

УДК 669.162.23:681.52

Койфман А.А., Демкив В.Н., Симкин А.И.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

*Выполнен анализ существующих методов оценки состояния воздухонагревателя, в частности его насадки. На основании существующих методов, была поставлена задача создания автоматической системы контроля состояния насадки воздухонагревателя. Выбраны основные режимные параметры воздухонагревателя, влияющие на эффективность его работы. Разработана структура автоматической системы непрерывного контроля состояния воздухонагревателя, в которую включен непрерывный контроль перепада давления в насадке, температура кожуха на различных уровнях, состава отходящих газов. Выбраны современные технические средства автоматизации. С использованием базы данных значений основных технологических параметров работы реального блока воздухонагревателей построена регрессионная зависимость, которая позволяет рассчитать коэффициент полезного действия работы каждого из воздухонагревателей. Выяснено, что регрессионная зависимость так же показывает «направление» и степень влияния каждого режимного параметра на теплотехническую эффективность работы воздухонагревателя. Выполнен расчет коэффициента полезного действия по каждому воздухонагревателю. Проведен сравнительный анализ расчетного КПД с технологическим. Показано, что расчетное значение практически совпадает с технологическим. С возможностью получения регрессионных зависимостей КПД и сопротивления насадки от основных параметров, характеризующих нагрева насадки и дутья, в режиме реального времени можно прогнозировать динамику изменения состояния воздухонагревателя или моделировать различные режимы работы блока. По результатам исследования можно утверждать, что разработанная система контроля может быть успешно внедрена и использована в доменном производстве.*

**Ключевые слова:** *воздухонагреватель, насадка, температура купола, газодинамическое сопротивление, эффективность*

**Постановка проблемы:** Вследствие длительной эксплуатации воздухонагревателей без капитального ремонта температура купола на каждом из них снижена до 1300 против 1350 -1400 °С на момент пуска. Старение аппаратов приводит к росту газодинамического сопротивления насадки, крипу внутреннего оката камеры горения, частичному обрушению футеровки в зоне сочленения штуцера горячего дутья и шахты, а также к развитию эффекта «короткого замыкания». Чтобы снизить тепловые потери, поддержать максимально допустимые температуры нагрева дутья и КПД воздухонагревателей, а также определить очередность постановки аппаратов на ремонт необходимо тщательно изучить тепловой баланс аппаратов, их газодинамические характеристики, величины перетоков СО через разделительную стену, распределение температуры кожуха по высоте и периметру воздухонагревателей.

Для решения проблемы эффективной работы воздухонагревателей необходима разработка и внедрение автоматической системы непрерывной оценки состояния насадки. Это позволит в режиме реального времени оценивать тепловую эффективность аппаратов и своевременно определять целесообразность постановки теплообменника на ремонт того или иного разряда.

**Анализ последних исследований и публикаций:** На сегодняшний день известно немало методов оценки состояния воздухонагревателей.

Исследование визуального состояния насадки при остановке воздухонагревателей возможно только после окончания кампании, в связи с этим этот метод является малоэффективным.

Особо важное значение для обеспечения экономичности и стойкости воздухонагревателей имеет надежность контроля и регулирования температуры купола. В настоящее время применяется метод контроля температуры купола с использованием термопар. Недостатки, связанные с использованием термопар, усугубляются ухудшением стабильности их показаний при повышении температуры под куполом до 1400 °С. Предлагается рядом со стационарной термопарой через отверстие в пробке купола воздухонагревателя вводить опытную термопару с водоохлаждаемым кожухом, которая могла работать как без отсоса, так и с отсосом продуктов горения [1]. Первые измерения показали, что опытная термопара дает заниженные показания по сравнению со стационарной. После удлинения опытной термопары и погружения в под купольное пространство соотношение стало обратным.

Одним из важных факторов повышения эффективности работы насадки воздухонагревателя является выбор огнеупоров для доменных воздухонагревателей. Для правильного выбора огнеупоров необходимо знать распределение температуры по высоте и сечению их насадки и стен. Например, для измерения температуры центра насадочного кирпича делалось отверстие глубиной 35-40 мм диаметром 3 мм для платинородий-платиновой термопары и диаметром 5 мм для хромель-алюмелевой термопары. Для измерения температуры поверхности кирпича на нем делали канавки глубиной 1,5-2 мм и шириной 2-3 мм. После укладки горячих спаев термопар свободную часть отверстия или канавки заполняли огнеупорной замазкой. Для измерения температуры ячейки горячей спай термопары выводили на 7-9 мм внутрь ячейки. Так же в стенке и насадке воздухонагревателя сделали отверстие для ввода и вывода отсасывающей термопары для измерения температуры продуктов горения [2].

В работах [2, 3] в насадку и кладку заложили 37 и 70 термопар соответственно для измерения распределение температур по насадке. Многие термопары вышли из строя уже через 20-30 суток, однако показания оставшихся позволяют сделать ряд важных выводов о распределении.

В работе [4] определяли сопротивление воздухонагревателей с различным сроком службы на металлургических комбинатах «Запорожсталь», «Азовсталь» и им. Дзержинского. Исследования проводили только на воздухонагревателях. Температура газов, входящих в насадку, составляла 1280-1310 °С, а средняя температура газов, выходящих из неё - 240-260 °С. Сопротивление воздухонагревателей определяли по разности полных давлений в камере горения и дымовом патрубке. Давление в камере горения измеряли при помощи трубки, устанавливаемой через гляделку газовой горелки. Сопротивление воздухонагревателей исследовали при различной мощности отопления. Находили зависимость изменения сопротивления воздухонагревателей от расхода продуктов горения. Исследования показали, что сопротивление воздухонагревателей до 1-3 лет службы не изменяется. На воздухонагревателях, работающих при малой мощности отопления, заплавление насадки происходит медленней, так как в единицу времени меньше вносится пыли с газом и воздухом горения.

Особо важное значение для стойкости поднасадочного пространства и соответственно воздухонагревателя в целом имеет разность температур между отдельными колонами, и особенно при объединении их балками. В этом случае из-за неравномерного их нагрева и соответственно температурного удлинения, большая часть внешней нагрузки, обусловленной

силой тяжести балок, решетки и насадки будет приходится на колонны, имеющие максимальную температуру. Промышленные исследования подтвердили предположение о существенной неравномерности температуры нагрева колонн и ее отрицательном влиянии на стойкость поднасадочного устройства и воздухонагревателя в целом [5].

Особый интерес представляют исследования, проведенные в работе [6] включающие определение теплового баланса воздухонагревателей на протяжении их службы. По результатам наблюдений получили уравнения множественной регрессии коэффициента полезного действия (КПД) аппаратов от наиболее значимых режимных параметров в виде [7]:

$$\eta = a_0 + a_1\tau_n + a_2V_{\Gamma} + a_3V_B + a_4\tau_d + a_5V_d$$

где  $\tau_n, \tau_d$  – длительность периодов нагрева и дутья, ч;

$V_{\Gamma}, V_B$  – расход смешанного газа и воздуха горения, м<sup>3</sup>/ч;

$V_d$  – расход дутья, м<sup>3</sup>/мин.

Регрессионные зависимости позволяют не только предсказать значение КПД с учетом индивидуальных особенностей каждого аппарата, но и показывают «направление» и степень влияния каждого режимного параметра на теплотехническую эффективность работы воздухонагревателя.

Произведенный анализ показывает о необходимости разработки современной системы автоматического контроля состояния воздухонагревателя [8], позволяющей в режиме реального времени рассчитывать теплотехнические параметры агрегата.

**Цель статьи** – разработка современной системы непрерывного контроля состояния насадки воздухонагревателя в условиях доменной печи металлургического комбината.

### **Изложение основного материала.**

Воздуонагреватель – теплообменный агрегат для нагрева дутья (воздуха, обогащенного кислородом до 25-30%), подаваемого в доменную печь. Современная доменная печь обычно оснащается блоком из трех или четырьмя воздухонагревателями. Основные элементы воздухонагревателя: стальной герметический кожух, огнеупорная футеровка, камера горения, насадка, поднасадочное. Современные доменные печи оснащаются средствами автоматизации для поддержания эффективного режима нагрева воздухонагревателя, а также перевода воздухонагревателя из режима «нагрева» в режим «дутья» [9].

В системе анализа состояния работы воздухонагревателя необходимо контролировать следующие параметры: давление в камере горения, давление и температуру холодного дутья, давление и температуру горячего дутья, давление и состав отходящих газов, температуры кожуха по всей высоте насадки, температуру поднасадочного, температура купола, расход доменного газа (рис.1).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

#### 1. Измерение разности полных давлений

Износ насадки и ухудшение её параметров как теплообменного элемента вызывает рост газодинамического сопротивления насадки. Когда его значение превышает давление газа и воздуха, происходит снижение расхода топлива, а значит и продуктов сгорания. Начиная с этого момента, наблюдается уменьшение температуры нагрева дутья T12. При этом себестоимость чугуна возрастает, так как удельный расход кокса увеличивается [4].

Измерение разности давлений в камере горения P2 и дымовой патрубке P1 даст нам возможность определять сопротивление воздухонагревателя.

#### 2. Контроль температуры кожуха по высоте насадки

На предприятиях не уделяют должного внимание контролю температуры кожуха по высоте воздухонагревателя, свидетельствующего о нарушениях в работе воздухонагревателя.

Для того чтобы предотвратить возникновение аварийных ситуаций, таких как прогар и трещины в кожухе воздухонагревателя, необходимо контролировать температуру кожуха по высоте.

Для того чтобы обеспечить непрерывный контроль температуры кожуха, по высоте воздухонагревателя устанавливаются датчики температуры Т1-Т8, на трех уровнях, по несколько датчиков на один уровень. После того, как фактическая температура кожуха поступает в контроллер, она сравнивается с заданным диапазоном температур на том или ином уровне. Если значение температуры приближается или выходит за пределы допустимых значений температур, то срабатывает сигнализация, которая отображается на экране у оператора в виде сигнала и мигающего окна. В таком случае мы можем говорить о проблемах в работе воздухонагревателя и о планировании ремонтных работ.

Таким образом, температура кожуха воздухонагревателя является одним из главных контролируемых параметров, так как позволяет уберечь предприятие от материальных убытков.

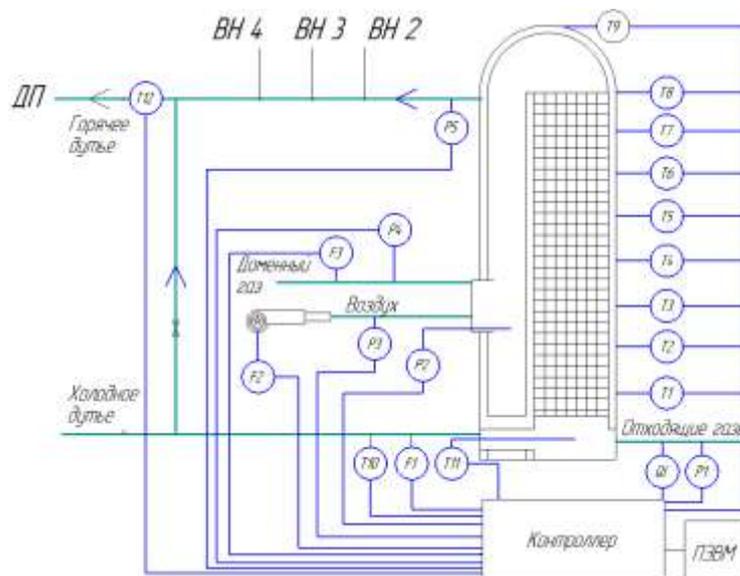


Рисунок 1 – Структура предлагаемой автоматической системы непрерывного контроля состояния насадки воздухонагревателя

### 3. Газовый анализ отходящих газов

Непрерывный анализ отходящих газов, предназначенный для корректировки регулирования оптимального сжигания топлива в период нагрева насадки, позволяет оценить состояние насадки и кирпичей разделительной стенки, включая эффект "короткого замыкания". Наличие данного эффекта приводит к значительному увеличению концентрации СО в дымовых газах, достигающему 5000 мг/м<sup>3</sup> при европейских нормах 100 мг/м<sup>3</sup>, существенному увеличению выбросов СО в атмосферу и ухудшению экологической обстановки; в дутьевой период – к подмешиванию холодного дутья [10].

Для того чтобы провести газовый анализ отходящих газов, необходимо установить в дымовом борове на каждый воздухонагреватель газоанализатор QI, который будет определять состав газа, и сравнивать его с нормативными значениями. Тем самым своевременно выявляя развитие эффекта «короткого замыкания».

Для определения состояния воздухонагревателей действующего блока авторами была исследована база данных за 7 месяцев [11], включающая в себя непрерывное измерение

следующих параметров: температура купола  $t_{\text{куп}}^{\text{max}}$ , температура отходящих газов  $t_{\text{ПГ}}^{\text{max}}$ , расход доменного газа  $F_{\text{ДГ}}^{\text{сред}}$ , температура горячего дутья  $t_{\text{ГД}}^{\text{сред}}$ .

При обработке базы данных были определены циклы «нагрев-дутье» с учетом времени переключения каждого воздухонагревателя с режима на режим. Для каждого из воздухонагревателей были определены продолжительности периодов нагрева  $\tau_{\text{н}}$  и дутья  $\tau_{\text{д}}$ , максимальные значения температуры купола  $t_{\text{куп}}^{\text{max}}$  и отходящих газов  $t_{\text{ПГ}}^{\text{max}}$  в период нагрева, а также минимальна температура горячего дутья.

КПД определяли следующим образом:

$$\text{КПД} = \frac{Q_{\text{д}}}{Q_{\text{н}}} 100\%,$$

где  $Q_{\text{д}}$  – теплота, полученная дутьем, Дж;

$Q_{\text{н}}$  – теплота, внесенная в насадку при сжигании доменного газа, Дж.

В таблице 1 приведены результаты обработки базы данных для воздухонагревателя №1 за каждый месяц. Для других воздухонагревателей получены такие же результаты.

Таблица 1 – Средние значения параметров ВН1

| Месяц | $\tau_{\text{н}}$ , мин | $t_{\text{куп}}^{\text{max}}$ , °C | $t_{\text{ПГ}}^{\text{max}}$ , °C | $F_{\text{ДГ}}^{\text{сред}}$ , м <sup>3</sup> /ч | $\tau_{\text{д}}$ , мин | $t_{\text{ГД}}^{\text{сред}}$ , °C | КПД, % | КПДр, % |
|-------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|------------------------------------|--------|---------|
| 1     | 225,21                  | 1296,30                            | 378,15                            | 32561,82  | 150,62                  | 1221,23                            | 75,21  | 75,21   |
| 2     | 222,99                  | 1321,16                            | 384,17                            | 31555,32  | 146,17                  | 1244,60                            | 71,46  | 71,46   |
| 3     | 228,60                  | 1323,72                            | 385,61                            | 30813,87  | 155,19                  | 1249,22                            | 75,94  | 75,94   |
| 4     | 218,15                  | 1356,37                            | 381,46                            | 31547,40  | 146,88                  | 1273,79                            | 74,03  | 74,03   |
| 5     | 213,15                  | 1328,18                            | 375,14                            | 30391,89  | 145,03                  | 1250,73                            | 76,80  | 76,80   |
| 6     | 212,25                  | 1343,73                            | 357,93                            | 32702,23  | 149,00                  | 1220,88                            | 74,18  | 74,18   |
| 7     | 204,33                  | 1341,55                            | 393,31                            | 35233,20  | 152,42                  | 1252,51                            | 73,66  | 73,66   |

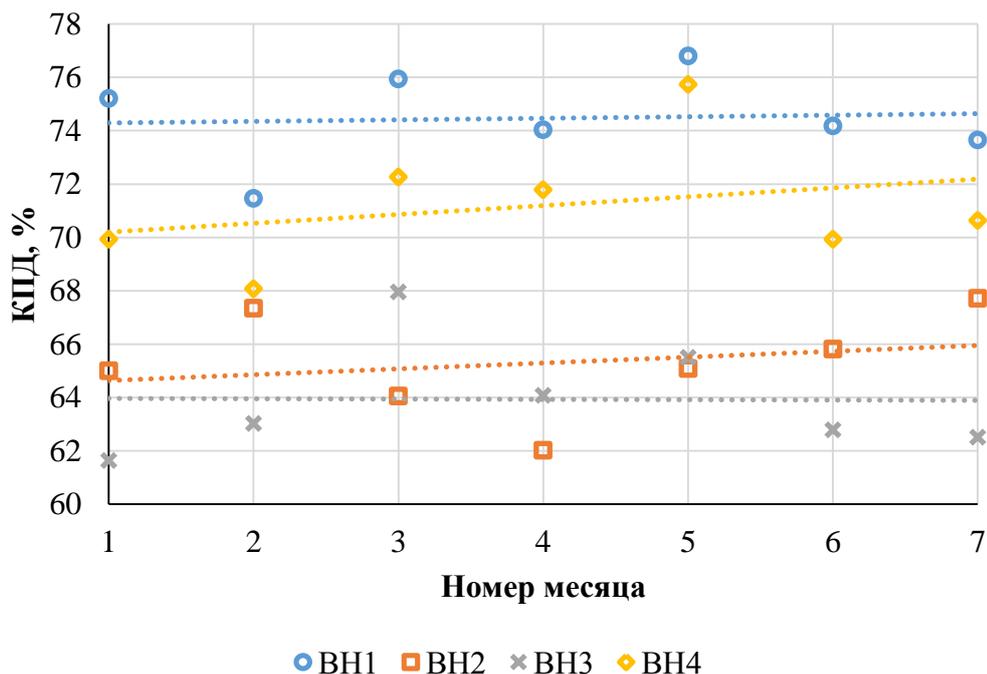


Рисунок 2 – Изменение КПД воздухонагревателей на протяжении 7 месяцев

Регрессионная зависимость для КПД была выбрана следующего вида:

$$\text{КПД}_p = \alpha_1 \tau_n + \alpha_2 t_{\text{куп}}^{\text{max}} + \alpha_3 t_{\text{ПГ}}^{\text{max}} + \alpha_4 F_{\text{дГ}}^{\text{сред}} + \alpha_5 \tau_d + \alpha_6 t_{\text{ГД}}^{\text{сред}} + \alpha_7$$

где  $\alpha_1 - \alpha_7$  – коэффициенты регрессионной зависимости.

Для каждого воздухонагревателя блока были получены коэффициенты регрессионной зависимости (табл. 2).

Таблица 2 – Коэффициенты регрессионных зависимостей

| Номер ВН | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ | $\alpha_6$ | $\alpha_7$ |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| ВН1      | -0,248     | -0,228     | -0,380     | 0,000      | 0,628      | 0,271      | 147,735    |
| ВН2      | -0,253     | 0,054      | -0,005     | -0,003     | 0,381      | -0,040     | 112,654    |
| ВН3      | -0,262     | -0,127     | -0,288     | 0,001      | 0,418      | 0,237      | 0,000      |
| ВН4      | -0,182     | -0,280     | -0,196     | -0,002     | 0,448      | 0,294      | 237,355    |

На основании полученных зависимостей КПД от выбранных параметров можно прогнозировать дальнейшую тепловую работу воздухонагревателей блока. Зависимости подобного рода можно будет получить, например, для сопротивления насадки или температурного поля кожуха воздухонагревателя.

### ВЫВОДЫ

Применение предлагаемой системы непрерывного контроля состояния насадки в реальном времени позволит мастеру доменной печи оценивать состояние блока по расчетным значениям КПД, сопротивлению насадки и температуре кожуха, своевременно вносить корректировки в работу блока, например, оптимизировать цикл «нагрев-дутье» с целью повышения температуры дутья [11].

С возможностью получения регрессионных зависимостей КПД и сопротивления насадки от основных параметров, характеризующих нагрева насадки и дутья, можно прогнозировать динамику изменения состояния воздухонагревателя или моделировать различные режимы работы блока.

#### Список использованных источников

1. Яковенко А.Т. Измерение температуры купола воздухонагревателей доменных печей / А.Т. Яковенко, И.Н. Красавцев // *Сталь*. - 1970. - №2.- С.7-9.
2. Соломенцев С.Л. Оценка температурных условий работы насадки доменного воздухонагревателя / С.Л. Соломенцев, В.Д. Коршиков, С.М. Басукинский // *Известия. ВУЗов. Черная металлургия*. – 1988. - №7. - С. 126-128.
3. . Соломенцев С.Л. Исследование температурного режима насадки и кладки стен доменных воздухонагревателей / С.Л. Соломенцев, Г.Б. Берембмон, П.Е. Нахаев [и др.] // *Сталь*. - 1969. - № 6.- С. 497-499.
4. Грес Л.П. Высокоэффективный нагрев дутья: монография / Л.П. Грес. - Днепропетровск : Пороги, 2008. - 492 с.
5. Соломенцев С.Л. Рациональные типы насадок и доменных воздухонагревателей / С.Л. Соломенцев. – Липецк : ЛГТУ, 2001. – 432 с

6. Коршиков В.Д. Комплексный анализ функционального состояния доменных воздухонагревателей / В.Д. Коршиков, И.С. Яриков, И.Г. Бянкин [и др.] // Сталь. - 1999. - №2. - С.7-9.
7. К. Хартман Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Хартман К., Лецкий Э., Шефер В.И. и др. – М.:Мир, 1977.-552 с.
8. Койфман, А. А. Непрерывный анализ текущего состояния воздухонагревателя / А. А. Койфман, А. И. Симкин, В. Н. Демкив // Університетська наука – 2019 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Маріуполь, 16-17 травня 2019 р.) : в 4 т. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2019. – Т. 2. – С. 234–235.
9. Энциклопедический словарь по металлургии / Н.П. Лякишев. - М.: Интермет Инжиниринг. – 2000. – 821 с.
10. Информационный ресурс: [https://www.kalugin.biz/ru/content/hot\\_stoves](https://www.kalugin.biz/ru/content/hot_stoves)
11. 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).

**Койфман О.О., Демків В.М., Сімкін О.І.**

## **АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ПОВІТРОНАГРІВАЧА**

*Виконано аналіз існуючих методів оцінки стану повітрянагрівача, зокрема його насадки. На підставі існуючих методів, була поставлена задача, створення автоматичної системи контролю стану насадки повітрянагрівача. Обрані основні режимні параметри повітрянагрівачів, які мають вплив на ефективність його роботи. Розроблено структуру автоматичної системи безперервного контролю стану повітрянагрівача, в яку включений безперервний контроль перепаду тиску в насадці, температури кожуху на різних рівнях, складу газів, що відходять. Обрані сучасні технічні засоби автоматизації. З використанням бази даних значень основних технологічних параметрів роботи реального блоку повітрянагрівачів була побудована регресійна залежність, яка дозволяє розрахувати коефіцієнт корисної дії роботи кожного з повітрянагрівачів. З'ясовано, що регресійна залежність так само показує «напрямок» і ступінь впливу кожного режимного параметра на теплотехнічну ефективність роботи повітрянагрівача. Виконано розрахунок коефіцієнта корисної дії по кожному повітрянагрівачу. Проведено порівняльний аналіз розрахункового ККД з технологічним. Показано, що розрахункові значення практично збігається з технологічним. З можливістю отримання регресійних залежностей ККД та опору насадки від основних параметрів, що характеризують нагрів насадки і дуття, в режимі реального часу можна прогнозувати динаміку зміни стану повітрянагрівача або моделювати різні режими роботи блоку. За результатами дослідження можна стверджувати, що розроблена система контролю може бути успішно впроваджена і використана в доменному виробництві.*

**Ключові слова:** *повітрянагрівач, насадка, температура купола, газодинамічний опір, ефективність*

**Koifman O.O., Demkiv V.M., Simkin O.I.****AUTOMATIC CONTINUOUS CONTROL SYSTEM OF THE HOT BLAST STOVE CHECKERWORK STATE**

*The analysis of the existing methods for assessing the hot blast stove state, in particular its checkerwork was carried out. Based on the existing methods, the task of creating an automatic control system of the hot blast stove checkerwork state was set. The main operational parameters of the hot blast stove affecting the efficiency of its operation were selected. The structure of an automatic continuous control system of the hot blast stove state was developed, which includes continuous monitoring of the differential pressure in the nozzle, the casing temperature various levels, and the composition of the exhaust gases. Selected modern automation equipment. Using a database of the values of the main technological parameters of the operation of a real hot blast stoves block, a regression dependence was built, allowing to calculate the efficiency of each of the hot blast stoves. It was found that the regression dependence also shows the "direction" and the degree of influence of each operating parameter on the heat engineering efficiency of the hot blast stove. The calculation of the efficiency for each hot blast stove was performed. A comparative analysis of the calculated efficiency with technological efficiency was carried out. It was shown that the calculated value practically coincides with the technological value. With the possibility of obtaining regression dependences of the efficiency and nozzle resistance on the main parameters characterizing the nozzle and blast heating, in real time it is possible to predict the dynamics of the hot blast stove state or to simulate various modes of operation of the unit. According to the results of the research, it is arguable that the developed control system can be successfully implemented and used in the blast furnace process.*

**Keywords:** hot blast stove, checkerwork, dome temperature, gas-dynamic resistance, efficiency.

Рецензент доц., к.т.н. Черевко Е.А.

Статья поступила 14.11.2019

**УДК 669.162.23/25:519.687**

**Здрздас Д.С., Симкин А.И., Койфман А.А., Юзвенко С.В.****ЧИСЛЕННО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОТЫ ГРУППЫ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ**

*Тема моделирования работы воздухонагревателя доменной печи актуальна и сегодня, исследования в этой области проводились многими учеными. Анализ известных публикаций описывается в начале статьи, делаются выводы о разработанных моделях, рассматриваются принятые допущения и их последствия.*

*Сложность моделирования объекта заставляет разделить его на составные части, поэтому в данной статье рассматривается только насадка воздухонагревателя, горения топлива и теплообмен в камере горения и куполе не рассматривается. Ограничив задача приводится цель работы и вытекающие из нее задачи.*

*Приводится схема разделения насадки на более мелкую пригодную для экономического расчета область, но такую, которая не искажает физического смысла. Определяются теплофизические параметры теплоносителя и материала насадки. Далее*