

УДК 669.162:519.687

О. І. Кобиш, О. І. Сімкін

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ГАЗУ-ТЕПЛОНОСІЯ В КОМП'ЮТЕРНІЙ МОДЕЛІ НАГРІВУ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ПОВІТРОНАГРІВАЧА

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь

Анотація. В роботі проаналізовано процеси теплообміну при нагріві та охолодженні насадки доменного повітрянагрівача як регенеративного апарату. Проведено ідентифікацію параметрів газу-теплоносія з визначенням дійсного об'єму газового середовища в поточному шарі насадки шляхом дроблення часового кроку в процесі комп'ютерного моделювання. Розрахунок обсягу рухомого газу-теплоносія, ускладнений зміною швидкості газового середовища в залежності від поточної температури, дозволяє визначити кількість тепла, яке отримає доменне дуття при роботі повітрянагрівача в режимі нагріву дуття. У статті досліджено збіжність теплового балансу насадки та проведено порівняльний аналіз результатів моделювання з експериментальними даними, на основі чого зроблено висновок про адекватність та достовірність розробленої комп'ютерної моделі.

Ключові слова: доменний повітрянагрівач, газ-теплоносій, комп'ютерна модель, тепловий баланс.

Аннотация. В работе проанализированы процессы теплообмена при нагреве и охлаждении насадки доменного воздушнонагревателя как регенеративного аппарата. Проведена идентификация параметров газа-теплоносителя с определением действительного объема газовой среды в текущем слое насадки путем дробления временного шага в процессе компьютерного моделирования. Расчет объема подвижного газа-теплоносителя, осложненный изменением скорости газовой среды в зависимости от текущей температуры, позволяет определить количество тепла, которое получит доменное дутье при работе воздушнонагревателя в режиме нагрева дутья. В статье исследованы сходимость теплового баланса насадки и проведен сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными, на основе чего сделан вывод об адекватности и достоверности разработанной компьютерной модели.

Ключевые слова: доменный воздушнонагреватель, газ-теплоноситель, компьютерная модель, тепловой баланс.

Abstract. The paper analyzes the processes of heat exchange in the heating and cooling nozzle blast stove as a regenerative system. The identification of the parameters of the gas-coolant with the determination of the actual volume of the gas in the current layer of the nozzle by fragmentation of the time step in the process of computer simulation has been carried out. Calculation of the volume of the moving gas-coolant, complicated by changing the speed of the gas, depending on the current temperature, allows you to determine the amount of heat that blast furnace blasting will receive when operating the air heater in blast heating mode. This article explores the convergence heat balance tips and the comparative analysis of simulation results with experimental data, based on which concludes the adequacy and accuracy of developed computer model.

Key words: hot blast stove, gas-coolant, computer model, heat balance.

Вступ

Для забезпечення якісного управління роботою групи повітрянагрівачів (далі – ПН) виникає необхідність математичного опису процесів, які відбуваються при функціонуванні ПН в різних режимах [1]. Найбільший інтерес представляє дослідження насадки ПН, яка є основним елементом конструкції регенеративного апарату з точки зору акумулювання і передачі теплової енергії газовому середовищу, яке нагрівається. Опис процесів, протікаючих в насадці ПН стає можливим при використанні математичних моделей нагріву та охолодження насадки. При вирішенні задачі математичного моделювання нагріву насадки ПН виникає необхідність визначення значень параметрів, які безпосередньо впливають на ефективність роботи апарату. Вказаними параметрами є температура і об'єм продуктів згорання, які здійснюють теплообмін з насадкою ПН.

Актуальність

При математичному описі теплообмінних процесів в насадці ПН, одним з найбільш складноідентифікованих параметрів є поточний обсяг газу-теплоносія, який приймає участь в теплообміні з певним об'ємом насадки за розрахунковий інтервал часу, що викликано зміною швидкості руху газу-теплоносія крізь ділянки насадки по висоті, які знаходяться в різних температурних умовах. Визначення дійсної кількості газу-теплоносія на кожній ділянці насадки в кожен розрахунковий інтервал часу теплообміну грає ключову роль при моделюванні процесів нагріву та охолодження насадки і обов'язково повинно бути враховано в математичних моделях теплообмінних процесів.

Математична модель, запропонована в роботі [2], де завдання теплообміну, вирішене на кінцево-різницевої сітці, максимально наближена до дійсних умов роботи ПН шляхом врахування зміни швидкості руху газу-теплоносія. При реалізації зазначеної моделі запропоновано використовувати змінний крок по висоті насадки, величина якого залежить від поточної швидкості руху газового середовища. Даний підхід суттєво підвищує точність моделювання за рахунок використання достовірних даних про параметри газу-теплоносія при розрахунку елементарних теплових балансів на кожному шарі насадки. До недоліків зазначеної моделі слід віднести можливість виникнення невідповідності між шарами по висоті

насадки в різні часові етапи нагріву або охолодження, що пояснюється зміною швидкості газу-теплоносія не тільки по висоті насадки, але і за часом. Найбільші труднощі пов'язані з дотриманням умов періодичності роботи ПН при зміні напрямку умовної осі, вздовж якої відбувається рух газу-теплоносія по каналах насадки, і прийнятті розподілу температури по висоті, кінцевого для періоду нагріву насадки, в якості початкового для періоду нагріву дуття.

Для ПН, працюючого в умовах підвищеного тиску газу-теплоносія, реалізована математична модель, заснована на рішенні завдання Шумана [3]. Визначення відносних температур газу і матеріалу насадки при моделюванні теплообміну в нерухомому шарі здійснюється за допомогою функцій Бесселя [4]. В роботі [3] представлений алгоритм розрахунку параметрів газового середовища і насадки з обчисленням коефіцієнтів, які враховують стан насадки. Підвищення тиску газу-теплоносія запропоновано в якості способу інтенсифікації процесу нагріву дуття.

Математична модель, яка описує теплообмінні процеси в насадці ПН, представлена в роботі [5] поряд з моделлю управління нагрівом насадки. Функціонування комплексу моделей дозволяє отримувати необхідну кількість дуття заданої температури з мінімальними витратами палива, яке складається з доменного газу як основного палива, і природного газу, що використовується в якості висококалорійної добавки.

Розглянуті математичні моделі процесів теплообміну при нагріві і охолодженні насадки мають один спільний недолік, пов'язаний з використанням усередненого значення параметрів газу-теплоносія в продовжних по висоті шарах насадки. Пропозиція щодо уточнення теплофізичних характеристик газового середовища шляхом зміни розрахункового кроку по висоті насадки [2] також пов'язана з рядом труднощів, які виникають при погодженні розбиття насадки на шари в різні часові інтервали процесу теплообміну.

Мета

Мета статті – підвищення точності комп'ютерного моделювання роботи доменного повітрянагрівача шляхом визначення дійсного об'єму газу-теплоносія при теплообміні з насадкою в режимах нагріву насадки та нагріву дуття.

Задачі

1. Проаналізувати теплообмінні процеси, які протікають в насадці доменного повітрянагрівача.
2. Визначити залежність об'єму газу-теплоносія, який знаходиться в поточному шарі насадки по висоті в розрахунковий інтервал часу, від швидкості руху газу-теплоносія з урахуванням температури і тиску.
3. Реалізувати комп'ютерне моделювання нагріву та охолодження насадки доменного повітрянагрівача з оцінкою достовірності роботи комп'ютерної моделі на основі експериментальних даних.

Розв'язання задач

Традиційне функціонування ПН здійснюється шляхом циклічного повторення режимів нагріву насадки і нагріву дуття. Цикл роботи ПН починається з режиму нагріву насадки, в процесі якого через пальник в камеру згорання подаються компоненти горіння: газоподібне паливо і повітря. Димові гази через підкупольний простір потрапляють в насадку і починають рух по вертикальних каналах зверху вниз, поступово охолоджуючись в результаті теплообміну з цеглою насадки. За режим нагріву насадка накопичує певну кількість теплоти, яка передається доменному дуттю в режимі нагріву дуття. Нагрів насадки відбувається до моменту досягнення низом насадки температури 400 °С, після чого проводиться переключення ПН в режим нагріву дуття. В процесі нагріву насадки здійснюється зовнішній теплообмін між гарячим середовищем, представленим димовими газами, і холодним середовищем – цеглою насадки.

Управління процесом нагріву насадки ПН відбувається в виробничих умовах, викликаних сукупністю певних факторів, одним з яких є особливість визначення поточної калорійності доменного газу як основного палива [6]. З урахуванням того, що склад доменного газу не постійний і змінюється в реальному часі під впливом багатьох факторів, які характеризують процеси, що відбуваються в доменній печі при виплавці чавуну, поточне значення теплоти згорання доменного газу при опаленні ПН також змінюється. У виробничих умовах безперервний контроль калорійності доменного газу не здійснюється. Визначення теплоти згорання доменного газу відбувається двічі на добу в лабораторних умовах, тому отримання актуальної інформації про поточне значення теплоти згорання доменного газу можливе лише шляхом проведення відповідних розрахунків [7].

Температура димових газів контролюється лише на вході та на виході з насадки, тому для оцінки температури насадки по висоті виникає необхідність розробки математичних моделей нагріву та охолодження насадки. В якості керуючого впливу в процесі управління нагрівом насадки може виступати витрата доменного газу у випадку опалення лише доменним газом та витрата висококалорійної добавки до палива у разі використання газової суміші з основного палива та висококалорійної добавки. Для забезпечення безперервної подачі дуття у доменну піч розрахунок керуючого впливу при управлінні нагрівом насадки здійснюється на основі інформації про поточний температурний стан насадки та прогнозований

час перебування ПН в кожному з режимів роботи. Тому, розроблена комп'ютерна модель складається з чотирьох взаємопов'язаних модулів, згрупованих на два головні блоки: інформаційний та блок управління, як показано на рис. 1.

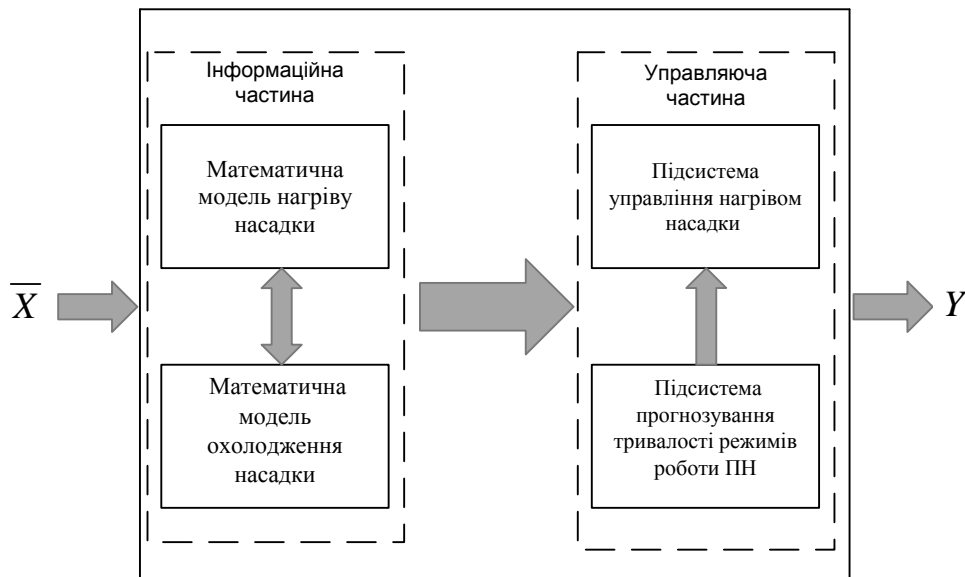


Рисунок 1 – Структура комп'ютерної моделі роботи ПН

Вектор вхідних параметрів моделі \bar{X} складається з параметрів палива та конструкційних характеристик насадки. Виходячи з циклічності роботи ПН постановлено, що результат моделювання нагріву насадки, представлений кінцевим розподілом температур по висоті насадки, є початковим при моделюванні охолодження насадки, кінцевий розподіл температур якого є початковим для моделювання нагріву. Дані про поточний температурний стан насадки передаються в підсистему прогнозування тривалості режимів роботи ПН [8] та безпосередньо в підсистему управління нагрівом насадки, діючи на основі нечіткої бази знань, правила якої задають залежність необхідної поточної витрати висококалорійного палива від температури насадки та часових показників роботи ПН, що дозволяє запобігти недостатньому нагріву насадки на момент переключення ПН в режим нагріву дуття.

Визначення температури насадки по висоті здійснюється на основі розрахунку кількості тепла, отриманого насадкою від газу-теплоносія, для чого виникає необхідність оперативного визначення поточного обсягу газу на кожному шарі насадки по висоті. При моделюванні теплообміну між насадкою та газом-теплоносієм здійснюється розрахунок основних теплофізичних параметрів обох середовищ, які приймають участь в теплообмінних процесах [9]. Найбільший інтерес представляють дані, що дозволяють судити про поточний температурний стан насадки і газу-теплоносія. Для визначення температури газового середовища і насадки виникає необхідність вирішення задачі зовнішнього теплообміну між насадкою та газом-теплоносієм, а також рішення задачі теплопровідності усередині насадки ПН. На основі рівнянь теплового балансу для всіх попередньо сформованих шарів насадки по висоті вирішується система диференціальних рівнянь [9].

Для визначення дійсного обсягу газу, який приймає участь в теплообміні, виникає потреба розрахунку швидкості руху газу-теплоносія, яка змінюється по висоті насадки, що обумовлено зміною температури газу-теплоносія [10]. Швидкість газу, який проходить через канал насадки ПН, приведена до нормальних умов, визначається за рівнянням:

$$w = \frac{F_{z.k.}}{S_k} \cdot \frac{(T_z + 273)}{273} \cdot \frac{0,1013}{P_z}, \quad (1)$$

де $F_{z.k.}$ - витрата газу-теплоносія через один канал насадки, м³/с; S_k - площа каналу насадки, м²; P_z - тиск продуктів згорання, МПа, 273 - температура продуктів згорання при нормальних умовах, К, 0,1013- тиск продуктів згорання при нормальних умовах, МПа

Кількість шарів по висоті насадки, які проходить газ-теплоносій за час dt розраховується наступним чином:

$$n = \frac{w \cdot d\tau}{dy},$$

де dy - висота шару насадки, для якого вирішується задача теплообміну, м;

З огляду на рівняння (1), доцільно змінити часовий крок до значення, відповідного часу перебування певного обсягу газу-теплоносія в просторі каналу поточного шару насадки, обмеженого висотою dy :

$$d\tau_i = \frac{d\tau}{n}.$$

Тоді обсяг газу-теплоносія, який приймає участь в теплообміні, знаходиться за рівнянням:

$$V_{z.} = F_{z.к.} d\tau_i.$$

Обсяг насадки як нерухомого середовища, яке приймає участь в теплообміні, визначається в залежності від геометричних особливостей будови каналів насадки. Для блоків насадки з круглим перетином каналів кожен шар насадки по товщині має форму циліндра з осьовим отвором. Причому, діаметр отвору для поверхневого шару насадки дорівнює діаметру каналу насадки, по якому рухається газ-теплоносій, а для кожного наступного шару по товщині насадки даний діаметр збільшується на величину, рівну подвоєному кроку по товщині насадки, тобто подвійній довжині кожного шару. Отже, обсяг i -го шару насадки по товщині визначається наступним чином:

$$V_i = ((d + i \cdot 2\delta)^2 - (d + (i-1) \cdot 2\delta)^2) \frac{\pi}{4} dy, \quad i=1 \dots m,$$

де i – номер розрахункового шару по товщині цегли насадки, m – кількість шарів по товщині насадки.

Для каналів насадки, які мають циліндричну форму з діаметром d , поверхня теплообміну між цеглою насадки і газом-теплоносієм розраховується як площа бічної поверхні циліндра:

$$F_i = \pi d \cdot dy.$$

Площа поверхні теплообміну між двома сусідніми шарами для насадки з круглими каналами також визначається як площа бічної поверхні циліндра, але діаметр зазначеного циліндра збільшується для кожного шару по товщині вглиб насадки. Через поверхню, яка охоплює останній шар, теплообміну не відбувається, тому що останній шар прийнятий теплоізолюваним за умовою симетрії. Для визначення площі поверхні теплообміну між i -м та $i+1$ -м шаром по товщині цегли використовується вираз:

$$F_{i+1} = \pi(d + i \cdot 2\delta)dy$$

Теплоємності газу-теплоносія і насадки являють собою функції температури газу і температури насадки відповідно. Визначення поточної теплоємності газу-теплоносія здійснюється за допомогою апроксимації довідкових даних [11].

Аналогічним чином реалізована математична модель нагріву дугтя насадкою [9]. Відмінною особливістю моделювання процесу нагріву дугтя є зміна ролей «гарячого» і «холодного» середовищ: насадка виступає в ролі «гарячого» середовища, а газ-теплоносій, яким є дугтя, стає «холодним» середовищем. Також при моделюванні режиму нагріву дугтя враховується зміна напрямку руху газу-теплоносія. Між режимами роботи ПН існує часовий інтервал тривалістю 5-7 хвилин, протягом якого відбувається переключення ПН в інший режим роботи шляхом зміни положення відповідних регулюючих органів на трубопроводах газу та повітря. При комп'ютерному моделюванні прийнято, що під час переключення режимів роботи ПН здійснюється теплообмін теплопровідністю всередині насадочної цегли, що призводить до більш рівномірного розподілу температури по перетину насадки. Після декількох циклів послідовного моделювання роботи ПН комп'ютерна модель досягає усталеного режиму.

Група ПН доменної печі складається з чотирьох апаратів, функціонування комп'ютерної моделі для кожного з яких, дозволяє при управлінні нагрівом насадки враховувати поточний температурний стан всіх ПН групи. Відеокадри роботи комп'ютерної моделі для групи ПН наведено на рис. 2.

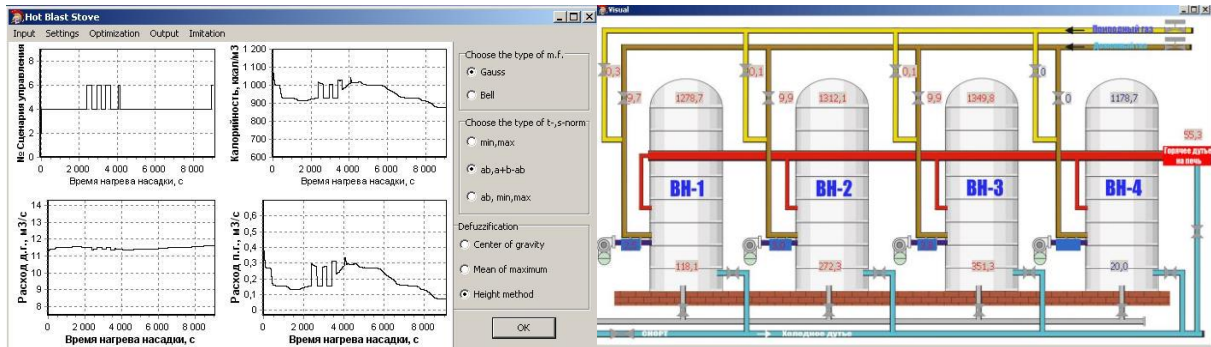


Рисунок 2 – Відеокадри роботи комп'ютерної моделі групи ПН

Результати розрахунку теплового балансу [12], який враховує загальну кількість тепла насадки ($Q_{нас}$), а також кількість тепла газу на вході ($Q_{пр}$) та на виході ($Q_{омх}$) з насадки для десяти циклів роботи ПН наведено в табл.1. Розбіжність теплового балансу не перевищує 1% для періоду нагріву насадки і 2% для періоду нагріву дуття відповідно.

Таблиця 1 – Результати розрахунку теплового балансу

№ експери- мента	Період нагріву насадки				Період нагріву дуття		
	$Q_{пр}$, МДж	$Q_{нас}$, МДж	$Q_{омх}$, МДж	Δq , %	$Q_{нас}$, МДж	$Q_{г.д.}$, МДж	Δq , %
1	592,07	521,76	68,07	0,38	521,86	515,59	1,2
2	674,59	601,18	73,53	0,018	601,28	596,17	0,84
3	515,45	448,76	64,53	0,41	448,95	443,24	1,27
4	576,3	502,27	70,57	0,6	502,46	495,51	1,38
5	607,94	535,4	69,94	0,42	535,54	530,59	0,92
6	467,42	400,28	65,98	0,25	400,42	395,64	1,19
7	306,79	258,22	48,8	0,08	258,14	256,86	0,49
8	506,07	440,96	63,75	0,26	441,03	437,88	0,71
9	476,38	418,03	56,94	0,29	418,1	414,37	0,89
10	1099,54	952,52	155,6	0,78	953,04	952,69	0,04

Проведено порівняльний аналіз даних, отриманих в результаті комп'ютерного моделювання, і експериментальних даних роботи групи ПН з урахуванням конструктивних особливостей і виробничих умов роботи кожного ПН групи. Для оцінки достовірності розробленої математичної моделі використані статистичні показники, які дозволяють визначити помилки моделювання, - середньоквадратична помилка (MSE) і корінь з середньоквадратичної помилки (RMSE), середня абсолютна помилка (MAE) та середнє абсолютне відсоткове відхилення (MAPD) [13]. Графіки модельного і експериментального значення температури гарячого дуття наведені на рис. 3.

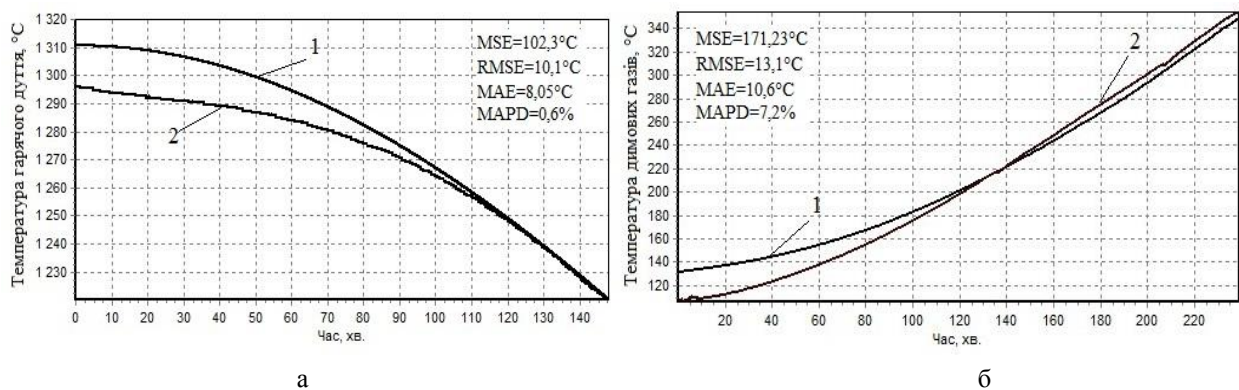


Рисунок 3 – Графіки зміни температури газу-теплоносія на виході з насадки: 1 - результат роботи комп'ютерної моделі; 2 - експериментальні дані, а – режим нагріву дуття, б – режим нагріву насадки

Розрахунок статистичних показників показав, що значення RMSE не перевищує 17°C для режиму нагріву насадки і 15°C для режиму нагріву дуття. Середня абсолютна помилка знаходиться в межах 12 °C

для режиму нагріву насадки і 11 °С для режиму нагріву дуття. Середнє абсолютне відсоткове відхилення становить не більше 8% і 3% відповідно.

Отже, описаний спосіб визначення дійсного обсягу газу-теплоносія в поточному шарі по висоті насадки доцільно використовувати при комп'ютерному моделюванні температурного стану насадки, що дозволить управляти нагрівом насадки таким чином, щоб забезпечити подачу необхідної кількості доменного дуття заданої температури.

Висновки

1. В результаті аналізу особливостей теплообміну між нерухою насадкою і рухомих середовищем – газом-теплоносієм визначено залежність поточної швидкості руху газу від тиску і температури газу, яка змінюється в часі та по висоті насадки, що обумовлено різним температурним станом шарів насадки по висоті, а також суттєвою різницею температур насадки на початку та в кінці режимів роботи.

2. Здійснено математичний опис процесів зовнішнього і внутрішнього теплообміну в режимах нагріву насадки і нагріву дуття, при якому достовірно визначення дійсного обсягу газу-теплоносія, що приймає участь в теплообміні, забезпечується за рахунок дроблення часового кроку при вирішенні системи диференціальних рівнянь, що дозволяє враховувати дійсну кількість тепла, отриману насадкою за період.

3. Розроблено комп'ютерну модель, функціонування якої у складі програмного забезпечення верхнього рівня АСК ТП виплавки чавуну в доменній печі дозволяє проводити оцінку температурного стану насадки ПН і газу-теплоносія, що є корисним інструментом для аналізу можливостей вдосконалення системи автоматизації групи ПН при реалізації алгоритмів керування нагрівом насадки. Використання результатів комп'ютерного моделювання нагріву та охолодження насадки дозволяє формувати керуючий вплив при управлінні нагрівом насадки таким чином, щоб забезпечити отримання насадкою достатньої кількості тепла для нагріву дуття.

Список літератури

1. Kobysh E.I. Situational control of hot blast stoves group based on decision tree / E.I. Kobysh, A.I. Simkin // Automation of technological and business processes. – 2016. – №3. – Р. 80-88.
2. Сысоева Т.Е. Конечно–разностное решение задачи нагрева (охлаждения) неподвижного пористого слоя материала / Т.Е. Сысоева, Ю.Я. Абраменкова // *Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск. – 2008. – С. 272–286.*
3. Койфман А.А. Повышение эффективности работы доменных воздухонагревателей путем увеличения давления газа-теплоносителя: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.02 / А.А. Койфман ; ПГТУ. - Мариуполь : ПГТУ, 2016. - 23 с.
4. Кабаков З.К. Повышение точности численных моделей теплообмена в неподвижном слое / З.К. Кабаков, И.А. Сенатова, А.Л. Кузьминов [и др.] // *Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 3. – С. 19–24.*
5. Muske, K.R. Blast furnace stove control / [K.R. Muske and others] // *American control conference. – Philadelphia: Villanova University, 1998. – С. 24–25.*
6. Kobysh E.I. Control model of the heating hot blast stove regenerative chamber based on fuzzy knowledge with training set / E.I. Kobysh, A.I. Simkin // *Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 6. – Р. 96-101.*
7. Кобыш Е.И. Алгоритм управления нагревом насадки доменного воздухонагревателя с внутренней камерой горения / Е.И. Кобыш, А.И. Симкин, В.П. Кравченко // *Сталь. – 2014. – № 1. – С. 9-13.*
8. Кобыш Е.И. Подсистема прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья в воздухонагревателе доменной печи на основе нечёткой базы знаний / Е.И. Кобыш, А.И. Симкин // *Металл и литье Украины. – 2016. – №6. – С. 10-17.*
9. Кобыш Е.И. Компьютерная модель работы доменного воздухонагревателя / Е.И. Кобыш, А.И. Симкин, А.А. Койфман // *Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2012. – Вип. 25. – С. 239-245.*
10. Грес Л.П. Исследование влияния скорости теплоносителей на параметры теплообмена в насадке воздухонагревателя / Л.П. Грес, А.Е. Быстров, Ю.М. Флейшман // *Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск. – 2007. – С. 116–122.*
11. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования: 2-е изд. перераб. и доп. / Е.И. Казанцев. – М.: *Металлургия*, 1975 – 368 с.
12. 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. – Ч. 2. – Мариуполь:ПДТУ, 2008. – Вип. 18. –С.141–144.*

13. Горбунов В.А. Научные основы повышения энергоэффективности теплотехнологических установок и систем при недостаточном информационном обеспечении: автореф. дис. док. техн. наук : 05.14.04 / В. А. Горбунов ; Иваново, 2013. - 40 с.

Стаття надійшла: 20.11.2017.

Відомості про авторів

Кобиш Олена Іванівна – асистент кафедри автоматизації і комп'ютерних технологій ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь.

Сімкін Олександр Ісакович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації і комп'ютерних технологій ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь.