

4. Okhrimenko V.V. Narrow-band technology of communication of data on the electric systems / V.V. Okhrimenko // Electronic components and systems. – 2010. – № 2 – P. 21-30. (Rus.)
5. Okhrimenko V.V. Narrow-band technology of communication of data on the electric systems / V.V. Okhrimenko // Electronic components and systems. – 2010. – № 3 – P. 14-25. (Rus.)
6. Patent 09592 Ukraine, G 02 J 13/00. The structure scheme for determination of places of unapproved connection to a transmission line / L.A. Dobrovolskaja, E.A. Cherevko // № 47879; declared 18.09.2009; published 25.02.2010. – bul. № 4. – 4 p. (Ukr.)
7. Soldatkina L.A. The Electric networks and systems /L.A. Soldatkina. – М. : Energy, 1978. – 216 p. (Rus.)
8. Glazunov A.A. the Electric networks and systems / A.A. Glazunov. – М. : Gosenergoizdat, 1954. – 574 p. (Rus.)
9. Cherevko E.A., Intellectual sensor of current for automatic control of the modes of operations of settlement distributive electric networks / E.A. Cherevko, L.A. Dobrovolskaja // Reporter of Priazovskyi state technical university. Section : Technical sciences: Collection of scientific works. – Mariupol : SHEE «PSTU», 2011. – №. 2 (23). – P. 259-264. (Rus.)
10. Bessonov L.A. Theoretical bases of the electrical engineering / L.A. Bessonov. – М. : Higher school, 1984. – 559 p. (Rus.)

Рецензент: Ю.Л. Саенко  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.11.2012

УДК 669.162:519.687

©Кобыш Е.И.<sup>1</sup>, Симкин А.И.<sup>2</sup>, Койфман А.А.<sup>3</sup>

### КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

*Рассмотрен доменный воздухонагреватель, работающий в режиме нагрева насадки дымовыми газами и в режиме нагрева воздуха насадкой. Разработана и реализована на ПЭВМ математическая модель, основанная на расчете горения топлива и решении задачи теплообмена между неподвижным слоем насадки и газом-теплоносителем с известными начальными и граничными условиями, а также с исследованием сходимости теплового баланса. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и данных, полученных на основании работы компьютерной модели.*

**Ключевые слова:** Доменный воздухонагреватель, насадка, купол, газ-теплоноситель, теплообмен, компьютерная модель.

**Кобиш О.І., Сімкін О.І., Койфман О.О. Комп'ютерна модель доменного повітрянагрівача.** Розглянуто доменний повітрянагрівач, що працює в режимі нагріву насадки димовими газами і в режимі нагріву повітря насадкою. Розроблена і реалізована на ПЕОМ математична модель, заснована на розрахунку горіння палива та вирішенні задачі теплообміну між нерухомим шаром насадки і газом-теплоносієм з відомими початковими і граничними умовами, а також із дослідженням збіжності теплового балансу. Проведено порівняльний аналіз експериментальних даних і даних, отриманих на основі роботи комп'ютерної моделі.

**Ключові слова:** Доменний повітрянагрівач, насадка, купол, газ-теплоносій, теплообмін, комп'ютерна модель.

<sup>1</sup> магистрант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*O.I. Kobysh, O.I. Simkin, O.O. Koifman. Computer model of blast stoves. Considered hot blast stoves operating in the heating mode nozzles flue gases in heating mode air nozzle. Developed and implemented on a PC mathematical model based on the calculation of fuel combustion and solving the problem of heat exchange between the fixed nozzle and gas-heat transfer agent with known initial and boundary conditions, as well as the study of convergence of the heat balance. Considered a comparative analysis of experimental data and data obtained on the basis of a computer model.*

**Keywords:** hot blast stoves, nozzle, dome, gas, heat transfer, computer model.

**Постановка проблеми.** Одним из факторов стабильности теплового режима доменной печи является постоянство температуры дутья, нагрев которого осуществляется блоком доменных воздухонагревателей (кауперов), каждый из которых представляет собой теплообменный аппарат регенеративного типа. Изучение закономерностей внешнего и внутреннего теплообмена внутри каупера позволяет достичь рационального использования энергии газа-теплоносителя и аккумулирующей способности насадки.

Модель работы каупера включает расчет горения топлива, оценку параметров дымовых газов и насадки во время нагрева насадки, а также параметров воздуха и насадки в период нагрева воздуха.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] рассмотрены расчет горения топлива и описана математическая модель нагрева и охлаждения насадки. Расчет горения топлива предполагает определение количества воздуха, необходимого для горения, температуры горения, а также количества и состава продуктов сгорания. В соответствии со всеми вышеперечисленными параметрами производится дальнейшее решение задачи моделирования тепловых процессов, происходящих непосредственно в насадке каупера при нагреве и охлаждении. Математически сформулирована система дифференциальных уравнений противоточного регенеративного теплообмена. Наряду с некоторыми важными преимуществами, следует заметить, что приведенная модель упрощенная и имеет недостатки: допущение о том, что насадка имеет форму одноразмерного тела и использование постоянной температуры газовой среды во времени.

Компенсировать некоторые из перечисленных недостатков позволяет математическая модель, предложенная в работе [2]. Данная модель предполагает решение системы уравнений, описывающих регенеративный теплообмен с учетом прогрева насадки по толщине кирпича, что позволяет решать задачи, как внешнего теплообмена, так и внутреннего. Аналогичный подход к рассмотрению теплообменных процессов в насадке доменного воздухонагревателя применяется и в компьютерной модели, реализованной авторами.

Математическая модель для определения температурных полей в насадке воздухонагревателя, представленная в работе [3], учитывает также и распределение теплоносителей по радиусу насадки, но для отображения действительной картины теплообмена данная модель усложняется расчётом коэффициента местного сопротивления при повороте в подкупольном пространстве.

В работе [4] с учетом теплового несовершенства зоны сжигания предложено использование пирометрического коэффициента, который отражает действительную температуру, развивающуюся в рабочем пространстве печи. Температура продуктов сгорания на входе в насадку существенно отличается от температуры в зоне горения, поэтому использование данного пирометрического коэффициента является целесообразным.

**Цель работы** – Целью данной статьи является разработка и реализация на ПЭВМ комплексной математической модели работы доменного воздухонагревателя с учетом математических зависимостей, характеризующих физические процессы, происходящие при регенеративном теплообмене, а также сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования. Дополнительно была исследована сходимість теплового баланса работы каупера.

**Изложение основного материала.** Исходными данными для расчета горения топлива являются: вид топлива, конструкция топливосжигающего устройства, влияющая на выбор величины коэффициента расхода воздуха и допустимого недожога топлива, а также температуры подогрева воздуха и газа.

В качестве топлива применяется доменный газ. Теплота сгорания доменного газа определяется следующим образом [1]:

$$Q_{\text{нод}}^p = 127,7CO + 108H_2 + 358CH_4 + 234H_2S, \quad (1)$$

где  $CO$  и т.д. – процентное содержание горючих компонентов в топливе;  
127,7 – теплота сгорания  $CO$ .

Стехиометрическое количество воздуха определяется по уравнению [1]:

$$L_o = 0,0476 \cdot \left[ 0,5(CO + H_2 + 3H_2S) + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \quad (2)$$

где  $CO$ ,  $H_2$  и т.д. – объемные проценты компонентов газообразного топлива, %;  
 $m$ ,  $n$  – коэффициенты, равные значениям индексов газов.

Общее теоретическое количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 м<sup>3</sup> топлива [1]:

$$V_o^m = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}, \quad (3)$$

где  $V_{CO_2}$  – количество  $CO_2$  в продуктах сгорания;

$V_{N_2}$  – количество азота в продуктах сгорания;

$V_{H_2O}$  – количество водяных паров в продуктах сгорания;

$V_{O_2}$  – количество избыточного кислорода в продуктах сгорания.

Начальное распределение температур материала насадки принято линейным и представляет собой функцию расстояния от верха насадки и расстояния от поверхности теплообмена с газом-теплоносителем. Температура дымовых газов на входе в насадку определяется из расчета горения топлива с учетом пирометрического коэффициента, характеризующего тепловые особенности рабочего пространства каупера как регенеративного теплообменника.

Нагрев насадки происходит до момента достижения температуры низа насадки 400 °С.

Математически данная задача представляет собой систему уравнений следующего вида [2]:

$$\begin{cases} \rho V \frac{dT_z}{d\tau} = -\alpha F (T_z - T_1), \\ c\rho V \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha F_1 (T_z - T_1) + \frac{\chi}{\delta} (T_2 - T_1) F_2, \\ \vdots \\ c\rho V \frac{dT_i}{d\tau} = \frac{\chi}{\delta} F_i (T_{i-1} - T_i) + \frac{\chi}{\delta} (T_{i+1} - T_i) F_{i+1}, \\ \vdots \\ c\rho V \frac{dT_n}{d\tau} = \frac{\chi}{\delta} F_n (T_{n-1} - T_n), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи газа,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;

$V$  – объем газа, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность газа,  $\frac{кг}{м^3}$ ;

$C$  – теплоемкость газа,  $\frac{Дж}{м^3 \cdot К}$ ;

$\chi$  – коэффициент теплопроводности кирпича насадки,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

$\delta$  - шаг по толщине насадки, м;

$T_g$  - температура газа, °C;

$T_1$  - температура поверхности насадки, °C;

$T_2$  - температура следующего слоя по толщине насадки, °C;

$F_1$  - поверхность теплообмена первого слоя с газовой средой, м<sup>2</sup>;

$F_2$  - поверхность теплообмена первого слоя с последующим слоем, м<sup>2</sup>.

Высота насадки каупера предварительно разбивается на определенное количество участков, для каждого из которых решается система уравнений (4). Первое уравнение в системе (4) представляет собой уравнение теплообмена между газом-теплоносителем и поверхностью насадки. Второе уравнение, представленное в системе, является уравнением баланса тепла для поверхности насадки. Следующие уравнения, содержащиеся в системе (4), характеризуют баланс тепла для каждого  $i$ -того слоя по толщине насадки. Последний,  $n$ -й слой, согласно условиям симметрии, принимается теплоизолированным и не осуществляет передачу тепла далее по толщине насадки. Считается, что неподвижный слой насадки и газ-теплоноситель не имеют дополнительных источников тепла.

Подобным образом реализована математическая модель нагрева воздуха насадкой. После нескольких циклов последовательного моделирования работы каупера компьютерная модель достигает установившегося режима. Результаты работы модели представлены на рисунках 1-3.

Существенное влияние на точность модели оказывают такие параметры, как точность решения системы дифференциальных уравнений (4), точность аппроксимации теплофизических характеристик газовой среды, а также выбор пирометрического коэффициента, определяющего температуру купола. Тепловой баланс модели был рассчитан по уравнениям, приведенным в работе [5]. Расхождение теплового баланса в среднем составило 2,3%.

Разработанная компьютерная модель может быть включена в программное обеспечение верхнего уровня АСУ ТП подготовки доменного дутья на блоке воздушнонагревателей доменной печи для оценки теплового состояния каждого из воздушнонагревателей и реализации алгоритмов управления каупером.

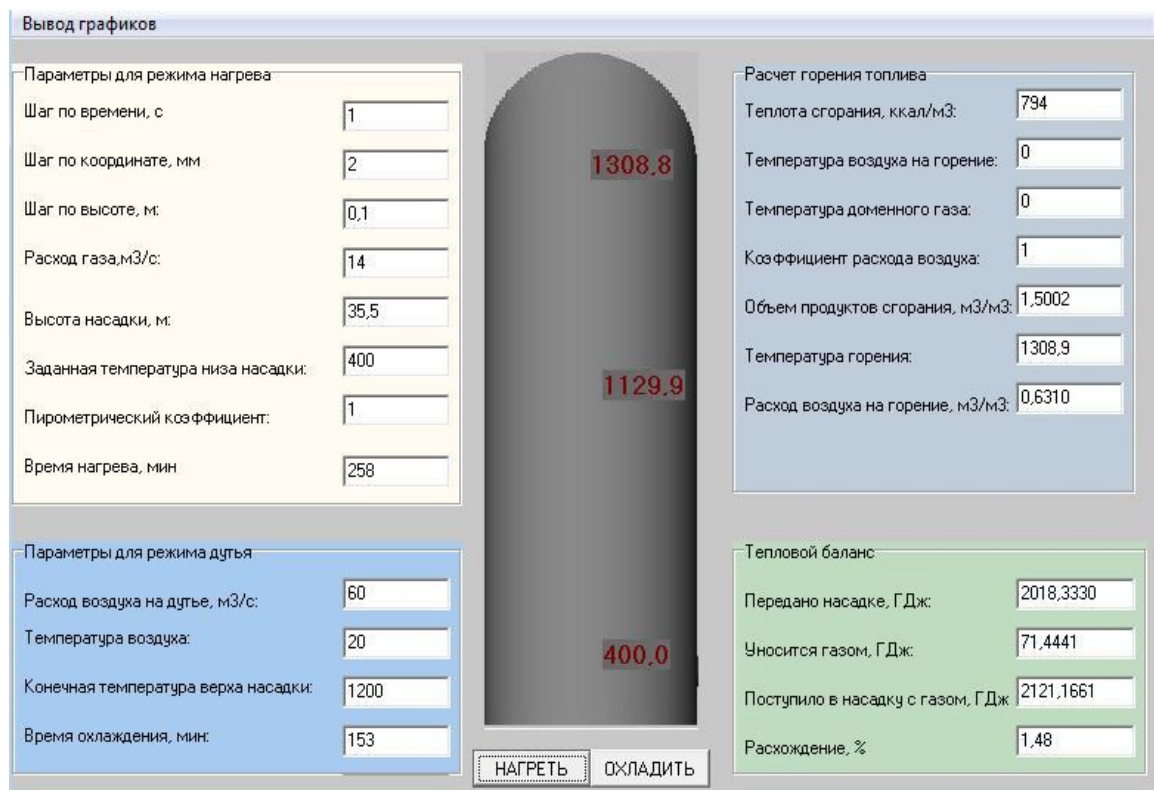


Рис. 1 – Интерфейс компьютерной модели работы доменного воздушнонагревателя

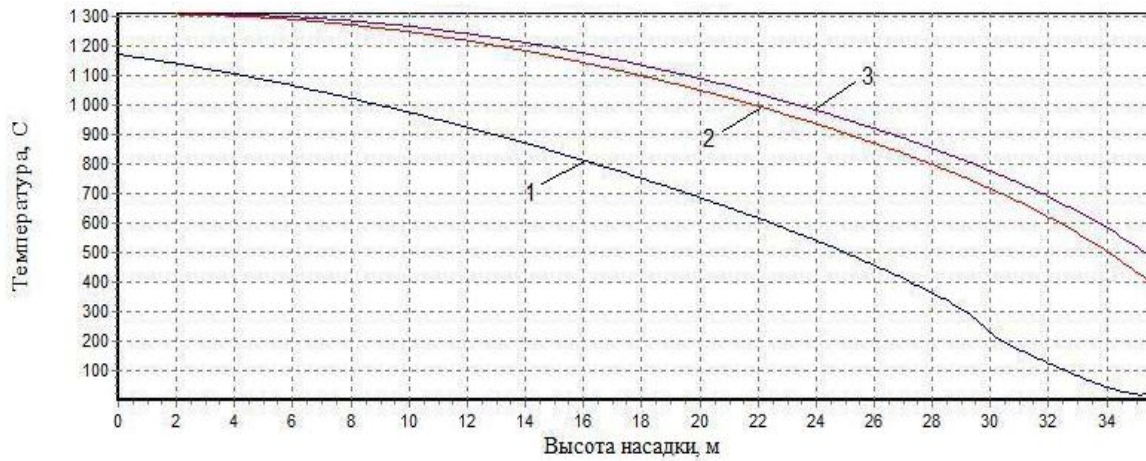


Рис. 2 – Распределение температуры по высоте насадки: 1 – температура материала насадки в конце периода нагрева воздуха; 2 – температура материала насадки в конце периода нагрева насадки; 3 – температура дымовых газов в конце периода нагрева насадки

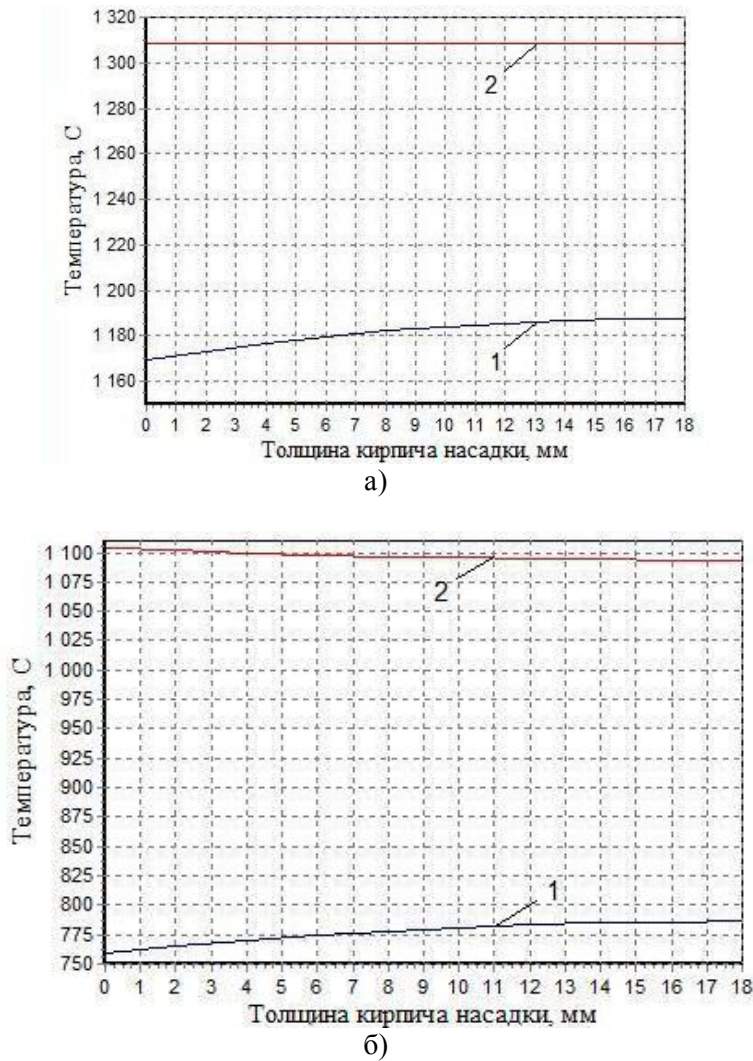


Рис. 3 – Распределение температуры по толщине насадки: 1 – температура материала насадки в конце периода нагрева воздуха; 2 – температура материала насадки в конце периода нагрева насадки а – верх насадки; б – середина насадки

Был произведен сравнительный анализ данных, полученных в результате моделирования, и экспериментальных данных работы блока воздухонагревателей ДП №3 ПАО “Азовсталь” с учетом особенностей конструкции каждого воздухонагревателя. Результаты представлены в таблице.

Таблица

Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования

Параметр	ВН11		ВН11БИС		ВН9	
	Эксперимент	Модель	Эксперимент	Модель	Эксперимент	Модель
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
Время нагрева насадки, мин	227	235	226	239	215	222
Время нагрева воздуха, мин	155	161	146	156	158	163
Расхождение баланса тепла, %	-	1,8	-	2,5	-	2,6

#### Выводы

1. На основе решения системы уравнений теплообмена в неподвижном слое разработана компьютерная модель работы доменного воздухонагревателя, включающая расчеты нагрева насадки каупера газом-теплоносителем, нагрева воздуха насадкой и расчет горения топлива.
2. На основе анализа результатов моделирования сделан вывод о том, что в верхних слоях насадки осуществляется равномерный прогрев по толщине кирпича, а при увеличении расстояния от верха насадки прогрев кирпича по толщине становится менее равномерным: разница между поверхностью и центром может составлять 10-20 °С.
3. Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования показал, что разница времени нагрева насадки составляет в среднем 9 мин., а разница времени нагрева воздуха составила 6 мин.
4. Расхождение баланса тепла не превышает 3%, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

#### Список использованных источников:

1. Шкляр Ф.Р. Доменные воздухонагреватели. Конструкция, теория, режимы работы / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каштанова. - Москва: Металлургия, 1982. – 176 с.
2. Соломенцев С.Л. Математическая модель теплообмена в насадке воздухонагревателя / С.Л. Соломенцев, В.Д. Коршиков, С.М. Басукинский // Известия вузов. Черная металлургия. - 1985. – №7. - С 142-144.
3. Бянкин И.Г. Математическая модель теплообмена в насадке воздухонагревателя / И.Г. Бянкин, С.В. Скаков, А.Ю. Кривцов // Известия вузов. Черная металлургия, 2006. – №7. - С 52-55.
4. Тимошпольский В.И. Промышленные теплотехнологии / В.И. Тимошпольский, А.П. Нещенчук, И.А. Трусова.- Минск : Вышэйшая школа, 1998.- 422 с.
5. Койфман А.А. Тепловой баланс регенеративного теплообменника, работающего под давлением / А.А. Койфман, А.И. Симкин, А.А. Томаш // Вісник приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2009. – Вип. 19. - С 203-306.

#### Bibliography:

1. Shklyar F.R. Blast stoves. Construction, theory, operation / F.R. Shklyar, V.M. Malkin, S.P. Kashtanova. – Moscow: Metallurgy, 1982. – 176 p. (Rus.)
2. Solomentsev S.L. Mathematical model of heat transfer in the nozzle heater / S.L. Solomentsev, V.D. Korshikov, S.M. Basukinsky // Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya, 1985 – №7. –

- P. 142-144. (Rus.)
3. Byankin I.G. Mathematical model of heat transfer in the nozzle heater / I.G. Byankin, S.V. Skakov, A.U. Krivtsov // *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2006. – №7. – P. 52-55. (Rus.)
  4. Timoshpolsky V.I. Industrial thermal technology / V.I. Timoshpolsky, A.P. Nesenчук, I.A. Trusov. – Minsk : Higher School, 1998. – 422p. (Rus.)
  5. Koifman A.A. The heat balance of the regenerative heat exchanger, pressure vessels / A.A. Cojfmán, A.I. Simkin, A.A. Thomash // *Vіsник priazovs'kogo derzhavnogo tekhnіchnogo unіversitetu: Header of scientific works.* - Mariupol, 2009 - № 19. – P. 203-306. (Rus.)

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

Статья поступила 31.10.2012