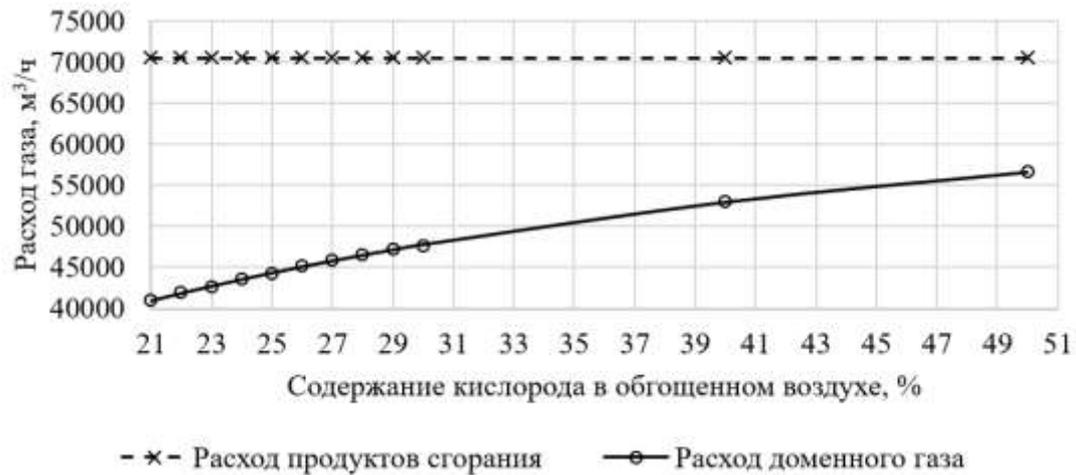


Рисунок 2 – Расхода продуктов сгорания в зависимости от содержания кислорода в обогащенном воздухе горения при постоянном расходе доменного газа (для ВН№1)

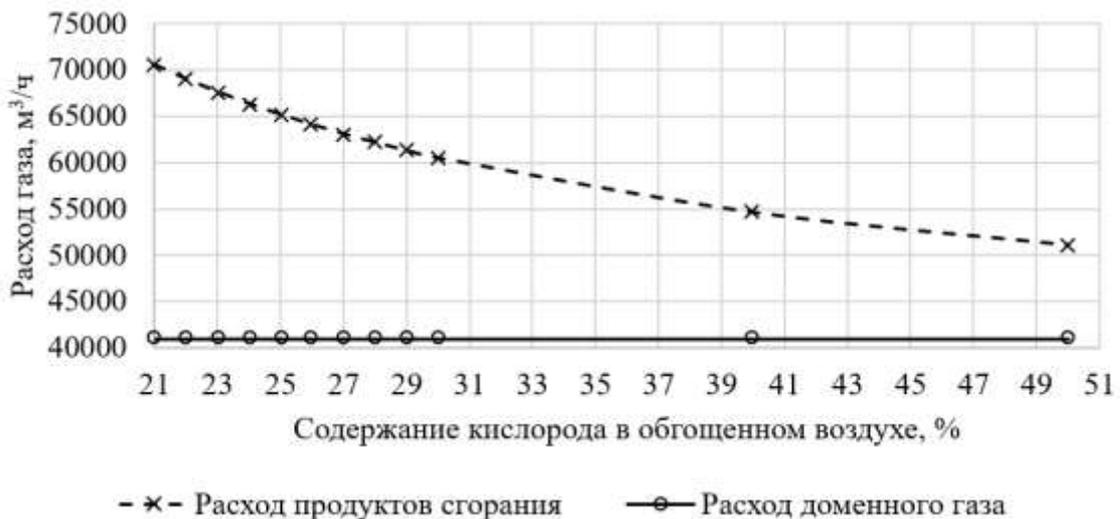


Рисунок 3 – Расхода доменного газа в зависимости от содержания кислорода в обогащенном воздухе горения при заданном расходе продуктов сгорания (для ВН №1).

На основании изученных разработок и полученных результатов расчетов была предложена структура системы автоматического управления температуры купола с возможностью регулирования содержания кислорода в воздухе горения (рис.4).

В системе осуществляется контроль температуры T1, давления P1 и расхода F1 кислорода. Расход кислорода регулируется системой 1, в которую входит пускатель и исполнительный механизм, а управляющее воздействие идет от контроллера. Расход воздуха регулируется с помощью оборотов вентилятора. Сигнал о количества об/мин вентилятора с мотора M передается контроллеру, и контроллер выдает управляющий сигнал на частотный преобразователь, управляющий оборотами двигателя. Также на схеме осуществляется контроль расхода газа F3 и его регулирование с помощью системы 2, в которую входит пускатель и исполнительный механизм. Датчик VE определяет наличие факела в камере горения. Температура купола измеряется термопреобразователем T2, от которого сигнал поступает в контроллер. Также предусмотрена система для контроля параметров отходящих газов, а именно температуры T3 и газоанализатора QI.

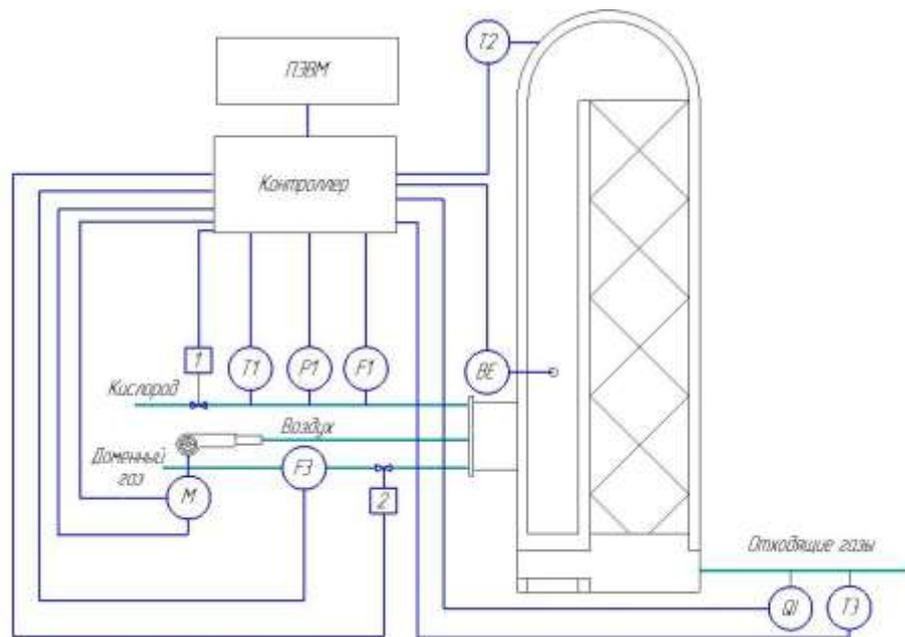


Рисунок 4 – Структурная схема системы автоматического управления температурой купола

ВЫВОДЫ

Исследована возможность увеличения температуры горения доменного газа при обогащении воздуха горения кислородом. Предварительные расчеты и моделирование работы блока воздухонагревателей показали, что при повышении содержания кислорода с 21% до 30% позволит поднять температуру дутья на 100 °С, что позволит сократить расход кокса на 2-3% и поднять производительность печи на 2-3% [11].

Разработана структура системы автоматического регулирования температуры купола с возможностью регулирования содержания кислорода в воздухе горения. Использование предложенной системы даст возможность более гибко регулировать температуру купола за счет изменения содержания кислорода в воздухе горения и расхода доменного газа.

Список использованных источников

1. Соломенцев С.Л. Рациональные типы насадок и доменных воздухонагревателей / С.Л. Соломенцев. – Липецк : ЛГТУ, 2001. – 432 с.
2. Грес Л.П. Энергосбережение при нагреве доменного дутья: Монография / Л.П. Грес. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 209 с.
3. US Patent 2016/0145700 A1, Int. C. C21B 9/14 (2006.01), F23C 9/00 (2006.01), F23L 7/00 (2006.01) Method for Heating a Blast Furnace Stove / Andrew Cameron, Tansley (GB); Tomas Ekman, Saltsjo-boo (SE); Mats Gartz, Sollentuna (SE). - Appl. No.: 15/010,154; Pub. Date: May 26, 2016.
4. 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.
5. Пат. № 2584364. Россия. МКИ С21В 9/00. Способ нагрева воздухонагревателя доменной печи / Линде Акциенгезельшафт (Германия); Э.М. Камерон, Э.П. Ричардсон. – №

2013143022/02; заявл. 2012.01.24; опубл. 2016.05.20 // Изобретения. Полезные модели. Бюл. № 14.

6. *Канивец, В. Р.* АСУ доменного воздухонагревателя при обогащении кислородом воздуха горения / *В. Р. Канивец, А. А. Койфман* // Университетская наука-2018 : в 3 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 23–24 мая 2018 г.) / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2018. – Т. 2. – С. 221–222.

7. *Койфман, А. А.* Управление нагревом насадки воздухонагревателя с учетом содержания кислорода в воздухе горения / *А. А. Койфман, А. И. Симкин, М. О. Король* // Университетська наука – 2019 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Маріуполь, 16-17 травня 2019 р.) : в 4 т. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2019. – Т. 2. – С. 235–236.

8. *Гуцин С.Н.* Топливо и расчеты его горения. Учебное пособие / *С.Н. Гуцин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казяев, и др.; под ред. Ю.Г. Ярошенко.* – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 105 с.

9. *Койфман А. А.* Особенности определения параметров блока воздухонагревателей с нагревом насадки под давлением / *А. А. Койфман, А. И. Симкин* // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2015. – Вип. 31. – С. 192–202. – (Серія : Технічні науки).

10. Доменные воздухонагреватели / *Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каштанова и др.* – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.

11. *Koifman A.* Development and Software Implementation of the Hot Blast Stove Computer Model / *A. Koifman, A. Simkin [Electronic resource]* // Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019), Zaporizhzhia, Ukraine, April 15-19, 2019 / [eds.: D. Luengo, S. Subbotin, P. Arras, Ye. Bodyanskiy, K. Henke, I. Izonin, V. Levashenko, V. Lytvynenko, A. Parkhomenko, A. Pester, N. Shakhovska, A. Sharpanskykh, G. Tabunshchuk, C. Wolff, H.-D. Wuttke, E. Zaitseva]. – Vol. 2353.– P. 440-454. – (CEUR Workshop)

12. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы / *И.Г. Товаровский.* – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.

Койфман О.О., Король М.О., Симкин О.І.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ НАГРІВАННЯМ НАСАДКИ ПОВІТРОНАГРІВАЧА ДОМЕННОЇ ПЕЧІ З МОЖЛИВІСТЮ РЕГУЛЮВАННЯ ЗМІСТУ КИСНЮ В ПОВІТРІ ГОРІННЯ

Температура доменного дуття в значній мірі визначається температурою під куполом повітрянагрівачів. Досліджено вплив вмісту кисню в збагаченому повітрі, що йде на горіння в пальнику повітрянагрівача доменної печі, на підвищення температури купола, а, отже, і підвищення температури гарячого дуття. Наведено основні формули розрахунку горіння при збагаченні в загальному вигляді. Зі збільшенням вмісту кисню в збагаченому повітрі зростає температура горіння газу і при цьому зменшується кількість продуктів горіння, що безпосередньо вплине на швидкість нагріву купола і насадки. Для компенсації зниження теплообміну в насадці необхідно збільшувати витрату доменного газу. При підвищенні вмісту кисню в повітрі горіння з 21 до 50% спостерігається підвищення калориметричної температури горіння доменного газу з 1451 до 1821°C, а температури горіння - з 1306 до 1639°C.

З використанням архівної бази даних за 7 місяців системи автоматичного управління блоку доменних повітрянагрівачів металургійного комбінату було проведено розрахунок основних показників роботи блоку з підвищеним вмістом кисню в повітрі горіння. Підвищення вмісту кисню з 21 до 30% може збільшити температуру дуття на 100°C,

Розроблено систему автоматичного управління температури купола повітрянагрівача з можливістю регулювання вмісту кисню в повітрі горіння. Використання запропонованої системи дасть можливість більш гнучко регулювати температуру купола за рахунок зміни вмісту кисню в повітрі горіння і витрати доменного газу.

Ключові слова: *повітрянагрівач, доменний газ, кисень, збагачення киснем, температура купола, температура дуття, управління*

Koifman O.O., Korol M.O., Simkin O.I.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR HEATING THE HOT BLAST STOVE CHECKERWORK WITH THE OPTION OF ADJUSTING THE OXYGEN CONTENT IN THE COMBUSTION AIR

The temperature of the blast is largely determined by the temperature under the hot blast stove dome. The effect of the oxygen content in the enriched air, that goes for burning in the burner of a hot blast stove of a blast furnace, on the increase in the temperature of the dome, and, consequently, the increase in the temperature of the hot blast, was studied. The basic calculation formulas of combustion during enrichment in general form were given. The combustion temperature of the gas increases with an increase in the oxygen content in the enriched air and the amount of combustion products decreases, which will directly affect the heating rate of the dome and checkerwork. To compensate for the decrease in heat transfer in the nozzle, it is necessary to increase the flow rate of blast furnace gas. With an increase in the oxygen content in the combustion air from 21% to 50%, an increase in the calorimetric temperature of the combustion of the blast furnace gas from 1451 °C to 1821 °C was observed, and the combustion temperature - from 1306 to 1639 °C.

Using the archive database for 7 months of the automatic control system of the hot blast stoves block of the iron and steel plant, the calculation of the basic operational indicators of the block with a higher oxygen content in the combustion air was carried out. An increase in oxygen content from 21% to 30% can increase the blast temperature by 100 °C, which will reduce the coke consumption and increase the productivity of the blast furnace.

A system for automatic control of the temperature of the hot blast stove dome with the option to control the oxygen content in the combustion air has been developed. Using the proposed system will make it possible to more flexibly control the temperature of the dome by changing the oxygen content of the combustion air and the flow of blast furnace gas.

Keywords: *hot blast stove, blast furnace gas, oxygen, oxygen enrichment, dome temperature, blast temperature, control*

Рецензент доц., к.т.н. Добровольська Л.А.

Стаття поступила 14.11.2019

УДК № 004.4:004.8

Кривенко О. В., Загірний М. М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ІГРОВОГО ПРОЦЕСУ НА БАЗІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Методи машинного інтелекту з навчанням привносять свою специфіку до створення і налагодження ігрової системи.