

С.Ю.Толстоухов

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАСАДКИ ДО-  
МЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ»**

*ОАО «Северсталь»*

Представлены материалы по изучению продолжительности газового и воздушного периодов доменного воздухонагревателя без изменения других параметров. Показано, что применения попарно–параллельного режима дутья может повысить производительность воздухонагревателя

**Введение.** В настоящее время актуальной стала проблема рационального использования энергоносителей в связи с их высокой стоимостью. Применительно к доменным воздухонагревателям это касается расхода природного газа, используемого в качестве топлива для нагрева насадки воздухонагревателей, а также повышение коэффициента полезного действия воздухонагревателей.

Теплотехнический расчет воздухонагревателя, сделанный еще в 30–40–х годах XX века не мог дать нам ответы на следующие вопросы:

- Как изменится тепловая работа воздухонагревателя при уменьшении или увеличении газового и дутьевого периодов?
- Повлияет ли уменьшение высоты воздухонагревателя на его теплотехнические показатели?
- Изменится ли температура дутья, если изменить геометрические характеристики насадки?

Именно ответом на эти вопросы мы и займемся в данной научно–исследовательской работе.

Высокая степень интенсификации доменного производства невозможна без повышения стабильности доменного процесса во всех его стадиях. В первую очередь это касается постоянства всех параметров дутья, поступающего в печь.

Нагрев дутья оказывает существенное влияние на производительность доменных печей и удельный расход кокса. Если в прошлом максимальная температура дутья ограничивалась требованиями ровного хода доменных печей, то в настоящее время в результате применения комбинированного дутья, повышенного давления газов, офлюсованного агломерата, увеличения его доли в шихте и лучшей подготовки нет ограничений для дальнейшего повышения температуры горячего дутья.

В данной научно–исследовательской работе будет разработана математическая модель тепловых процессов в доменном воздухонагревателе, с помощью которой возможно проводить исследование существующих промышленных объектов с целью совершенствования технологических

режимов и конструкции, контроля технологических процессов путем создания автоматизированных систем управления.

Вопросы теплообмена в воздухонагревателе рассматривалась и ранее, но применяемая ранее методика основывалась на усреднении во времени уравнений теплообмена, и не позволяла достаточно точно рассчитать изменения температурного поля насадки и газовых сред во времени, что необходимо при определении условий срока службы огнеупоров в воздухонагревателях.

## **1. Разработка математической модели тепловой работы доменного воздухонагревателя.**

### **1.1. Общие положения процесса теплопередачи**

Среди процессов переноса тепла один из наиболее распространенных в инженерной практике является процесс передачи тепла от горячего теплоносителя к холодному через разделительную стенку (процесс теплопередачи). Тепловой поток от горячего теплоносителя с расходом  $G_1$  и начальной температурой  $t_1$  передается через стенку, толщиной  $\delta$  холодному продукту в аппарате в количестве  $G_2$  и начальной температурой  $t_2$ . Таким образом, процесс теплопередачи состоит из процесса теплоотдачи потока от горячего теплоносителя к поверхности стенки, процесса переноса тепла через стенку и процесса теплоотдачи от поверхности стенки к холодному теплоносителю:

$$q = \alpha (t - t_c), \text{ Вт/м}^2$$

### **1.2. Методика расчета температуры дыма, скорости движения газовой смеси и дутья.**

#### Расчет температуры газовой смеси (дыма).

Теплота горения доменного газа определяется по формуле:

$$Q_{дг} = 30,22 * CO_{дг} + 25,8 * H_{2дг}, \text{ (ккал/м}^3\text{)};$$

где:  $CO_{дг}$  – содержание CO в доменном газе (масс дол);

$H_{2дг}$  – содержание  $H_2$  в доменном газе (масс дол);

Коэффициенты 30,22 и 25,8 – тепловые эффекты реакций горения CO и  $H_2$  соответственно ((ккал/м<sup>3</sup>)\*10<sup>-2</sup>).

Теплота горения природного газа определяется аналогично:

$$Q_{пг} = Q_{пг1} + 30,22 * CO_{пг} + 25,8 * H_{2пг}, \text{ (ккал/м}^3\text{)};$$

где:  $Q_{пг1}$  – теплота горения природного газа до CO и  $H_2$

$CO_{пг}$  – содержание CO в природном газе (масс. дол.);

$H_{2пг}$  – содержание  $H_2$  в доменном газе (масс. дол.);

Коэффициенты 30,22 и 25,8 – тепловые эффекты реакций горения CO и  $H_2$  соответственно ((ккал/м<sup>3</sup>)\*10<sup>-2</sup>).

Теплота горения смеси:

$$Q_{смеси} = Q_{дг} * (1 - \gamma) + Q_{пг} * \gamma; \text{ (ккал/м}^3\text{)}$$

где:  $\gamma$  – доля природного газа.

Количество кислорода, необходимого на сжигание газа:

$$O_{2необх} = (1 - \gamma) * ((CO_{дг} + H_{2дг}) / 2) * 100 + \gamma * (C_{пг} + H_{пг} / 2) / 100 \text{ (\%)}$$

где: Спг и Нпг – содержание улерода и водорода в природном газе(%)

Количество воздуха, необходимого на сжигание газа:

$$VOZD_{\text{необх}} = 100 * O_2_{\text{необх}} / O_2_{\text{возд}}, (\%);$$

где:  $O_2_{\text{возд}}$  – содержание кислорода в воздухе ( $O_2_{\text{возд}} = 20,95\%$ )

Количество избыточного воздуха:

$$VOZD_{\text{изб}} = VOZD_{\text{необх}} * (\alpha - 1), (\%);$$

где:  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха

Суммарное количество воздуха:

$$VOZD_{\text{сум}} = VOZD_{\text{необх}} + VOZD_{\text{изб}}, (\%);$$

Рассчитаем объемы компонентов при сжигании 1 м<sup>3</sup> газовой смеси.

Объем N<sub>2</sub>:

$$V_{N_2} = VOZD_{\text{сум}} * (100 - O_2_{\text{возд}}) / 100 + 0,01 * (100 - CO_{2\text{дг}} - CO_{\text{дг}} - H_{2\text{дг}}) * (1 - \gamma) + 0,01 * N_{\text{пг}} * \gamma, \text{ м}^3$$

Объем O<sub>2</sub>:

$$V_{O_2} = VOZD_{\text{изб}} * O_2_{\text{возд}} / 100, \text{ м}^3$$

Объем CO<sub>2</sub>:

$$V_{CO_2} = 0,01 * ((CO_{2\text{дг}} + CO_{\text{дг}}) * (1 - \gamma) + C_{\text{пг}} * \gamma), \text{ м}^3$$

Объем H<sub>2</sub>O:

$$V_{H_2O} = 0,01 * H_{2\text{дг}} * (1 - \gamma) + 0,01 * N_{\text{пг}} * \gamma + 0,01 * F_{\text{возд}} * VOZD_{\text{сум}}, \text{ м}^3$$

где: Nпг, Спг, Нпг – содержание компонентов в природном газе, %

$F_{\text{возд}}$  – влажность воздуха.

Общий объем дыма (газовой смеси) определяется как сумма объемов:

$$V_{\text{дыма}} = V_{N_2} + V_{O_2} + V_{CO_2} + V_{H_2O}, \text{ м}^3$$

Температура дыма (газовой смеси):

$$T_{\text{дыма}} = \sqrt{(D^2 + M)} - D$$

где:  $D = A_{\text{дыма}} / (2 * V_{\text{дыма}})$

$$M = Q_{\text{см}} / V_{\text{дыма}}.$$

$$A_{\text{дыма}} = V_{N_2} * A_{N_2} + V_{O_2} * A_{O_2} + V_{CO_2} * A_{CO_2} + V_{H_2O} * A_{H_2O}$$

$$B_{\text{дыма}} = V_{N_2} * B_{N_2} + V_{O_2} * B_{O_2} + V_{CO_2} * B_{CO_2} + V_{H_2O} * B_{H_2O}$$

$A_{N_2}, A_{O_2}, A_{CO_2}, A_{H_2O}, B_{N_2}, B_{O_2}, B_{CO_2}, B_{H_2O}$  – эмпирические коэффици-

циенты

Расчет скорости движения дутья:

$$\omega_{\text{дут}} = V_{\text{дут}} / F_{\text{отв}} \text{ (м/с)}$$

где:  $V_{\text{дут}}$  – расход дутья, м<sup>3</sup>/с;

$F_{\text{отв}}$  – суммарная площадь отверстий в насадке, м<sup>2</sup>;

Расчет скорости движения дыма:

$$\omega_{\text{дыма}} = V_{\text{дыма}} / F_{\text{отв}} \text{ (м/с)},$$

где:  $V_{\text{дыма}}$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;

$F_{\text{отв}}$  – суммарная площадь отверстий в насадке, м<sup>2</sup>;

### 1.3 Математическая модель

Расчетная область разбита на пять зон с различными теплофизическими свойствами согласно конструктивных особенностей каупера.

Уравнения теплопроводности в материале насадки в период нагрева и охлаждения:

$$T_k / \tau = a^2 \cdot (T_k / x^2), x=0..S$$

где:  $T_k$  – температура кирпича,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$\tau$  – время, час,

$x$  – координата по толщине кирпича, м,

$a$  – коэффициент температуропроводности кирпича,  $\text{м}^2/\text{час}$ ,

$$T(i,j,k) = T(i,j,k-1) + a^2/\Delta x^2 \cdot \{T(i,j-l,k) - 2 \cdot T(i,j,k) + T(i,j+l,k)\}$$

$a = \lambda/\rho \cdot c_v$ ,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности кирпича,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,

$\rho$  – плотность кирпича,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,

$c_v$  – теплоемкость,  $(\text{ккал}/^{\circ}\text{C})$ .

Граничное условие теплообмена на границе: газ — насадка:

$$-\lambda \cdot (T_k / x) = \alpha \cdot (T_{\text{сп}} - T_k),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ ;

В качестве эталонных (базовых) данных температуры насадки будет воздушонагреватель со следующими данными:

$\delta=0,02$  – радиус канала, м;

$H=36$  – высота насадки, м;

$t_1=3$  – продолжительность газового периода, час;

$t_2=1,5$  – продолжительность дутьевого периода, час;

$T_k=1350$  – температура купола в насадку,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$S = 0,015$  полутолщина кирпича насадки, м;

После запуска программы нами получены кривые температур газового и дутьевого периодов в трех точках по высоте воздушонагревателя (верхняя, средняя и нижняя зоны) и в трех точках по глубине кирпича насадки (поверхность кирпича, середина и промежуточное значение) (рис.1-6).

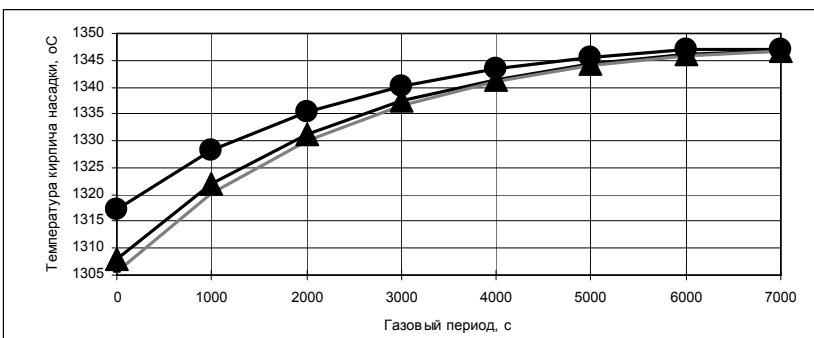


Рис.1. Функция  $f(t) = \tau_{\text{газ}}$  в газовый период работы воздушонагревателя в верхней зоне насадки

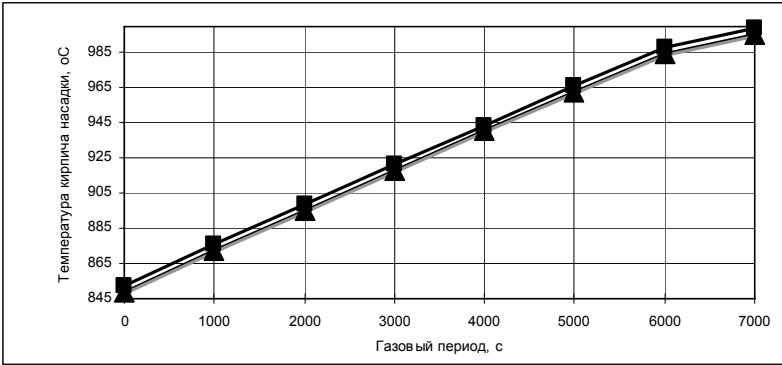


Рис.2. Функция  $f(t) = \tau_{\text{газ}}$  в газовый период работы воздухонагревателя в средней зоне насадки

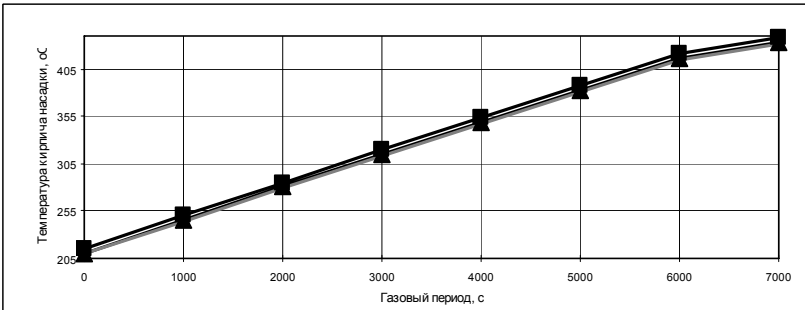


Рис.3. Функция  $f(t) = \tau_{\text{газ}}$  в газовый период работы воздухонагревателя в нижней зоне насадки

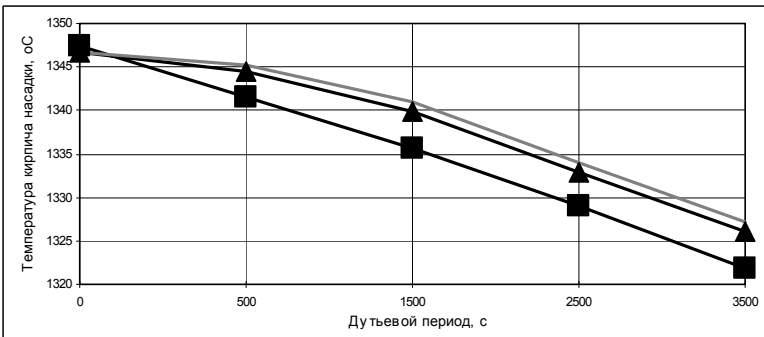


Рис.4. Функция  $f(t) = \tau_{\text{возд}}$  в дутьевой период работы воздухонагревателя в верхней зоне насадки

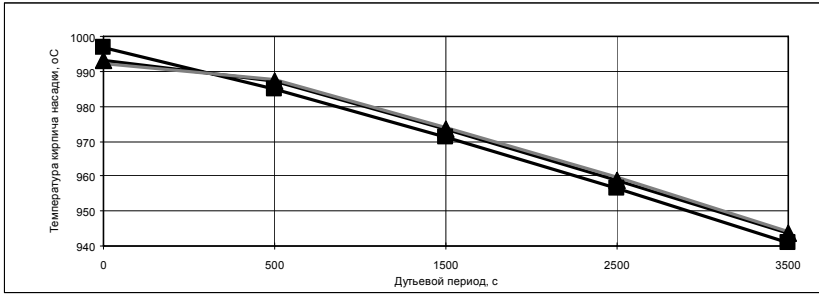


Рис.5. Функция  $f(t) = \tau_{\text{возд}}$  в дутьевой период работы воздухонагревателя в средней зоне насадки

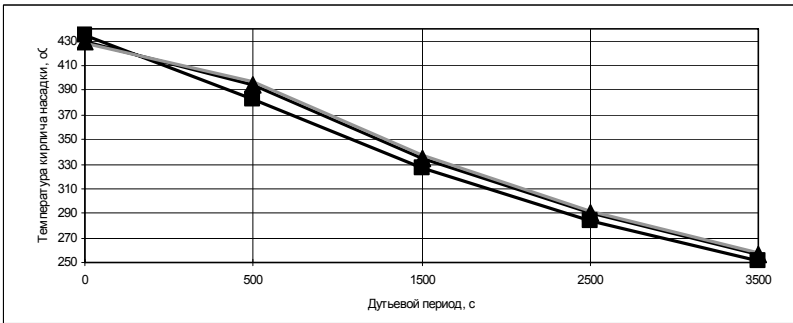


Рис.6. Функция  $f(t) = \tau_{\text{возд}}$  в дутьевой период работы воздухонагревателя в нижней зоне насадки.

Условные обозначения на рисунках: ●  $T_p$  – температура поверхности кирпича насадки, °C; ■  $T_{pr}$  – температура промежуточного значения глубины насадки, °C; ▲  $T_{сер}$  – температура середины кирпича, °C

## 2. Влияние основных эксплуатационных факторов на эффективность работы воздухонагревателей без изменения конструкции.

Для непрерывного снабжения доменной печи дутьем необходимо минимум два воздухонагревателя. Обычно для одной печи сооружают блок из трех–четырех аппаратов, которые поочередно нагревают дутье.

Существует четыре режима дутья: последовательный, параллельный, попарно – параллельный и смешанный. Наиболее распространенным режимом работы воздухонагревателей в период дутья является последовательный, то есть когда воздухонагреватели поочередно, один за другим, становятся на дутье. Возможен смешанный режим, когда сочетаются последовательный и попарно – параллельный. При этом режиме воздухонагреватель часть периода стоит на дутье один, постоянство температуры дутья поддерживается смесителем. Часть периода воздухонагреватели работают в паре, температура дутья стабилизируется за счет перераспре-

деления его между горячим и теплым аппаратами. Также возможен параллельный режим, когда в работе находится два воздухонагревателя, а два на нагреве.

Однако наиболее эффективным режимом нагрева дутья, позволяющим достичь экономически выгодного уровня нагрева, считается попарно–параллельный. При этом режиме работы стабилизация температуры горячего дутья достигается смешиванием дутья, поступающего из одного (более нагретого) воздухонагревателя и из второго (менее нагретого), который при обычной (т.е. последовательной) работе воздухонагревателей следовало бы поставить на нагрев насадки.

Результаты исследования попарно–параллельного режима, представлены на рис. 7

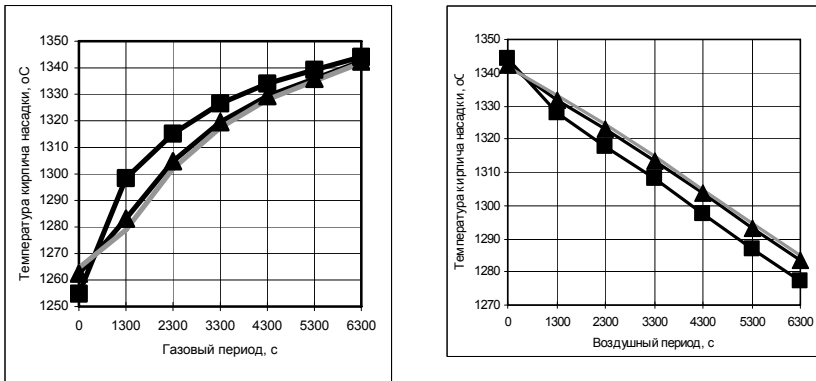


Рис.7. Функция  $f(t) = \tau_{\text{газ}}$  в газовый (А) и  $f(t) = \tau_{\text{возд.}}$  в воздушный (Б) периоды работы воздухонагревателя в верхней зоне насадки (П–П режим).

Перевод четырех воздухонагревателей на попарно–параллельную работу без конструктивных изменений позволяет отказаться от добавления холодного дутья для стабилизации температуры горячего дутья; повысить температуру горячего дутья, приблизив ее к температуре купола (так как ее изменение за период работы "на дутье" при той же продолжительности этого периода уменьшается на половину), увеличить воздушный период, уменьшив тем самым число перекидок, и повысить стойкость футеровки трубопровода горячего дутья.

Внедрение этого режима позволяет поднять температуру нагрева дутья на 30 – 90°C по сравнению с последовательным режимом. Предложенный режим позволяет экономить расход кокса, что очень актуально в настоящее время, как с экологической, так и с экономической позиции.

### 3. Влияние изменений конструкции воздухонагревателя на эффективность его работы

Геометрические характеристики огнеупорного материала играют немаловажную роль при работе воздухонагревателя. Изменяя диаметр кана-

ла. мы можем подобрать оптимальный тепловой режим воздухоподогревателя.

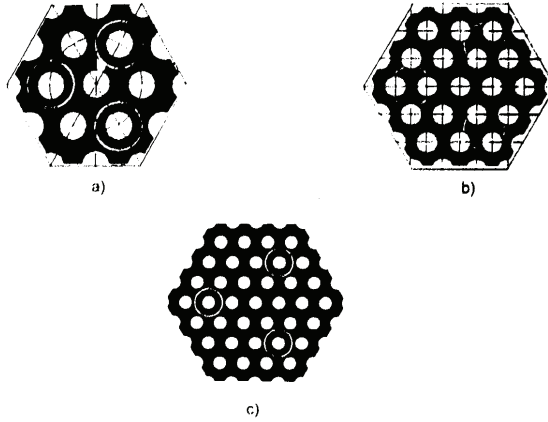


Рис. 8. Виды огнеупоров с разными диаметрами каналов и поверхностью нагрева

Рассмотрим следующий случай:

Диаметр канала равен 20 мм, Поверхность нагрева  $64 \text{ м}^2/\text{м}^3$  (рис.8–с). Результаты исследования приведем на рис.9 и сравним с базовым вариантом.

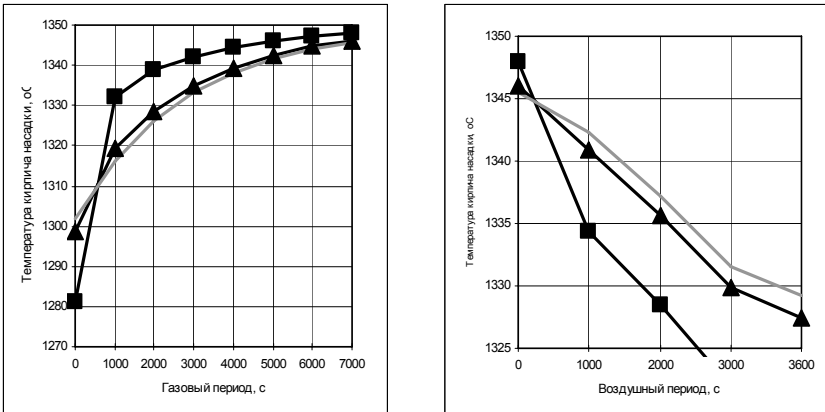


Рис.9. Функция  $f(t) = \tau_{\text{газ}}$  в газовой (А) и  $f(t) = \tau_{\text{возд.}}$  в воздушный (Б) периоды работы воздухоподогревателя в верхней зоне насадки

При уменьшении диаметра канала возрастает к.п.д. воздухоподогревателя вследствие снижения средней температуры дыма. Можно отметить более быстрый нагрев поверхности насадки, что может говорить о некотором запасе тепла по глубине насадки. Вследствие этого можно уверенно



говорить о том, что при таком диаметре канала и поверхности нагрева насадки (увеличение до  $64 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ), общее высоту насадки можно уменьшить, что выразится в снижении затрат на строительство и ремонт воздухонагревателя. Можно с уверенной долей сказать, что при таком типе насадки можно уменьшить высоту каупера на 5 метров.

### **Заключение.**

Проблему в необходимости год от года повышать температуру доменного дутья для получения более высоких технико-экономических показателей производства чугуна при сохранении высокой надежности конструкции воздухонагревателей решали многие исследователи на протяжении долгого времени. Температура горячего дутья интенсивно росла (в 70–х годах XX в по 20К в год) за счет применения новейших достижении в области науки и техники: применения новых огнеупорных материалов, разработки более совершенного оборудования, оптимизации геометрических параметров и средств контроля и управления технологическими режимами. Тем не менее, обоснования необходимости проведения мероприятий по улучшению работы воздухонагревателей не были достаточно точны. Как показала практика, термостойкость насадок доменных воздухонагревателей несколько выше требуемой, других частей – недостаточно большой. Для повышения эффективности ведения процесса нагрева дутья, необходимо его тщательное исследование. Применение математических моделей позволяет получить полное представление о характере происходящих в промышленном объекте явлениях, не мешая при этом течению производственного процесса, используя минимум экспериментальных данных об объекте исследования.

Насадка воздухонагревателя, обладая наиболее развитой поверхностью нагрева, определяет протекание процесса регенеративного теплообмена, поэтому изучение протекающих в ней процессов крайне важно для понимания работы воздухонагревателя целом. Получение адекватных знаний об объекте позволяет эффективно им управлять, в том числе и автоматизированными системами. Применение метода моделирования возможно для проектируемых объектов, с целью прогнозирования их эксплуатационных характеристик. Значимость математических моделей, как средства исследования, сложно недооценить. Поэтому была разработана математическая модель изучения тепловых характеристик в насадке воздухонагревателя. С помощью модели мы можем изучать влияние различных теплотехнических параметров (продолжительность периодов, высота насадки, геометрические характеристики насадки) на работу воздухонагревателя.

*Сведения об авторе:*

**Толстоухов Сергей Юрьевич**, газовщик доменного цеха ЧерМК,  
ОАО «Северсталь»,