

УДК 669.162.23:662.6

Койфман О. О., Орехов М. В., Солдатов Д. В., Будур В. С., Голоядов А. В.

УПРАВЛІННЯ НАГРІВАННЯМ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ПОВІТРОНАГРІВАЧА З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ ГОРІННЯ ПАЛИВА

Проведено огляд розрахунків температури горіння газоподібного палива. Для розрахунку часто використовуються спрощені методики, в яких не враховуються залежності теплофізичних властивостей складових газу від температури і тиску, визначення значень яких в більшості випадків зводиться до середніх значень теплоємності та ентальпії, використання номограм або табличних значень при нормальних умовах.

На підставі табличних значень теплофізичних властивостей компонентів газоподібного палива, представлених в довідниках, і застосовуючи методи нелінійної багатопараметричної регресії отримані залежності ентальпії і теплоємності від температури і тиску для кисню, азоту, водню, чадного газу, метану, монооксиду вуглецю.

Авторами розроблена програма розрахунку температури горіння природно-коксодоменної суміші, в якій значення ентальпії і теплоємності газів визначаються на підставі отриманих залежностей.

Дослідження даних вимірювань показали, що калорійність доменного газу за 24 години може змінюватися на 10-25 %, в окремих випадках - до 40 %, що призводить до коливання температури горіння газу до 100 °С.

На вітчизняних металургійних комбінатах не застосовується автоматичний контроль калорійності доменного газу в зв'язку з дорожнечою газоаналітичного обладнання. При цьому застосування розробленого програмного забезпечення та періодичних вимірів калорійності в системах автоматичного управління дозволить підвищити якість регулювання температури купола за рахунок своєчасної корекції калорійності змішаного газу, і витрат змішаного газу і повітря.

Запропоновано структуру системи автоматичного керування температурою купола з можливістю регулювання калорійності змішаного газу з використанням запропонованої програми розрахунку горіння суміші газів.

Ключові слова: Багатопараметрична апроксимація, теплофізичні властивості, алгоритм, система автоматизації, програма, температура горіння, змішаний газ.

Постановка проблеми.

Нагрівання гарячого дуття, що надходить в доменну піч, і стабілізація його температури здійснюються в блоці повітронагрівачів. При цьому основним завданням системи автоматичного управління є оптимальний нагрів насадки повітронагрівача, який здійснюється за рахунок спалювання газоподібного палива.

Якість нагріву гарячого дуття залежить від ефективного спалювання палива (доменного газу або суміші доменного та природного газів) в пальнику повітронагрівача при нагріванні його насадки.

Температура горіння палива залежить від безлічі факторів, зокрема калорійності горючої суміші, температури і тиску палива і повітря, що йдуть на горіння, надлишку повітря та інших параметрів, які не враховуються при регулюванні температури купола.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У типовій автоматизованій системі управління регулювання температури купола повітрянагрівача здійснюється за рахунок зміни витрат змішаного паливного газу і повітря горіння [1]. У більшості випадків в процесі тривалої експлуатації блоку співвідношення «паливо-повітря» не коригується і залишається постійним. У той же час температура купола залежить від теплотворної здатності змішаного газу, основним компонентом якого є доменний газ. Аналіз калорійності доменного газу за тривалий проміжок часу показав, що вона може коливатися, протягом доби в межах 10-25 %, що обумовлено технологією доменної плавки.

У нагрівальних печах застосовуються системи регулювання горіння палива з корекцією за складом газів, що відходять [2]. Недоліком таких систем є установка газоаналізаторів в димових трактах, які часто мають нещільності, що ведуть до підмішуванню повітря в димові гази. У будь-якому випадку, застосування таких систем на повітрянагрівачах неможливо, тому що димової тракт загальний для всіх повітрянагрівачів блоку.

Для розрахунку температури горіння газоподібного палива використовуються спрощені методики, в яких не враховуються залежності теплофізичних властивостей складових газу від температури і тиску, визначення значень яких в більшості випадків зводиться до середніх значень теплоємності та ентальпії [3], використання номограм [4] або табличних значень при нормальних умовах [5].

Зміна температури і тиску компонентів газу тягне за собою зміну температури горіння палива, наприклад, їх збільшення призводить до зростання температури [6].

Авторами [7] розроблена методика і програма розрахунку горіння палива з заданим хімічним складом з урахуванням конструктивних особливостей камер згорання газотурбінних двигунів. При розрахунку температури горіння газів враховується вплив дисоціації продуктів згорання від температури і тиску у вигляді залежностей, представлених поліномами 4-го ступеню.

Пропонується спрощена методика визначення розрахунку температури горіння вуглеводневого газоподібного палива з наперед відомими середніми значеннями ентальпії складових палива і продуктів згорання [8].

У статті [9] розроблена методика і прикладна програма для дослідження впливу збагачення киснем повітря горіння на температуру горіння палива і обсяг продуктів згорання.

Мета дослідження.

Розробка розрахунку горіння палива з урахуванням залежності теплофізичних властивостей компонентів газів від їх початкових температури і тиску і обґрунтування його використання в системі управління нагріванням насадки доменного повітрянагрівача.

Основний матеріал дослідження.

На підставі табличних значень теплофізичних властивостей компонентів газоподібного палива, представлених в довідниках [10-12], і застосовуючи методи нелінійної багатопараметричної регресії отримані залежності параметрів газів (CH_4 , C_2H_6 , CO , H_2 , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2) от температури та тиску [13], наприклад:

1. Теплоємність метану CH_4 при тиску $P = 0,5 \div 2,0$ б а р і температурі

$T = 280 \div 1000$ К (рис. 1):

$$C_p = 6,00 \cdot 10^{-3}P^2 + 1,48 \cdot 10^{-6}T^2 + 9,13 \cdot 10^{-4}P + 2,15 \cdot 10^{-3}T + 1,45$$

2. Ентальпія метану CH_4 при тиску $P = 0,5 \div 2,0$ бар і температурі $T = 280 \div 1000$ К (рис. 2):

$$i = 4,00 \cdot 10^{-2}P^2 + 2,05 \cdot 10^{-3}T^2 - 5,96 \cdot 10^{-2}P + 0,872T + 1190$$

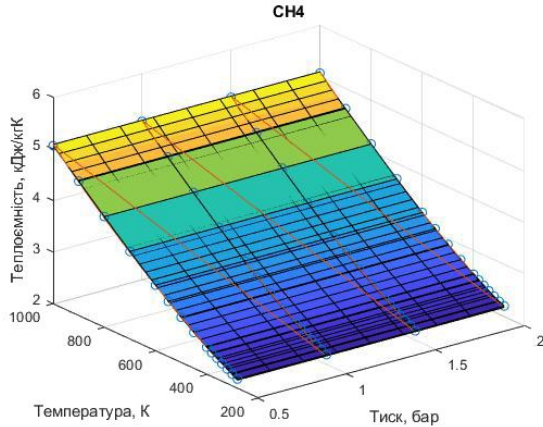
3. Теплоємність монооксиду вуглецю CO при тиску $P = 0,1 \div 10$, атм і температурі $T = 270 \div 1500$ К (рис. 3):

$$C_p = 1,59 \cdot 10^{-3}P + 2,03 \cdot 10^{-4}T - 1,55 \cdot 10^{-6}PT + 0,970$$

4. Ентальпія монооксиду вуглецю CO при тиску $P = 0,1 \div 10$, атм і температурі $T = 270 \div 1500$ К (рис. 4):

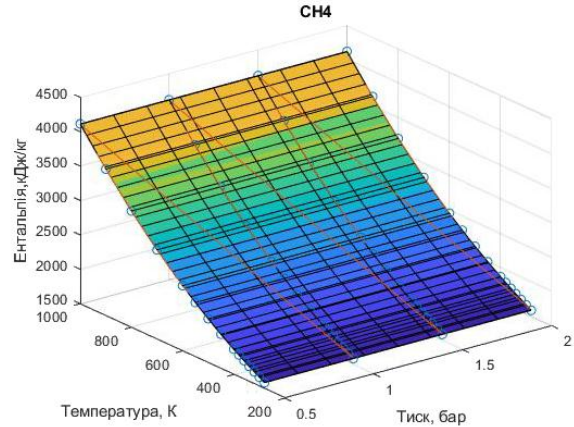
$$i = 6,39 \cdot 10^{-4}P^2 + 1,07 \cdot 10^{-4}T^2 - 0,059P + 0,965T + 12,2$$

Отримані залежності дозволяють визначати значення параметрів в різних діапазонах температури і тиску з достатньо високою точністю.



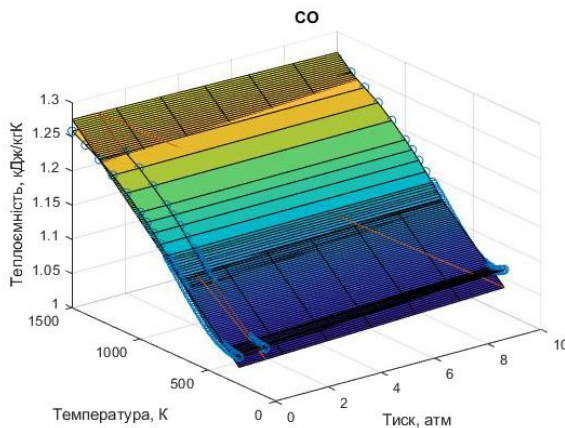
$$R^2 = 1$$

Рисунок 1 – Теплоємність метану CH_4



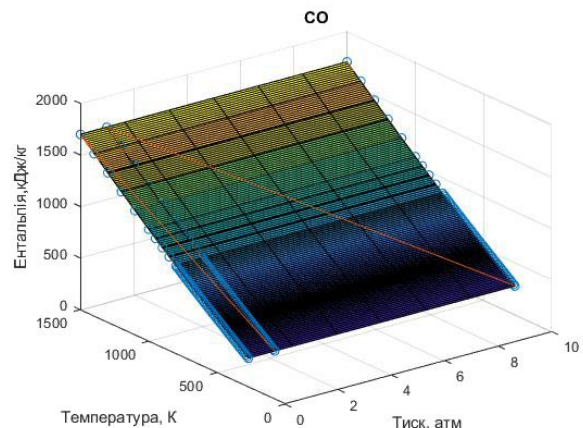
$$R^2 = 0,993$$

Рисунок 2 – Ентальпія метану CH_4



$$R^2 = 0,815$$

Рисунок 3 – Теплоємність монооксиду вуглецю CO



$$R^2 = 0,999$$

Рисунок 4 – Ентальпія монооксиду вуглецю CO

Авторами розроблена програма (рис. 5) розрахунку температури горіння природно-кокс-доменної суміші, в якій ентальпія і теплоємність газів визначаються на підставі отриманих раніше залежностей. Дану програму так само можна використовувати для розрахунку горіння доменної або природно-доменної суміші, використовуюваної для нагріву насадки повітрянагрівачів, в системі автоматичного регулювання нагріву насадки доменного повітрянагрівача.

В якості вихідних даних в програмі є: склади доменного, природного і коксового газів, вміст вологи кожного і процентне співвідношення в суміші, тиск і температура суміші, коефіцієнт надлишку повітря, кількість кисню в повітрі горіння. Порівняння результатів розрахунків температури горіння для природного, доменного і коксового газів окремо з результатами розрахунків довідника [14] показали високу точність збіжності.

На одному з металургійних комбінатів газовий аналіз доменного газу здійснюється хімічною лабораторією 6 разів на добу. Вивчення даних вимірювань показали, що калорійність доменного газу за 24 години може змінюватися на 10-25 % (рис. 6, а), в окремих випадках - до 40 %. Розрахована за допомогою розробленої програми температура горіння доменного газу коливається в межах 40-60 °С протягом доби (рис. 6, б). Така зміна температури вимагає коригувань заданих значень в автоматизованій системі управління повітрянагрівачем при регулюванні температури купола.

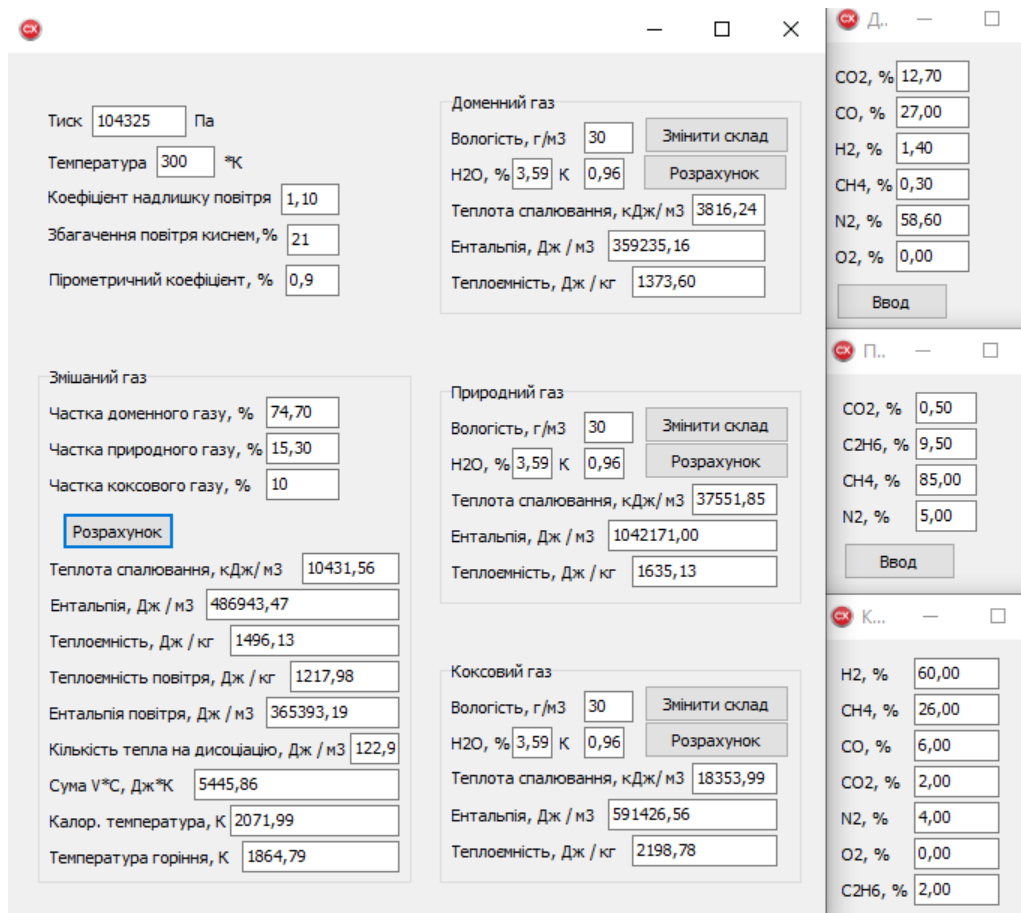


Рисунок 5 – Програма розрахунку температури горіння змішаного газу

Інформаційні технології

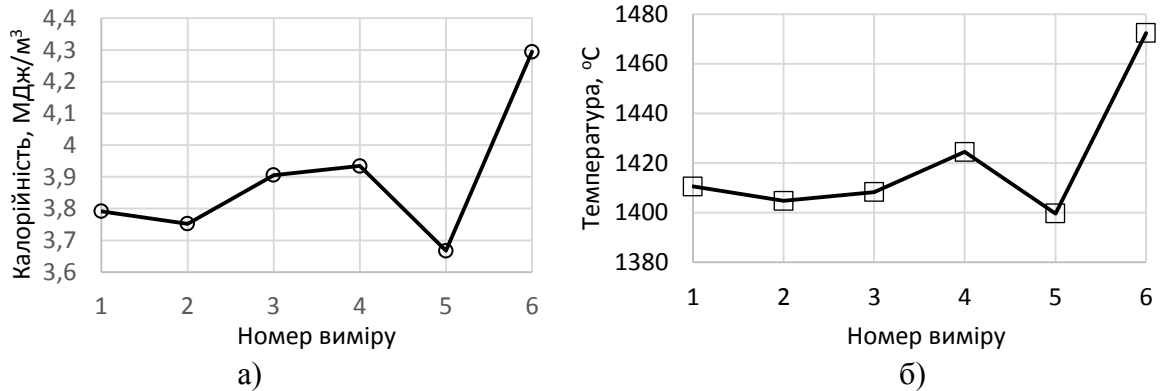


Рисунок 6 – Калорійність доменного газу (а) і розрахункова температура горіння доменного газу (б)

З використанням математичної моделі роботи повітрянагрівача [15], доповненої пропонуваним розрахунком температури горіння суміші газів, було проведено дослідження повітрянагрівача, що працює в режимі нагріву насадки, при різних значеннях калорійності (рис. 6, а). Всі інші вихідні параметри моделювання були прийняті постійними. При зміні калорійності на 25 % (рис. 6, а, заміри 5 і 6) спостерігається скорочення часу нагріву насадки більш ніж на 12 хв (рис. 7).

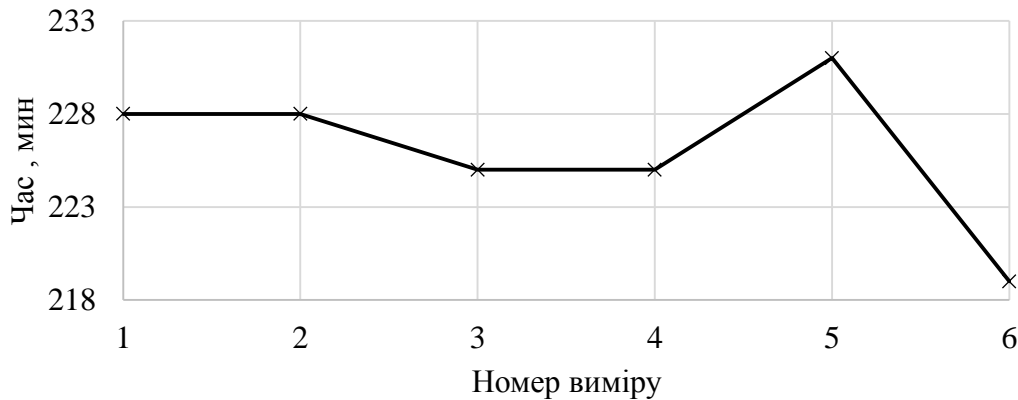


Рисунок 7 – Час нагріву насадки

На вітчизняних металургійних комбінатах не застосовується автоматичний контроль калорійності доменного газу в зв'язку з дорожнечою газоаналітичного обладнання. При цьому застосування розробленого програмного забезпечення та періодичних вимірів калорійності в системах автоматичного управління дозволить підвищити якість регулювання температури купола за рахунок своєчасної корекції калорійності змішаного газу, і витрат змішаного газу і повітря.

Запропоновано структуру системи автоматичного керування температурою купола з можливістю регулювання калорійності змішаного газу (рис. 8).

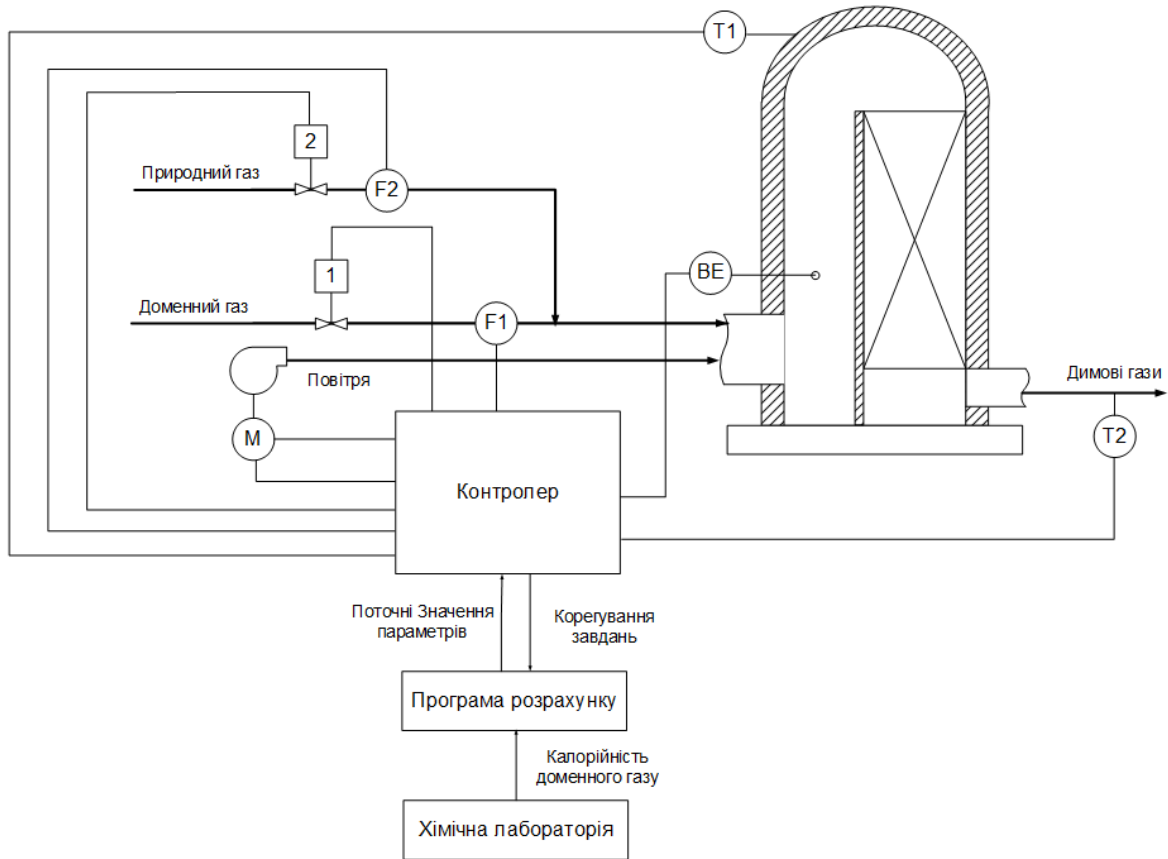


Рисунок 8 – Структура системи управління нагрівом купола повітрянагрівача з коригуванням за поточною калорійністю доменного газу

У контролер надходять поточні значення з датчиків температури купола T1 і димових газів T2, витрат доменного газу F1 і природного газу F2, швидкість обертів двигуна вентилятора. Контроль наявності факелу в камері горіння здійснюється датчиком VE. На підставі отриманих поточних даних контролер змінює завдання на витрати і склад змішаного газу підсистемами 1 і 2 відповідно, а також на мотор M для регулювання витрати повітря.

Підсистема 1 та 2 регулюють вміст доменного та природного газу в складі змішаного. Задане значення температури купола з контролера і результати періодичних вимірів калорійності доменного газу надходять з хімічної лабораторії в програму розрахунку горіння змішаного газу. У результаті розрахунків програми, коригуються керуючі впливи витрат доменного і природного газів і витрати повітря горіння, для забезпечення якісного згорання змішаного газу. Необхідність додавання природного газу обумовлено тим, що калорійність доменного газу змінюється протягом доби.

ВИСНОВКИ

Отримані поліноміальні залежності теплотехнічних властивостей газів від температури і тиску дозволяють розраховувати температуру горіння суміші газів з різними складами і початковими параметрами, відмінними від нормальних умов.

Математичне моделювання роботи певного повітрянагрівача показало, що при збільшенні калорійності на 15 %, температура згоряння доменного газу підвищується на 60 °С, а час нагріву насадки зменшується на 12 хв.

Розроблено структуру системи управління нагрівом купола повітрянагрівача з коригуванням за поточною калорійністю доменного газу.

Застосування розробленого програмного забезпечення в системах автоматичного регулювання блоком повітрянагрівачів дозволить підвищити якість регулювання температури купола за рахунок своєчасної корекції витрат газу і повітря з урахуванням коливання калорійності доменного або косового газів.

Перелік використаних джерел:

1. Глинков, Г. М. АСУТП в черной металлургии : учебник для вузов / Г. М. Глинков, М. А. Маковский. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1999. – 310 с.
2. Бойко, В. И. Автоматизированные системы управления технологическими процессами в черной металлургии: учебное пособие / В. И. Бойко, В. А. Смоляк. – Днепропетровск : ДГТУ, 1997. – 576 с.
3. Доменные воздухонагреватели / Ф. Р. Шкляр [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
4. Топливо и расчеты его горения : учеб. пособие / С. Н. Гуцин [и др.]; под ред. Ю. Г. Ярошенко. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. – 105 с.
5. Маслов, В. А. Теория горения и химико-термической переработки топлива : учеб. пособ. для вузов / В. А. Маслов. – 2-е изд. – Мариуполь : ПГТУ, 2015. – 244 с.
6. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М. : Наука, 1980. – 478 с.
7. Крушневич, С. П. Методика и программа для расчета температуры горения природного газа / С. П. Крушневич // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 5. – С. 28–31.
8. Давыдов, В. О. Метод расчета температуры горения произвольной смеси газообразного углеводородного топлива при произвольном избытке воздуха / В. О. Давыдов, А. В. Бондаренко // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2013. – Вып. 3 (42). – С. 98–102.
9. Койфман, А. А. Автоматизированная система управления нагревом насадки воздухонагревателя доменной печи с возможностью регулирования содержания кислорода в воздухе горения [Электронный ресурс] / А. А. Койфман, М. О. Король, А. И. Симкин // Наука та виробництво : зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2020. – Вип. 22, спецвип. – С. 83–90. – Режим доступу: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/28063>
10. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 2006. – 721 с.

11. Tables of thermal properties of gases / *J. Hilsenrath [et al.]*. – Washington : Government Printing Office, 1955. – 408 p. – (Series : National Bureau of Standards circular; 564).
12. *Ривкин, С. Л.* Термодинамические свойства воды и водяного пара : справочник / *С. Л. Ривкин, А. А. Александров*. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.
13. *Койфман, О. О.* Розрахунок значень теплофізичних властивостей газів для уточненого розрахунку доменного повітрянагрівача / *О. О. Койфман, М. В. Орехов, О. І. Сімкін* // Перспективи розвитку сучасної науки і техніки : зб. тез доп. Всеукр. інтернет-конференції (Маріуполь, 20–21 лютого 2020 р.) / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2020. – С. 20–22.
14. *Александров, А. А.* Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики [Электронный ресурс] : Web-версия справочника / *А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков*. – Режим доступа: <http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp/>
15. *Koifman, A.* Development and Software Implementation of the Hot Blast Stove Computer Model / *A. Koifman, A. Simkin* [Electronic resource] // Computer Modeling and Intelligent Systems : Proceedings of the Second International Workshop (CMIS-2019) (Zaporizhzhia, April 15–19, 2019 y.). – [S. l.], 2019. – Vol. 2353. – P. 440–454. – Mode of access: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper35.pdf>

Койфман А. А., Орехов М. В., Солдатов Д. В., Будур В. С., Голядов А. В.

УПРАВЛЕНИЕ НАГРЕВОМ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Проведен обзор расчетов температуры горения газообразного топлива. Для расчета зачастую используются упрощенные методики, в которых не учитываются зависимости теплофизических свойств составляющих газа от температуры и давления, определение значений которых в большинстве случаев сводится к средним значениям теплоемкости и энтальпии, использованию номограмм или табличным значениям при нормальных условиях.

На основании табличных значений теплофизических свойств компонентов газообразного топлива, представленных в справочниках, и применяя методы нелинейной многопараметрической регрессии получены зависимости энтальпии и теплоемкости от температуры и давления для кислорода, азота, водорода, угарного газа, метана, монооксида углерода.

Авторами разработана программа расчета температуры горения природно-коксо-доменной смеси, в которой значения энтальпия и теплоемкость газов определяются на основании полученных зависимостей.

Изучение данных измерений показали, что калорийность доменного газа за 24 часа может изменяться на 10-25 %, в редких случаях – до 40 %, что приводит к колебанию температуры горения газа до 100 °С.

На отечественных металлургических комбинатах не применяется автоматический контроль калорийности доменного газа в связи с дороговизной газоаналитического оборудования. При этом применение разработанного программного обеспечения и периодических замеров калорийности в системах автоматического управления позволит

повысить качество регулирования температуры купола за счет своевременной коррекции calorificности смешанного газа, и расходов смешанного газа и воздуха.

Предложена структура системы автоматического управления температуры купола с возможностью регулирования calorificности смешанного газа с использованием предложенной программы расчета горения смеси газов.

Ключевые слова: *Многопараметрическая аппроксимация, теплофизические свойства, алгоритм, система автоматизации, программа, температура горения, смешанный газ.*

Koifman O. O., Oriekhov M. B., Soldatov D. V., Budur V. S., Holoiadov A. V.

CONTROL OF HEATING OF THE HOT BLAST STOVE CHECKERWORK WITH THE PROGRAM FOR CALCULATION OF FUEL COMBUSTION

Calculations of the calorific value of the fuel gas is reviewed. For the calculation the simplified methods are widely used, which do not consider the dependences of the thermophysical properties of the gas components on temperature and pressure, the determination of the values of which in most cases comes to the average values of heat capacity and enthalpy, to the use of nomograms or tabular values under normal conditions.

Based on the tabular values of the thermophysical properties of the fuel gas components presented in the reference books, and using the methods of nonlinear multivariable regression, the dependences of enthalpy and heat capacity on temperature and pressure for oxygen, nitrogen, hydrogen, carbon monoxide, methane, carbon dioxide were obtained.

The authors have developed a program for calculating the combustion temperature of a natural coke-oven and blast-furnace mixture gases, in which the values of enthalpy and heat capacity of gases are determined based on the obtained dependences.

The study of these measurements showed that the calorific value of the blast-furnace gas in 24 hours can change by 10-25 %, in rare cases - up to 40 %, which leads to fluctuations in the combustion temperature of the gas up to 100 ° C.

Domestic iron and steel plants do not use automatic control of the calorific value of the blast furnace gas due to the high cost of the gas analysis equipment. At the same time, the use of the developed software and periodic measurements of the calorific value in automatic control systems will allow to improve the quality of the dome temperature regulation due to the timely correction of the calorific value of the mixed gas, and the consumption of mixed gas and air.

The structure of the automatic control system of the dome temperature with the option of regulating the calorific value of the mixed gas by applying the proposed program for the calculation of the combustion of the gas mixture is proposed.

Keywords: *nonlinear multivariable regression, thermophysical properties, algorithm, automatic control system, program, automatic control system, mixed gas.*

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

Стаття надійшла 29.11.2020 р.