

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

*математическое описание в дифференциальных уравнениях физических процессов, происходящих в насадке воздухонагревателя в режимах «дутья» и «нагрев».*

*Разработана структурная схема программного обеспечения системы информационного сопровождения и управления группой воздухонагревателей, включая регулирование температуры, расчет горения, расчет насадки, расчет параметров дутьевого воздуха. Схема ориентирована на работу воздухонагревателя в трех режимах, а именно «нагрев», «дутья» и «отделение».*

*Описанные способы взаимодействия отдельных программных компонентов системы, структура программы управления группой с подробным описанием отдельных компонентов этой программы.*

*Приводится структурная схема программы моделирования работы группы ВН доменной печи, описываются входящие в нее подпрограммы, их входные данные, основные идеи функционирования при различных режимах работы воздухонагревателя.*

*В конце статьи представлены основные выводы.*

**Ключевые слова:** *доменный воздухонагреватель, насадка, теплофизические свойства, теплоноситель, уравнения Навье-Стокса, разностная схема, локально-одномерная схема, метод прогонки.*

**Вступление.** Для устойчивой и производительной работы доменных печей необходим эффективный нагрев дутья, который невозможен без качественной компьютерной системы управления, действующей на базе достоверных моделей воздухонагревателя (далее – ВН). Кроме того, при предпроектном расчете предпочтительнее иметь возможность наблюдать за распределением температур по высоте насадки при разных условиях работы, которые могут быть на производстве, а для управления блоком ВН – знать временные запасы тепла и время для нагрева.

Подобные модели должны отражать физические процессы и основываться на дифференциальных уравнениях, полученных при изучении тепловых, гидродинамических и химических процессах, происходящих в реальном объекте.

### **Анализ последних исследований и публикаций.**

Буткарев А.А. и др. [1], применив модель, описанную в [2], получили обобщенную прогнозирующую детерминированную математическую модель, которая строится на основе физических закономерностей процессов в газовой и дутьевой периоды работы доменного ВН и включающая характеризующие их основные уравнения теплообмена и аэродинамики. Модель дополнена комплексным дополнением прогнозирующих элементов модели (расхода газа, температуры дутья и др.). Следует отметить, что рассматриваемая модель имеет серьезное допущение – насадка имеет форму одномерного тела, а в этом случае приходится использовать одномерное уравнение теплопроводности, поэтому автор не рассматривает задачу гидродинамики в канале. При таком упрощении становится невозможным учитывать расход теплоносителя, поэтому решение является стационарным. Для учета изменения расхода автор выводит зависимость коэффициент теплоотдачи от расхода, следовательно, и от температуры на выходе.

Грес Л.П. и др. [3] разработали математическую модель расчета тепловой работы доменного ВН, в основу которой положено уравнение мгновенного теплового баланса в слое. Получено распределение температур по высоте. Применение уравнения теплового баланса является как достоинством (модель проста, не имеет сложностей для вычисления), так и недостатком (распределение температур в объеме не учитывается, задача гидродинамики не решается).

Кобыш Е.И. и др. [4] разработали и реализовали на ПЭВМ математическую модель, основанную на решении задачи теплообмена между неподвижным слоем насадки и газом-теплоносителем с известными начальными и граничными условиями.

Предложенная модель похожа на [3] тем, что использует уравнение баланса тепла, но схема расчета построена так, чтобы учитывать распределение тепла по толщине насадки. Для этого насадка разбивается по высоте, каждый слой по высоте в свою очередь разбивается по толщине и уже для них записывается уравнения баланса тепла, тем самым учитывать распределение тепла по толщине, что отсутствует в работе [3]. Недостатком модели является тот факт, что теплообмен по толщине происходит, а по высоте нет. Кроме этого, скорость теплоносителя учитывается через объем его в слое, в этом случае получить распределение скоростей в канале не представляется возможным.

Хаджинов А.С. и др. [5] разработали математическую модель ВН доменной печи, причём трехмерная задача теплообмена в насадке сведена к двумерной задаче в эквивалентных цилиндрических ячейках. Нелинейные граничные условия теплообмена аналитически описываются через свойства газовой и твердой фазы. Произведено сравнение результатов расчета на модели с работой ВН №5 ОАО «ММК им. Ильича».

Можно провести аналогию между [4] и [5], обе модели учитывают теплообмен по толщине насадке и одномерность процессов, происходящих в газовой фазе. Предложенная модель использует упрощенные дифференциальные уравнения переноса тепла, что является преимуществом по сравнению с методом послойного деления [4], ввиду того что теплообмен происходит по двум направлениям.

Математические модели, предложенные в работе [6], имеют разную структуру и предназначение. К примеру, в модели из раздела 5.1.1 насадка рассматривается как термически тонкое тело с поправкой на массивность, физические процессы строятся на упрощенных дифференциальных уравнениях, что позволяет вести ручной счет. В разделе 5.1.4 приводится интересная модель тем, что учитывается неравномерность температур по поперечному сечению насадки, неравномерность распределения теплоносителя учитывается расчетом изменения конвективной составляющей в зависимости от скоростей действительной и при равномерном распределении. Учет этого фактора актуален для ВН старой конструкции, современные нагреватели в этом не нуждаются, потому что неравномерность в них сводится к минимуму.

Разработана адаптивная цифровая динамическая модель ВН [7,8], основанная на представлении слоев насадки как объектов с сосредоточенными параметрами. Предложен алгоритм автоматического регулирования основных параметров работы ВН: температуры продуктов сгорания в подкупольном пространстве и температуры дутья, поступающего в доменную печь, с использованием методом оптимизации по количеству теплоты, которое аккумулируется насадкой и передается дутью.

Кошельник А.В. и др. [9] предложили математическую модель теплообмена в насадке регенератора, основанную на методе элементарных тепловых балансов, который реализовали с использованием явной схемы конечных разностей. Модель применима при реконструкции действующих и проектировании новых насадок высокотемпературных регенераторов.

В работе [10] предлагается модель теплообмена между потоком в канале и материалом насадки, в доменном ВН. Теплопереноса в канале описывается одномерным дифференциальным уравнением тепла для газа, перенос тепла в насадке описывается двумерным дифференциальным уравнением теплопереноса в твердом теле. Заметно сильное сходство с моделью из [5] и аналогию с [4].

**Цель работы** – разработать математическую модель насадки доменного ВН, учитывающую скорость и свойства теплоносителя, свойства материала насадки и возможность изменения его по высоте, в результате работы которой получить трехмерное

распределение температур, как в насадке, так и в теплоносителе. Кроме этого, модель должна быть способна работать в реальном времени, то есть учитывать скорость и температуру теплоносителя во времени.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- решение задачи гидродинамики. Принять течение ламинарным, получить алгоритм для расчета скоростей в канале насадки с учётом неравномерности теплофизических и гидродинамических коэффициентов.

- решение задачи термодинамики. Получить алгоритм для расчета теплопереноса в материале насадки и теплоносителя, и теплообмена между последними с учетом неравномерности теплофизических коэффициентов.

- реализовать в виде программы решение вышеперечисленных задач.

**Изложение основного материала.** Примем следующие допущения: насадка представляет собой упорядочено расположенные сплошные каналы, распределение теплоносителя по сечению насадки в период дутья и нагрева равномерно, течение теплоносителя в канале принимаем ламинарным, форма канала на всем протяжении одинакова.

Разделим насадку так, чтобы получить идентичные элементы, состоящие из части канала и части насадки (рис.1), при условии, что насадку можно собрать из конечного числа элементов. Вопрос постановки граничных условий рассмотрен при численном решении дифференциальных уравнений.

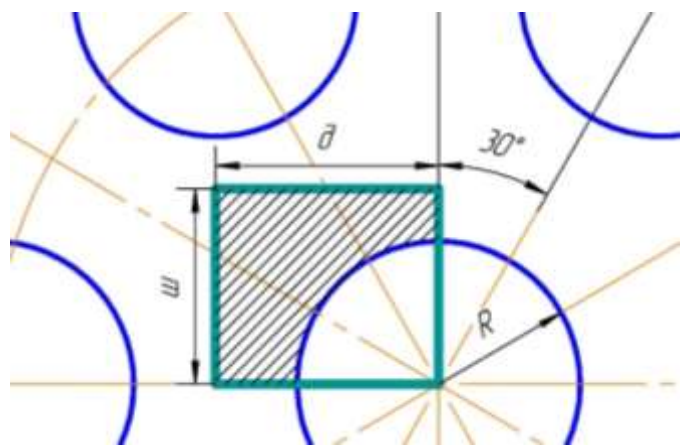


Рисунок 1 – Поперечное сечение насадки

при условии, что насадку можно собрать из конечного числа элементов. Вопрос постановки граничных условий рассмотрен при численном решении дифференциальных уравнений.

Материал насадки по высоте ВН различен, будем учитывать это в теплофизических коэффициентах и зависимостях. Свойства теплоносителя в режиме нагрева и дутье так же различны, поэтому будем задаваться соответствующими теплофизическими параметрами.

*Определение теплофизических свойств огнеупорных материалов насадки.* Тепловая работа и механические нагрузки насадки обуславливают требования к огнеупорам. Согласно требованиям насадку разбивают на несколько зон по высоте и для каждой из них применяют соответственный материал. При моделировании тепловой работы насадки необходимо учитывать состав материала, так как от него зависят теплофизические свойства. Ввиду этого свойства огнеупоров являются входными параметрами модели насадки.

Примем количество зон равное трем. Высокотемпературная зона состоит из динаса ДВ, среднетемпературная – шамот ШВ-42, низкотемпературная – шамот ШВ-37. Из источника [2] примем зависимости коэффициента теплопроводности и теплоемкость от температуры, и константу плотности.

Таблица 1 – Теплофизические свойства огнеупорных материалов

	Кажущаяся плотность, $\rho_m \text{ г/см}^3$	Теплопроводность $\lambda_m \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	Теплоемкость $c_m \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$
ДВ	1,85	$0,41 + 0,0013 \cdot t \cdot 10^{-4}$	$0,512 + 4,6 \cdot t \cdot 10^{-4}$
ШВ-42	2,3	$1,01 + 6,4 \cdot t \cdot 10^{-4}$	$0,871 + 1,46 \cdot t \cdot 10^{-4}$

ШВ-37	2,1	$0,887 + 1,86 \cdot t \cdot 10^{-4}$	$0,544 + 3,52 \cdot t \cdot 10^{-4}$
-------	-----	--------------------------------------	--------------------------------------

*Определение теплофизических и гидродинамических параметров теплоносителя.* Дымовые газы представляют собой смесь выхлопных, отходящих газов, продуктов горения топлива. Из источника [11] аппроксимированы следующие теплофизические свойства дымовых газов при нормальном атмосферном давлении: удельная (массовая) теплоемкость  $c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$ , теплопроводность  $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , динамическая вязкость  $\mu, \text{Па} \cdot \text{с}$ . Ввиду того что, дымовые газы сравнимы по своим свойствам с воздухом, получим зависимости теплоемкости, теплопроводности и вязкости от температуры для продуктов горения и воздуха:

$$c_p = 1,0355 + 0,0003 \cdot T - 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

$$\lambda = 2,2642 + 0,0086 \cdot T$$

$$\mu = 16,237 + 0,0419 \cdot T - 10^{-5} \cdot T^2$$

*Модель переноса тепла в элементе насадки ВН.* Математическая модель элемента насадки описывается дифференциальными уравнениями, описанными ниже. В статье [12] приводятся известные основные уравнения из гидродинамики и термодинамики для вязкого газа. Так как течение в канале принимаем ламинарным, то упростим уравнения из [12] и получим (1-3), где:

- проекция на ось  $x$  уравнения Навье-Стокса динамики вязкого газа

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

- уравнение неразрывности для одномерного случая

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

- уравнение тепла в потоке

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3)$$

Уравнение состояния записано в [12], а уравнение переноса энергии (тепла) в твердом материале возьмем из источника [13] (раздел 6.1).

Здесь  $x, y, z$  - пространственные координаты;  $t$  - время;  $u$  - скорость по оси "x";  $p$  - давление;  $\rho$  - плотность;  $c_p$  - теплоемкость;  $\lambda$  - теплопроводность;  $T$  - температура теплоносителя;  $R$  - газовая постоянная.

Полученные уравнения взаимосвязаны, так что решение одного невозможно без другого. Поэтому запишем последовательность действий потребные для численного решения: сначала вычисляется скорость  $u^{n+1}$  по уравнению (1), далее получение по уравнению (2) давления  $p^{n+1}$ , вычислив  $u^{n+1}$  и  $p^{n+1}$ , имеем все необходимое для расчета теплообмена, по уравнениям переноса тепла рассчитываются температуры в канале и насадке на  $n+1$  временном шаге, завершением будет уточнение плотности  $\rho^{n+1}$  по уравнению состояния.

Сложность уравнений заставляет обратиться к численным методам их решения. Выбор методов и разностных схем происходил из соображений применения данной модели в дальнейшей работе. В качестве разностной схемы принята чисто неявная, потому что имеет безусловную сходимость и адекватное поведение при больших временных шагах. Схемой расщепления выбрана локально-одномерная ввиду её простоты. Для решения одномерных

уравнений выбран метод прогонки как самый экономичный, так как при расчетах по этому методу требуется выполнить минимальное число арифметических операций.

Выбранные методы и схемы хорошо описаны в [14]. И достаточны для решения поставленной задачи, создания действующей модели и как продолжение применения её в подсистеме управления группы воздухонагревателей АСУ ТП доменной печи.

**Разработка программы моделирования группы ВН.** Задачи программы: моделировать работу  $N$ -го количества ВН, принимать управляющие воздействия от системы управления, передавать информацию системе управления необходимую для формирования управляющего воздействия, передавать данные информационной системе для отображения происходящей картины в целом.

Системы управления и информационная должны иметь отдельные потоки выполнения и общение с группой ВН только по специально созданным линиям связи.

На рисунке 2 изображена структурная схема, отвечающая поставленным задачам.

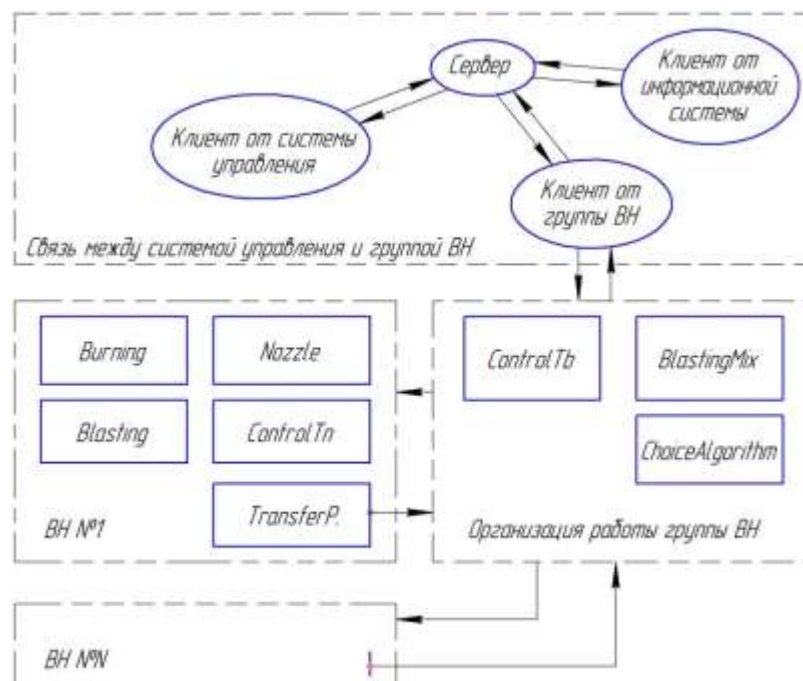


Рисунок 2 - Структурная схема работы группы воздухонагревателей

Взаимодействие программ: управляющей, информационной и группы ВН, реализуется по связи *TCP/IP*, клиент/серверной архитектуры, такое решение позволяет разделить выполнение программ на разные потоки и дает возможность разместить их на разных исполняющих машинах что, несомненно, приближает задумку к действительным условиям. Существенное влияние на выбор влияние оказал тот факт, что разработка основных программ ведется разными авторами. Осуществление связи решается четырьмя подпрограммами:

- клиент со стороны системы управления;
- клиент со стороны группы ВН;
- клиент со стороны *информационной системы*;
- сервер, связывает клиентов между собой.

Для того что бы управляющее сообщение вступило в силу, необходимо выполнить ряд действий, который зависит не только от полученного сообщения, но так же и от текущего состояния ВН. Выполнение алгоритма, выбирающего тот или иной набор

действий, возлагается на программу организации работы группы ВН (ControlGroup). Кроме этого на неё ложится расчет смешения дутьевого воздуха и локальная система регулирования температуры дутья. Программа ControlGroup, состоит из нескольких подпрограмм:

- регулирование температуры дутья (ControlTb);
- смешения дутья (BlastingMix);
- алгоритм выбора (ChoiceAlgorithm).

Состояние ВН в основных рабочих режимах, возможно, описать тремя блоками расчета физических процессов и двумя организационными. Программа моделирования ВН (AirHeater), состоит из нескольких подпрограмм, а именно:

- регулирование температуры верха насадки (ControlTn);
- расчет горения (Burning);
- расчет параметров дутья (Blasting);
- модель насадки (Nozzle);
- передача расчетных параметров (TransferParameters).

Задача программы AirHeater по заданию от программы ControlGroup рассчитать состояние модели на  $n + 1$  временном шаге.

Задание от ControlGroup поступает в виде требуемого режима работы ВН: «Нагрев», «Дутьё», «Отделение». Организационные моменты ложатся на ControlGroup. На рис. 3 приведена блок-схема расчета воздухонагревателя в разных режимах работы.

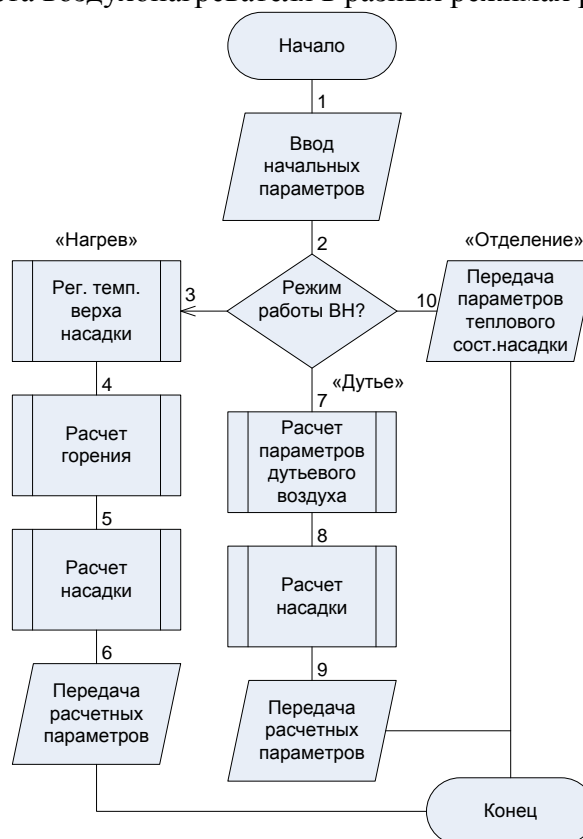


Рисунок 3 – Обобщенная блок-схема программы *AirHeater*

### *Описание программы AirHeater:*

Подпрограмма ControlTn принимает заданную температуру верха насадки и согласно принятой схемы регулирования рассчитывает расходы топлива и воздуха, которые являются входными параметрами для Burning. Температура и расход продуктов горения на входе в канал насадки получаем в результате работы Burning. Расчет насадки осуществляется

подпрограмою Nozzle по результатам роботи Burning. TransferParameters поизводит передачу вычисленных параметров в ControlGroup.

Подпрограмма Blasting рассчитана на дутьевой режим, в качестве входных параметров принимает расход дутья на данный ВН. Вычисляет скорость и температуру воздуха на входе в канал насадки. Далее действия аналогичны режиму «Нагрев».

В режиме «Отделение», вычислений не происходит, потому что не учитывается теплообмен с внешней средой. Подпрограмма TransferParameters передает последние расчетные параметры.

*Описание программы ControlGroup:* в ChoiceAlgorithm поступают параметры управления, согласно которым осуществляет расчет группы ВН. Получает расчетные параметры на следующем временном шаге, по ним выполняются BlastingMix и ControlTb, их результаты будут одними из входных для следующего временного шага.

Программа AirHeater, включает несколько подпрограмм, последовательность которых задается режимом работы ВН. На рисунке 3 изображена последовательность действий в том или ином режиме. Нужно сказать, что ввиду сложности физических процессов делается упор на расчет насадки, остальные части ВН упрощаются до минимума.

Тогда в режиме «Нагрев» для расчета насадки или входными параметрами подпрограммы Nozzle являются скорость, температура и давление в верхней части канала. Для получения этих параметров выполняется блок «расчет горения» или подпрограмма Burning. Входными параметрами, которой есть расход и температура доменного газа, температура воздуха и коэффициент смещения. Такие параметры, как температура, задаются постоянными, остальные рассчитывает блок «регулирования температуры верха насадки», т.к. температура купола не используется, поэтому используем температуру верха насадки.

Температура и расход продуктов сгорания рассчитывается по калорийности газа и коэффициенту смещения, температура которого умножается на некоторый эмпирический коэффициент и получается температура на входе в канал. Скорость же получается из уравнения неразрывности по имеющемуся расходу продуктов горения.

В режиме «Дутьё» происходит следующие: подпрограмма ControlTb передает в блок «расчет параметров дутьевого воздуха» расход и температуру дутья на входе в ВН, последний по уравнению неразрывности рассчитывает скорость на входе в канал. Далее меняется температурное поле верх-низ и рассчитывается состояние насадки в следующем времени.

Блок «взятие информации» служит для связи программы AirHeater с ControlGroup, по пройденному расчету выбирает данные и передает в ControlGroup. Этими данными будут в режиме «Нагрев» и «Дутьё» температуры низа и верха насадки, температура и расход теплоносителя на входе и выходе из насадки. В режиме «Отделение» передаются температуры низа и верха насадки. Набор передаваемых параметров может меняться в зависимости от принятой системы управления.

## ВЫВОДЫ

Предложена трехмерная математическая модель насадки доменного ВН, которая базируется на нелинейных дифференциальных уравнениях: Навье-Стокса для ламинарного течения, переноса тепла в потоке, переноса тепла в твердом теле, учитывающую зависимость свойств теплоносителя и материала насадки от температуры, зависимость плотности от скорости потока по уравнению неразрывности, а также зависимость давления от плотности и температуры потока по уравнению состояния.

Предлагаемая модель позволяет определять распределение температур в объеме и во времени, используя заданные свойства теплоносителя, а также различные по высоте свойства



материала насадки. Разработка велась с целью применения модели в подсистеме управления ВН АСУ ТП доменной печи.

Разработана структурная схема программы моделирования работы группы ВН доменной печи, описаны входящие в неё подпрограммы, их входные параметры и результаты работы. Схема составлена таким образом, чтобы иметь возможность оказывать управляющее воздействие как на группу ВН, так и на каждый ВН группы.

*Список использованных источников:*

1. Буткарев А.А. Буткарев А.П. Птичников А.Г. и др. Увеличение температуры горячего дутья доменных воздухонагревателей с помощью подсистемы оптимального управления // Сборник докладов международной научно-практической конференции. - Екатеринбург, 2015. – С. 182-197.
2. Шкляр Ф.Р. Малкин В.М. Каштанова С.П. и др. Доменные воздухонагреватели (конструкция теория режимы работы) // М.: Металлургия 1982. – 176 с. с ил.
3. Грес Л.П., Каракаш Е.А., Флейшман Ю.М. и др. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздухонагревателя // Металлургическая теплотехника: Сб. научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск: «ПП Грек О.С.», 2006. – С. 99-109.
4. Кобыш Е.И. Симкин А.И. Койфман А.А. Компьютерная модель работы доменного воздухонагревателя // Вестник приазовского государственного технического университета: Сб. науч. пр. – Мариуполь, 2012. – Вып. 25. – С. 239-245.
5. Хаджинов А.С. Хаджинов Е.А. Тищенко В.А. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздухонагревателя // Вестник приазовского государственного технического университета: Сб. науч. пр. – Мариуполь, 2010. – Вып. 20. – С. 154-159.
6. Соломенцев С.Л. Рациональные типы насадок и доменных воздухонагревателей // Липецк: ЛГТУ, 2001. – 432 с.
7. Маковский В.А. Незола В.И. Гулыга Д.В. Адаптивная цифровая динамическая модель воздухонагревателя доменной печи / В.А. Маковский, В.И. Незола, Д.В. Гулыга // Известия вузов. ЧМ. – 1976. – №3. – С. 24–26.
8. Маковский В.А. Цифровая модель блока воздухонагревателей доменной печи // Сталь. – 1973. – №5. С. 395–397.
9. Кошельник А.В. Лавинский Д.В. Хавин Е.В. и др. Разработка математической модели регенеративных теплообменников систем энерго- и теплоснабжения высокотемпературных теплотехнологических агрегатов // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – №16. – С. 124–131.
10. Muske, K.R. Blast furnace stove control // American control conference. – Philadelphia: Villanova University, 1998. – P. 24–25.
11. Михеев Основы теплопередачи // М.: Энергия 1977. – 344 с. с ил.
12. Зайцев А.В. Разработка алгоритма решения уравнений Навье-Стокса для течения криогенной жидкости в трубе // Вестник МАХ: – С. 37-42.
13. Ильченко О.Т. Левченко Б.А. Павловский Г.И. и др. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий // Х.: Вища шк., Изд-во при Харьк. ун-те. 1985. – 384 с.
14. Сиковский Д. Ф. Методы вычислительной теплофизики: учебное пособие // Новосиб. гос. ун-т. новосибирск, 2013. – 98 с.

## **ЧИСЕЛЬНО МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ПОВІТРОНАГРІВАЧА ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ В МОДЕЛЮВАННІ РОБОТИ ГРУПИ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ**

*Тема моделювання роботи повітрянагрівача доменної печі актуальна і сьогодні, дослідження в цій області проводилися багатьма вченими. Аналіз відомих публікацій описується на початку статті, робляться висновки про розроблених моделях, розглядаються прийняті допущення і їх наслідки.*

*Складність моделювання об'єкта змушує розділити його на складові частини, тому в даній статті розглядається лише насадка повітрянагрівача, горіння палива і теплообмін в камері горіння і куполі не розглядається. Обмеживши завдання наводиться мета роботи і що випливають з неї завдання.*

*Наводиться схема поділу насадки на більш дрібну придатну для економічного розрахунку область, але таку, яка не спотворює фізичного сенсу. Визначаються теплофізичні параметри теплоносія і матеріалу насадки. Далі математичний опис в диференціальних рівняннях фізичних процесів, що відбуваються в насадці повітрянагрівача в режимах «дутьтя» і «нагрів».*

*Розроблена структурна схема програмного забезпечення системи інформаційного супроводження та управління групою повітрянагрівачів, що включає регулювання температури, розрахунок горіння, розрахунок насадки, розрахунок параметрів дутьтьового повітря. Схема орієнтована на роботу повітрянагрівача у трьох режимах, а саме «нагрів», «дутьтя» та «відділення».*

*Описані способи взаємодії окремих програмних компонентів системи, структура програми управління групою з докладним описом окремих компонентів цієї програми.*

*Наводиться структурна схема програми моделювання роботи групи ВН доменної печі, описуються що входять до неї підпрограми, їх вхідні дані, основні ідеї функціонування при різних режимах роботи повітрянагрівача.*

*В кінці статті представлені основні висновки.*

**Ключові слова:** *доменний повітрянагрівач, насадка, теплофізичні властивості, теплоносії, рівняння Нав'є-Стокса, різницева схема, локально-одномірні схема, метод прогонки.*

**Zdrzdas D.S., Simkin O.I., Koifman O.O., Yuzvenko S.V.**

## **NUMERICAL-MATHEMATICAL MODEL OF NOZZLE OPERATION BLAST-FURNACE AIR HEATER AND ITS APPLICATION IN SIMULATION OF AIR HEATER GROUP OPERATION**

*Subject simulation of blast furnace stove is still relevant today, research in this area were carried out by many scientists. An analysis of well-known publications is described at the beginning of the article, conclusions are drawn about the developed models, the accepted assumptions and their consequences are considered.*

*The complexity of modeling an object makes it necessary to divide it into its component parts; therefore, this article considers only the checkerwork of an hot blast stove, fuel combustion and heat transfer in the combustion chamber and dome are not considered. Provides the purpose of the work and the tasks arising from it.*

*A scheme for splitting the checkerwork into a smaller region suitable for economic calculation is presented, but one that does not distort the physical meaning. Thermophysical parameters of the heat carrier and checkerwork material are determined. Further, the mathematical description in the differential equations of the physical processes occurring in the hot blast stove checkerwork in "on-gas" and "on-blast" periods.*

*A block diagram of the software for the system of information support and control of a group of hot blast stoves was developed, including temperature control, calculation of combustion, calculation of checkerwork, calculation of parameters of blast. The scheme is focused on the operation of the heater in three periods, namely, "on-gas", "on-blast" and "on-separation".*

*The described methods of interaction of individual software components of the system, the structure of the group management program with a detailed description of the individual components of this program.*

*The block diagram of the program for simulating the operation of the hot blast stove group of a blast furnace is given, the subroutines included in it, their input data, basic ideas of functioning under various operating modes of an hot blast stove are described.*

*At the end of the article, the main conclusions are presented.*

**Keywords:** *hot blast stove, checkerwork, thermophysical properties, coolant, Navier-Stokes equations, difference scheme, locally one-dimensional scheme, sweep method.*

Рецензент: доц., канд. техн. наук Кравченко В.П.

Статья поступила 12.11.2019.

УДК [669.189:621.746.047+62.71]:681.51

Койфман А.А., Грос А.А., Сушок О.О.

### УПРАВЛЕНИЕ ЗОНОЙ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНО ЛИТОГО СЛИТКА МНЛЗ

*Выделено четыре основных подхода, применяемых при управлении тепловым режимом зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок: регулирование соотношения «скорость разлива – расход охлаждающей воды», управление вторичным охлаждением на основании температур поверхности слитка перед входом в ЗВО и на ее выходе, регулирование температуры слитка в каждой секции на основании текущего значения температуры слитка в секции, использование математических моделей в динамическом управлении ЗВО. Управление процессом охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения с учетом процесса его кристаллизации в реальном времени путем расчета параметров кристаллизации и количества воды на секции является перспективным направлением. Данный подход позволяет оптимизировать расход воды на зону вторичного охлаждения при его оптимальном распределении по поверхности заготовки.*

*Разработан алгоритм расчета заданных значений расходов воды и воздуха в зависимости от кристаллизации заготовки, которые передаются в систему автоматического управления зоной вторичного охлаждения. На основании предложенного алгоритма разработано программное обеспечение в среде объектно-ориентированного программирования, позволяющее учитывать текущее тепловое состояние зоны вторичного охлаждения. В реальном времени в программу передаются текущие значения скорости вытягивания заготовки, температура поверхности заготовки перед ЗВО, уровень металла в кристаллизаторе. Значения статических коэффициентов можно изменять в определенных*