

2. *НРАОР 27.1-1.09-09 (PBGChM). Pravila bezpeki v gazovomu gospodarstvi pidpriemstv chornoj metalurgii* [NSAAP 27.1-1.09-09 (PGHChM). Safety rules in the gas industry of ferrous metallurgy enterprises]. Kiev, 2009. 98 p. (Ukr.)
3. Kravchenko V.P. Matematichna model' procesu keruvannya rozpodilennyam vodi po yarusam skruberu mokrogo ochishchennya koloshnikovogo gazu [Mathematical model of the process of control of water distribution in the tiers of scrubber wet cleaning of copper gas]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, no. 37, pp. 165-176. (Ukr.)
4. Odel'skij E.H. *Gidravlicheskij raschet truboprovodov raznogo naznacheniya* [Hydraulic calculation of pipelines for different purposes]. Minsk, Vyshejscha shkola Publ., 1967. 103 p. (Rus.)
5. *Koloshnykovaja pyl* [Butter dust] Available at: www.metallicheckiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie_gazov/ochistka_domennogo_gaza/4 (accessed 09 April 2019) (Rus.)
6. Aleshina V.M. *Pyleulavlivanie v metallurgii: spravochnoe izdanie* [Dust collection in metallurgy: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 336 p. (Rus.)
7. *Rozrahunky dovygh truboprovodiv* [Calculation of long pipelines] Available at: www.wiki.tntu.edu.ua/Розрахунки_довгих_трубопроводів (accessed 09 April 2019) (Ukr.)
8. *Gidravlichnyj rozrahunok truboprovodiv* [Hydraulic pipeline calculation] Available at: www.studfiles.net/preview/5064502/page:13 (accessed 09 April 2019) (Ukr.)
9. *Sovershenstvovanie sistemy ochistki domennogo gaza* [Improving the blast furnace gas cleaning system] Available at: ispu.ru/files/73-75.pdf (accessed 09 April 2019) (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 10.04.2019

УДК 661.666

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181436

© Жученко О.А.¹, Хібеба М.Г.²

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРА В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВОЇ СИРОВИНИ

Виконано аналіз існуючих досліджень процесу термічної обробки вуглецевої сировини. Визначено, що поза увагою дослідників залишається дослідження впливу таких технологічних параметрів, як сила струму, що підводиться, та швидкості завантаження/вивантаження матеріалу на температурні поля робочого простору електрокальцинатора. Проведено дослідження зміни температурного поля робочого простору електрокальцинатора в залежності від сили струму, що підводиться, та швидкості завантаження/вивантаження матеріалу.

Ключові слова: виробництво вуглецевих виробів, електрокальцинатор, електрична ніч шахтного типу, вуглецева сировина, термообробка.

Жученко А.А., Хібеба М.Г. Исследование температурных полей рабочего пространства электрокальцинатора в процессе термической обработки углеродного сырья. Выполнен анализ существующих исследований процесса термической обработки углеродного сырья. Определено, что вне поля зрения исследователей

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, azhuch@ukr.net

² аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, hibebe19@gmail.com

остаются исследования влияния таких технологических параметров, как подводимая сила тока и скорость загрузки/выгрузки материала на температурные поля рабочего пространства электрокальцинатора. Проведено исследование изменения температурного поля рабочего пространства электрокальцинатора в зависимости от подводимой силы тока и скорости загрузки/выгрузки материала.

Ключевые слова: производство углеродных изделий, электрокальцинатор, электрическая печь шахтного типа, углеродистое сырье, термообработка.

O.A. Zhuchenko, M.G. Khibeba. Research of electric calciner working space temperature fields in heat treatment of carbonaceous materials. *The analysis of the existing researches of carbonaceous raw materials heat treatment process has been executed. It has been determined that research of the influence of such technological parameters as supplied current intensity and the loading/unloading rate of the material on electric calciner working space temperature fields remains beyond the attention of the researchers. Therefore the electric calciner working space temperature fields change, depending on the supplied current and the loading/unloading rate of the material has been investigated. In this research, the entire electric calciner working space was conventionally divided into three zones. In the first zone, the loaded material is heated due to the heat exchange with the hotter layers of the material and the parts of the electric calciner. The density of the current passing through the material in this zone is negligible, therefore the heating due to joule heat is quite little. The second zone is the most important, because it is right here that graphitization of carbon material takes place due to heating up to 2200°C with joule heat emitted when the current passes through the material. The temperature field in this zone determines the qualitative parameters of the processed material, therefore, this zone was considered in research. In order to ensure the required quality of material, it is necessary that in this zone the temperature of 2200°C should be established, while a significant problem is to reduce the temperature gradient in this zone. Therefore, this research considered both temperature fields of this zone and the minimum and maximum temperatures. In the third zone cooling of the treated material and the lower electrode occurs due to the water flow in the support volume. As a result of the research carried out with the help of the developed model, the positive effect of increasing the current and the negative influence of increasing the loading rate on average temperature in the second zone of the apparatus have been revealed. At the same time, these technological parameters increase negatively affects the temperature difference in the second zone, causing gradient increase, which negatively affects the quality of the processed material.*

Keywords: production of carbonaceous products, vertical electric oven, carbonaceous materials, heat treatment.

Постановка проблеми. Однією з основних технологічних операцій, що визначає якість вуглеграфітових виробів із заданими фізико-механічними властивостями, є термічна обробка вуглецевої сировини в електрокальцинаторі, під час якої формуються властивості вуглецевої сировини, що впливають як на перебіг наступних технологічних процесів виробництва, так і, в решті решт, на якість готової продукції [1, 2]. Тому задача підвищення ефективності процесу термообробки в електрокальцинаторі є дуже актуальною і в сучасних умовах може бути розв'язана шляхом як розробки комплексу технічних і технологічних заходів з модернізації технології, так і створення ефективної системи оптимального керування даним процесом. Важливою науковою задачею, яка постає в даному випадку, є дослідження технології на основі розвитку наукових уявлень про процеси, що протікають в електрокальцинаторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент існує велика кількість праць, присвячених питанням термічної обробки вуглецевої сировини в електричних печах шахтного типу. При цьому більшість робіт спрямована на дослідження властивостей сировини при прожарюванні (температура обробки 1200÷1500°C) і значно менша кількість – на процес графітування. Так, в роботі [2] наведено детальний опис процесу прожарювання, а також дослідження залежності питомого електричного опору коксу та антрациту від температури, тривалості прожарювання та швидкості нагріву в діапазоні температур 400÷1300°C.

Автори [3] наводять як дослідження теплових та електричних властивостей вуглецевих матеріалів, так і кінетику та термодинаміку процесу графітування.

Досить важливим є дослідження [4] електричного контактного опору графіту з міддю та терморозширеним графітом, адже результати даного дослідження можна використати при числовому моделюванні графітування вуглецевих виробів для завдання умов на границі мідь-графіт чи графіт-графіт.

В праці [5] викладено результати експериментальних досліджень зміни складу летких речовин, що виділяються з антрациту при його термообробці в електрокальцинаторі. Проаналізовано фізико-хімічні процеси, що відбуваються в результаті утворення летючих, з урахуванням підсосу повітря і реакцій взаємодії газоподібних речовин між собою, вуглецем і золою антрациту, а також з вогнетривкою футеровкою.

Автори [6] провели порівняльний аналіз печей для реалізації першої стадії двостадійної обробки коксу, що включає нагрів коксу до температур $900\div 1200^{\circ}\text{C}$ задля видалення основної частини летючих продуктів та забезпечення стабільної якості коксу та другу стадію – високотемпературну обробку коксу в печі з електротермічним киплячим шаром за температури $2000\div 2500^{\circ}\text{C}$. Результати даного дослідження недоцільно використовувати, оскільки розглядається одностадійний процес обробки в електрокальцинаторі.

Дослідженню другої стадії двостадійної обробки коксу присвячено роботу [7]. Автори досліджують особливості використання для реалізації даного процесу печі з електротермічним киплячим шаром. За їх свідченням використання даного типу печі дозволяє значно зменшити перепад температур по зоні прожарювання.

В праці [8] сформульовано основні вимоги до конструкції електрокальцинатора, призначеного для отримання графітованого наповнювача для електродних виробів. Проведено аналіз існуючих технічних рішень, запропонованих в конструкціях електрокальцинаторів, та відзначено переваги та недоліки розглянутих конструкцій.

Автори [9] пропонують математичну модель теплової роботи електрокальцинатора на основі складання та вирішення зональних рівнянь теплового балансу. Також в даній роботі наведені рівняння для визначення електропровідності, ефективної теплопровідності матеріалу та коефіцієнта теплопередачі між поверхнею матеріалу та газовою фазою. Недоліком даної роботи є відсутність в ній самих рівнянь теплового балансу для електрокальцинатора та відсутність перевірки створеної моделі на адекватність.

Автор [10] розробив високоточну узагальнену математичну модель фізичних полів процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів в електропечах та методику числового розв'язання на базі методів дискретного елемента (МДЕ) та скінченних об'ємів (МСО). Також в даній праці наведені експериментальні дані та перевірка адекватності створеної моделі.

В працях [11, 12] розроблено фізичну та математичну моделі процесу графітування нафтового коксу в шахтній однофазній електропечі безперервної дії. Дана модель враховує досить значну кількість особливостей процесу, таких як той факт, що робочий простір печі є двофазним середовищем, нафтовий кокс є сипучим матеріалом, що зумовлює необхідність використання ефективних значень його фізичних властивостей, які залежать від температури та тиску. Також модель враховує вплив хімічних процесів, що протікають при нагріванні матеріалу. У відповідності до сформульованої фізичної моделі, автори [11, 12] пропонують записувати процес графітування нафтового коксу в шахтній електропечі у вигляді зв'язаної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних з використанням моделей Ейлера та теплоелектричного стану, які включають в себе рівняння нерозривності, збереження руху, енергії і квазістаціонарної електропровідності. Оскільки дана модель досить повна та дозволяє теоретично дослідити процес, доцільно використовувати її як основу для створення числової моделі графітування нафтового коксу в електричних печах шахтного типу.

Постановка завдання. Поза увагою авторів наведених вище робіт залишається дослідження впливу таких технологічних параметрів, як сила струму, що підводиться, та швидкості завантаження/вивантаження матеріалу на температурні поля робочого простору електрокальцинатора, хоча для синтезу системи керування даним процесом таке дослідження є досить актуальним. Тому **метою статті** є дослідження впливу сили струму та швидкості завантаження/вивантаження матеріалу на температурні поля за допомогою числової моделі процесу, ство-

реної на основі математичної моделі [11, 12].

Виклад основного матеріалу. В рамках даного дослідження в середовищі ANSYS була реалізована числова модель. Адекватність отриманої моделі досліджувалась за допомогою критеріїв Стюдента та Фішера на основі експериментальних даних з праці [10]. Проведені дослідження виявили, що немає жодних підстав відкидати гіпотези про рівність математичних сподівань та дисперсій в усіх контрольних точках, а отже, можна вважати, що дана модель адекватно відтворила експериментальні дані.

У даній праці було досліджено зміну температурного поля робочого простору електрокальцинатора в залежності від сили струму, що підводиться, та швидкості завантаження/вивантаження матеріалу.

У рамках даного дослідження весь робочий простір електрокальцинатора було умовно поділений на три зони (рис. 1).

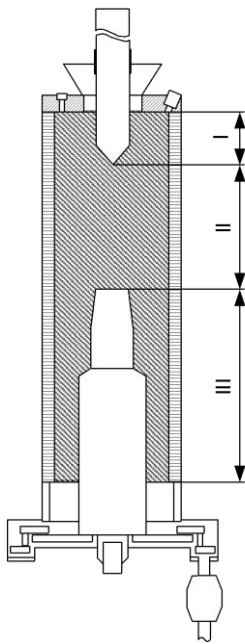


Рис. 1 – Розташування температурних зон у промисловому електрокальцинаторі ИЕТ-10-УХЛ-4 для отримання термоантрациту: I – зона нагріву; II – зона графітування; III – зона охолодження

В першій зоні за рахунок теплообміну з більш нагрітими шарами матеріалу та частинами електрокальцинатора відбувається нагрів завантаженого матеріалу. Густина струму, що проходить по матеріалу в даній зоні, незначна, тому й нагрів за рахунок джоулевого тепла є досить незначним.

Друга зона є найважливішою, адже безпосередньо в ній відбувається графітування вуглецевого матеріалу за рахунок нагріву до температур 2200°C джоулевим теплом, що виділяється при проходженні струму по матеріалу. Температурне поле в даній зоні визначає якісні показники обробленого матеріалу, тому, в першу чергу, в дослідженні буде розглядатись саме ця зона. Для забезпечення заданої якості матеріалу необхідно, щоб у цій зоні встановилась температура 2200°C [11], при цьому значною проблемою є зниження перепаду температур в даній зоні [7, 13, 14]. Тому доцільно в дослідженнях розглядати як самі температурні поля даної зони, так і мінімальні та максимальні температури в ній.

В третій зоні відбувається охолодження обробленого матеріалу та нижнього електроду за рахунок протікання води по об'єму опори.

Для дослідження залежності температурного поля від технологічних параметрів необхідно спочатку провести моделювання процесу за номінальних значень даних параметрів. Номінальне значення струму, за свідченнями авторів [15], складає 15 кА, максимальне значення – 20 кА. Номінальну швидкість завантаження матеріалу вирахуємо з середньої продуктивності електрокальцинаторів:

$$V = \frac{G}{\rho S},$$

де G – продуктивність, кг/с; ρ – насипна густина матеріалу, кг/м³; S – площа поперечного перерізу завантажувальної воронки, м².

Продуктивність електрокальцинаторів складає 1,5 т/год [1, 2], насипна густина нафтового коксу – 1550 кг/м³ [2], площа поперечного перерізу завантажувальної воронки електрокальцинатора ИЕТ-10-УХЛ-4 – 0,38 м². Тоді номінальна швидкість завантаження матеріалу – 0,0007 м/с.

За початкову температуру в усьому об'ємі апарату приймається температура 300 К, тобто розглядається кампанія термічної обробки вуглецевої сировини з розігрівом об'єму апарату, починаючи від температури навколишнього середовища (режим розгону). Тривалість розгону згідно з [10] складає 40 год.

Температурне поле електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,0007 м/с та сили струму 15 кА. За номінальних значень технологічних параметрів наприкінці 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 400÷840 К у II зоні. При цьому існує незначна зона біля нижнього електрода, де температура матеріалу досягає 1570 К (рис. 2, б). При досягненні температури 1000 К починається різке її зростання, що пояснюється значним зменшенням електричного опору за такої температури [2].

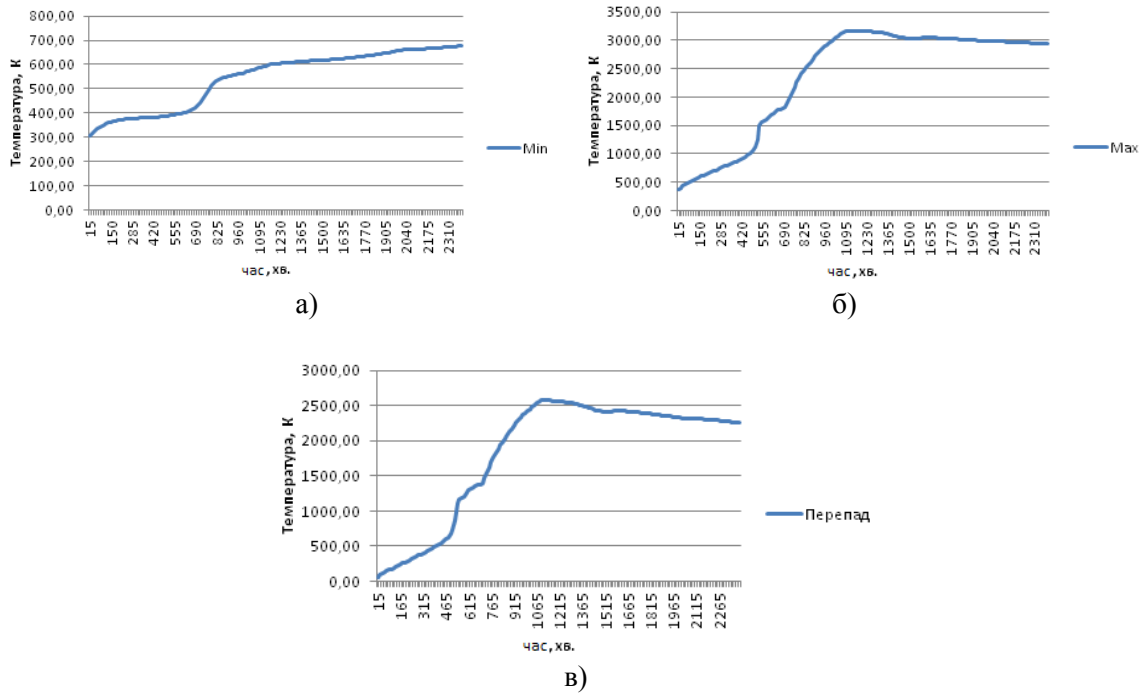


Рис. 2 – Температури у II зоні електрокальцинатора за номінальних значень технологічних параметрів: а) мінімальна; б) максимальна; в) перепад температур

За наступні 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 603÷2190 К в II зоні. У зоні біля верхнього електрода досягається найбільша температура за весь час обробки 3168 К (рис. 2, б). Це забезпечує дуже низький питомий електричний опір матеріалу, але автори [16] вказують на те, що за температур 2600÷2800°C збільшується вміст штучного графіту у вихідному матеріалі, що негативно впливає на пластичні властивості електродної маси.

По досягненню 3168 К максимальна температура починає поступово спадати, що пояснюється теплообміном з менш нагрітими шарами вуглецевого матеріалу.

В результаті різкого збільшення максимальної температури наприкінці 10 годин обробки далі, на початку наступних 10 годин, спостерігається й швидке зростання мінімальної температури від 400 до 543 К (рис. 2, а).

Перепад температури зростає і наприкінці 20 години обробки складає 2561°C (рис. 2, в).

Наступні два проміжки часу (тридцять та сорокова година обробки) супроводжуються процесами усталення температурних полів. За рахунок усталення температурних полів перепад температур зменшується до 2257°C (рис. 2, в).

В результаті моделювання 40 год. процесу термообробки вуглецевої сировини температура у центральних шарах в середньому складає 2060 К (1787°C), тоді як в шарах, що знаходяться біля стінок апарату, середня температура 1250 К (977°C) (рис. 3.). Таким чином, для середніх температур перепад складає 810°C. За таких перепадів температур умова усереднення властивостей обробленого матеріалу не виконується, до того ж навіть у більш нагрітих шарах температура в середньому не досягає 2200°C, а, отже, можна говорити про те, що обраний технологічний режим не є оптимальним для даного процесу та апаратного забезпечення. У зв'язку з цим виникає потреба у дослідженні динаміки процесу за інших технологічних режимів, тобто іншої сили струму та швидкості завантаження матеріалу.

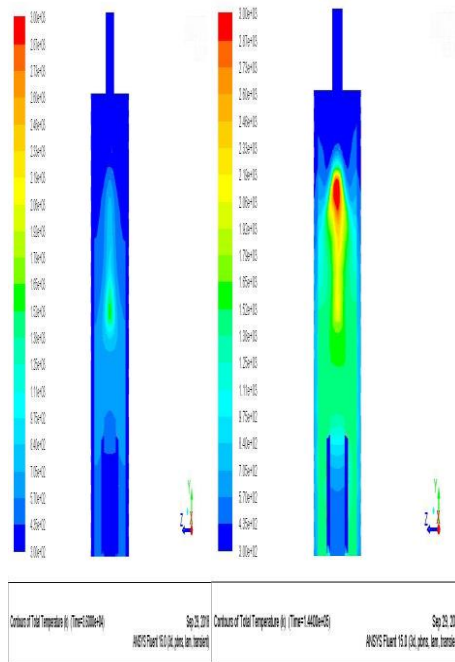


Рис. 3 – Температурне поле електрокальцинатора після обробки на протязі 40 год за номінальних значень технологічних параметрів.

Температурне поле електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,0007 м/с та сили струму 20 кА. При моделюванні процесу графітування нафтового коксу з максимальним значенням струму, що підводиться, наприкінці 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 490÷1850 К у II зоні. Температура у зонах з найбільшою густиною струму (біля верхнього та нижнього електродів) досягає 2514 К (рис. 4, б).

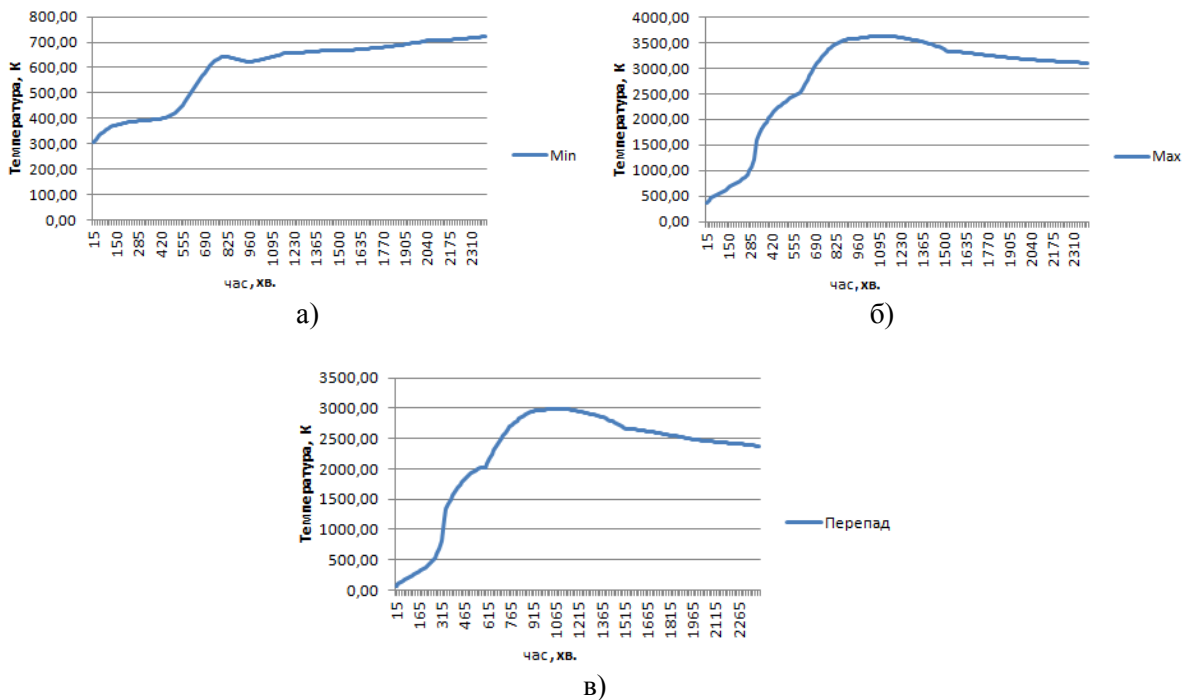


Рис. 4 – Температури у II зоні електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,0007 м/с та сили струму 20 кА: а) мінімальна; б) максимальна; в) перепад температур

Швидкість нагрівання варіюється від $0,30^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ для шарів біля стінки апарату до $3,57^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ для центральних шарів, що призводить до значного перепаду температур по радіусу апарату (2024°C наприкінці 10 години обробки (рис. 4, в)). Таким чином, збільшення сили струму, що підводиться, спричинило збільшення швидкості нагрівання по всьому апарату, але, якщо для шарів біля стінки швидкість збільшилась на $0,15^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$, то для центральних шарів це значення склало $1,42^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ У результаті перепад температур збільшився на 767°C в порівнянні з перепадом за номінальних значень параметрів. За таких температур у матеріалі, що знаходиться між верхнім та нижнім електродом, активно протікають процеси виділення летючих [11] та усадки матеріалу [2], тоді як у шарах біля стінки апарату фізико-хімічні перетворення матеріалу практично не відбуваються.

За наступні 10 год. процесу температура матеріалу зростає до $657\div 2650\text{ K}$ у II зоні. У зоні біля верхнього електроду досягається найбільша температура за весь час обробки – 3631 K (рис. 4, б). У порівнянні з процесом за номінальних параметрів збільшується об'єм матеріалу з температурою вище $2600\div 2800^{\circ}\text{C}$, що негативно впливає на пластичні властивості електродної маси. До того ж такі значні температури біля верхнього електроду спричиняють появу таких термічних напружень, що можуть призвести до виходу електроду з ладу.

У результаті різкого збільшення максимальної температури наприкінці 10 годин обробки далі, на початку наступних 10 годин, спостерігається швидке зростання мінімальної температури від 490 до 641 K (рис. 4, а), після чого мінімальна температура доволі лінійно зростає за рахунок теплообміну з більш нагрітими шарами матеріалу.

Перепад температур зростає і наприкінці 20 години обробки складає 2959°C (рис. 4, в), що на 398°C більше, ніж перепад за аналогічний проміжок часу у випадку моделювання з номінальними значеннями технологічних параметрів.

Тридцять та сорокова година обробки матеріалу супроводжуються процесами усталення температурних полів. Перепад температур зменшується до 2378°C (рис. 4, в).

В результаті моделювання 40 год. процесу термообробки вуглецевої сировини температура у центральних шарах в середньому складає 2360 K (2087°C), тоді як у шарах, що знаходяться біля стінок апарату, середня температура 1480 K (1207°C) (рис. 5). Таким чином, для середніх температур перепад складає 880°C , що на 70°C більше середнього перепаду за номінальних значень технологічних параметрів. За таких перепадів температур умова усереднення властивостей обробленого матеріалу знову таки не виконується, так само, як і середня температура не досягає 2200°C . Отже, обраний технологічний режим не є оптимальним для даного процесу та апаратного забезпечення.

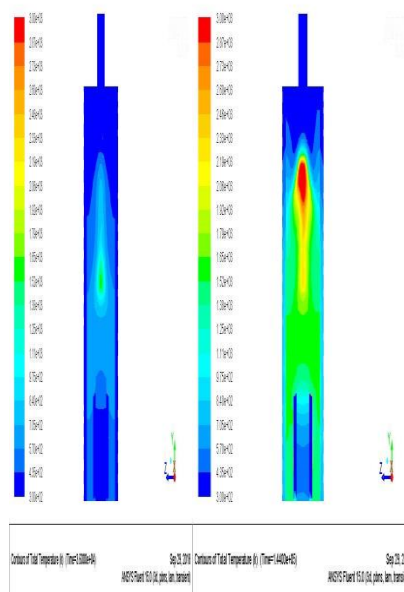


Рис. 5 – Температурне поле електрокальцинатора після обробки на протязі 40 год за швидкості завантаження $0,0007\text{ м/с}$ та сили струму 20 кА

На режим роботи електрокальцинатора впливає не тільки сила струму, що подається, а й швидкість завантаження матеріалу. У зв'язку з цим виникає потреба дослідження впливу швидкості завантаження на температурні поля електрокальцинатора.

Температурне поле електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,001 м/с та сили струму 15 кА. При збільшеній швидкості завантаження (0,001 м/с) наприкінці 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 380÷630 К у II зоні. Максимальна температура досягається біля верхнього електроду та становить 733 К (рис. 6, а).

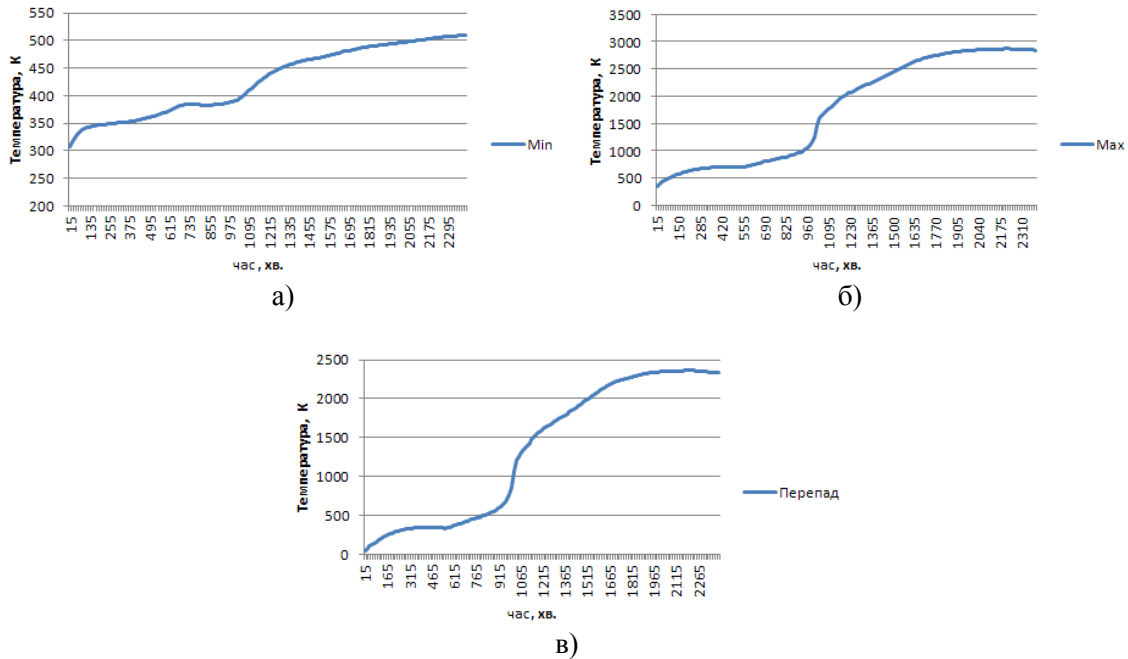


Рис. 6 – Температури у II зоні електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,001 м/с та сили струму 15 кА: а) мінімальна; б) максимальна; в) перепад температур

Швидкість нагрівання варіюється від 0,11°C/хв. для шарів біля стінки апарату до 0,62°C/хв. для центральних шарів (рис. 6, б), що значно нижче, ніж швидкість нагрівання на даному інтервалі часу за номінальних значень (0,15÷2,15°C/хв.). Таким чином, збільшення швидкості завантаження спричинило зменшення швидкості нагрівання по всьому апарату, при цьому найбільший вплив на температурні поля спостерігається у центральних шарах матеріалу, для яких спадання швидкості нагрівання складає 1,53°C/хв. У результаті такого повільного нагрівання перепад температур на кінець 10 години обробки склав 361 К (рис. 6, в), що майже на 1000 К менше за перепад при номінальних значеннях параметрів.

За наступні 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 436÷2024 К у II зоні. Різке зростання максимальної температури спричинене зниженням електричного опору матеріалу. На відміну від попередніх досліджень максимальна температура зростає протягом всього інтервалу часу.

На 1000 хв. обробки разом з різким зростанням максимальної температури спостерігається значне збільшення швидкості зростання мінімальної температури (рис. 6, а), після чого мінімальна температура доволі лінійно зростає за рахунок теплообміну з більш нагрітими шарами матеріалу.

Швидкість зростання максимальної температури на даному проміжку часу значно збільшується у порівнянні з попереднім проміжком часу (2,13°C/хв.), а середня швидкість зростання мінімальної температури зменшується до 0,1°C/хв. За рахунок цього перепад температур зростає і наприкінці 20 години обробки складає 1587°C (рис. 6, в), що на 974°C менше за перепад за аналогічний проміжок часу у випадку моделювання з номінальними значеннями технологічних параметрів. Варто зазначити, що хоча й перепад температури наприкінці 20 години зменшився

у порівнянні з аналогічним інтервалом за номінальних значень технологічних параметрів, але максимальна температура продовжує зростати, що у подальшому призведе й до зростання перепаду температур.

Тридцята та сорокова година обробки матеріалу супроводжуються процесами виходу максимальної температури на усталений рівень. Швидкість зростання мінімальної температури наприкінці 30 години – $0,082^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$, наприкінці 40 години – $0,034^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ (рис. 6, а). Максимальна температура збільшується і виходить на усталений рівень, швидкість нагрівання складає $1,18^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ наприкінці 30 години, $0,12^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ – наприкінці 40 години (рис. 6, б). За рахунок зростання максимальної температури до позначки 2841 К перепад температур збільшується до 2332°C (рис. 6, в), що на 75°C більше у порівнянні з результатами моделювання за номінальних параметрів.

У результаті моделювання 40 год. процесу термообробки вуглецевої сировини температура в центральних шарах, у середньому, складає 1710 К (1437°C), тоді як у шарах, що знаходяться біля стінок апарату, середня температура – 860 К (587°C) (рис. 7). Таким чином, для середніх температур перепад складає 850°C , що на 40°C більше середнього перепаду за номінальних значень технологічних параметрів. Бачимо, що зі збільшенням швидкості завантаження спостерігається зниження температури по всьому робочому об'єму апарату, що негативно впливає на якість матеріалу на виході. За таких перепадів температур умова усереднення властивостей обробленого матеріалу знову таки не виконується, так само, як і середня температура не досягає 2200°C , а, отже, обраний технологічний режим не є оптимальним для даного процесу та апаратного забезпечення. До того ж збільшення швидкості завантаження означає зменшення часу термообробки матеріалу, що також може негативно вплинути на якісні показники обробленого матеріалу [1-2, 10-11].

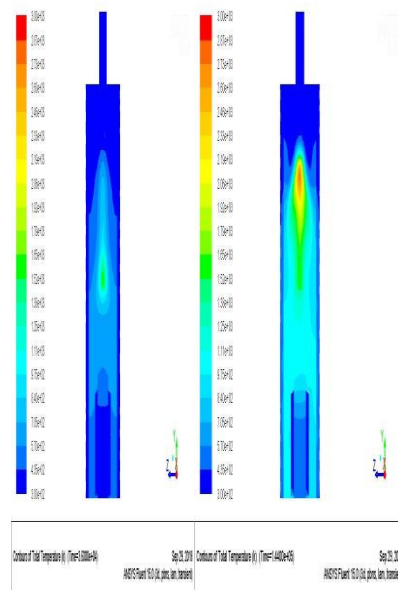


Рис. 7 – Температурне поле електрокальцинатора після обробки на протязі 40 год за швидкості завантаження $0,001 \text{ м/с}$ та сили струму 15 кА

Висновки

Підвищення ефективності термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі тісно пов'язане з розвитком наукових уявлень про процеси, що протікають в електрокальцинаторі та дослідженнями даного процесу за допомогою математичних моделей.

Аналіз існуючих досліджень процесу показав відсутність дослідження впливу технологічних параметрів на температурні поля робочого простору електрокальцинатора. Тому для проведення даного дослідження на основі математичної моделі [11, 12] було розроблено числову модель процесу.

В результаті досліджень, проведених за допомогою розробленої моделі, виявлено пози-

тивний вплив підвищення струму, що підводиться, та негативний вплив підвищення швидкості завантаження на середню температуру в II зоні апарату. Водночас підвищення даних технологічних параметрів негативно впливає на перепад температур в апараті, викликаючи підвищення перепаду, що негативно впливає на якість обробленого матеріалу.

Отримані результати можуть бути використані для розробки більш ефективних регламентів виробництва та можуть бути враховані при розробці нових систем керування даним процесом.

Час розрахунку отриманої моделі на сучасному стаціонарному комп'ютері складає декілька годин. Така тривалість розрахунку робить неможливим використання даної моделі у системах керування реальним часом. Тому у подальших дослідженнях планується розробити спрощену математичну модель, після чого використати її та результати даного дослідження для розробки нової системи керування даним процесом.

Перелік використаних джерел:

1. Чалых А.Ф. Графитация углеродистых материалов / А.Ф. Чалых, В.П. Соседов. – М. : Металлургия, 1987. – 176 с.
2. Производство электродной продукции / А.К. Санников [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1985. – 129 с.
3. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов / С.В. Шулепов. – М. : Metallurgiya, 1972. – 256 с.
4. Исследование электрического контактного сопротивления графита с медью и терморасширенным графитом / А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, И.В. Пулинец, Т.В. Лазарев, А.Ю. Педченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5 (5). – С. 45-49. – Режим доступа: DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27989.
5. Цыбуля Е.И. Анализ влияния физико-химических процессов на технологию производства термоантрацита в электрокальцинаторах / Е.И. Цыбуля, М.И. Гасик, А.Г. Гриншпунт // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2013. – № 2. – С. 19-23.
6. Печи для производства высокочистых углеродных материалов / М.В. Губинский, С.С. Федоров, Н.В. Ливитан, И.В. Барсуков, А.Г. Гогоци, Н.П. Бродниковский // Теория и практика тепловых процессов в металлургии : межд. научно-практ. конф., 18-21 сентября 2012. – Екатеринбург. – С. 79-83.
7. Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов / М.В. Губинский [и др.] // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2013. – № 2. – С. 92-96.
8. Современное состояние проблемы получения графитированного наполнителя электродных изделий в электрокальцинаторах / Е.Н. Панов, А.А. Матвиенко, А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, М.Е. Титов, И.В. Пулинец, Т.В. Лазарев, П. В. Степура // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2011. – № 1 (7). – С. 49-55. – (Серія : Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження).
9. Дикарева А.В. Математическая модель тепловой работы электрокальцинатора / А.В. Дикарева, Т.Е. Герасименко, Е.И. Мешков // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докладов I Всероссийской научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2012) с международным участием, 29-30 марта 2012 г. – Екатеринбург: [УрФУ], 2012. – С. 43-46.
10. Лазарев Т.В. Закономірності процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах – електрокальцинаторах : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Лазарев Тарас Валерійович. – Київ, 2015. – 193 с.
11. Теоретические и экспериментальные исследования теплоэлектрического и механического состояния высокотемпературных агрегатов / А.Я. Карвацкий [и др.]. – К. : НТУУ «КПИ», 2012. – 356 с.
12. Моделювання графітування нафтового коксу в шахтній електропечі неперервної дії / С.М. Панов, А.Я. Карвацький, С.В. Кутузов, С.В. Лелека, П.В. Степура // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2011. – № 1 (7). – С. 48-52. – (Серія : Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження).
13. Бородуля В.А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое / В.А. Бородуля. – Минск : Наука и техника, 1973. – 173 с.

14. Петров Б.Ф. Энергосбережение при производстве электродного термоантрацита / Б.Ф. Петров – К. : Екотехнология, 2006. – 144 с.
15. Управление процессом прокаливания антрацита по измеряемой величине падения напряжения в антрацитовой загрузке электрокальцинатора / М.И. Гасик [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 5. – С. 31-35.
16. Пат. 2121989 Россия, МПК С 04 В 35/52. Электродная масса для самообжигающихся электродов рудовосстановительных печей и способ ее получения / Ж.Л. Тимпанова, И.Р. Немировский, М.П. Арлиевский, А.М. Кисилев, Ю.Н. Сапов, А.С. Дерябин, М.И. Лифсон, С.З. Маргулис, В.А. Ровинский, Л.А. Богданов. – № 97102287/03; заявл. 18.02.97; опубл. 20.11.98.

References:

1. Chalyh A.F., Sosedov V.P. *Grafitacija uglerodistyh materialov* [Carbon materials Graphitization]. Moscow, Metallurgija Publ., 1987. 176 p. (Rus.)
2. Sannikov A.K., Somov A.B., Kliuchnikov V.V. *Proizvodstvo elektrodnoi produktsii* [Electrode products manufacturing]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 129 p. (Rus.)
3. Shulepov S.V. *Fizika uglegrafitovykh materialov* [Carbon and graphite material physics]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972. 256 p. (Rus.)
4. Karvatskii A.Ia., Leleka S.V., Pulinets I.V., Lazarev T.V., Pedchenko A.Iu. Issledovanie elektricheskogo kontaktnogo soprotivleniia grafita s med'iu i termorasshirenym grafitom [Electrical contact resistance of graphite with copper and thermally expanded graphite research]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2014, no. 5, pp. 45-49. doi: 10.15587/1729-4061.2014.27989. (Rus.)
5. Tsybulia E.I., Gasik M.I., Grinshpunt A.G. Analiz vliianiia fiziko-khimicheskikh protsessov na tekhnologiiu proizvodstva termoantratsita v elektrokal'tsinatorakh [Physicochemical processes effect on thermoanthracite production in electrocalcinators technology analysis]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2013, no. 2, pp. 19-23. (Rus.)
6. Gubinskii M.V., Fedorov S.S., Livitan N.V., Barsukov I.V., Gogotsi A.G., Brodnikovskii N.P. Pechi dlia proizvodstva vysokochistykh uglerodnykh materialov. *Anotatsii dopovidei Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Teoriia i praktika teplovykh protsessov v metallurgii»* [Furnaces for high-purity carbon materials production. Proceedings of the Int. Sci.-Pract. Conf. «Theory and practice of thermal processes in metallurgy»]. Ekaterinburg, 2012, pp. 79-83. (Rus.)
7. Gubinskii M.V., Fedorov S.S., Livitan N.V., Gogotsi A.G. Analiz energeticheskoi effektivnosti pechei dlia vysokotemperaturnoi termicheskoi obrabotki uglerodnykh materialov [Kilns for carbon materials high-temperature heat treatment energy efficiency analysis]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2013, no. 2, pp. 92-96. (Rus.)
8. Matvienko A.A., Karvatskii A.Ia., Leleka S.V., Titov M.E., Pulinets I.V., Lazarev T.V., Stepura P.V. Sovremennoe sostoianie problemy polucheniia grafitirovannogo napolnitelia elektrodnykh izdelii v elektrokal'tsinatorakh [The current state of obtaining graphitized filler electrode products in electric calciner problem]. *Visnyk Nacional'nogo tehnicnogo universytetu Ukrainy «Kyiv vs'kyj politechnyj instytut». Serija «Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozbezhenja» – Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*, 2011, no. 1, pp. 49-55. (Rus.)
9. Dikareva A.V., Gerasimenko T.E., Meshkov E.I. Matematicheskaia model' teplovoi raboty elektrokal'tsinatora. *Doklady I Vseros. nauchn.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2012) s mezhd. uchastiem «Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve»* [Mathematical model of electric calciner thermal work. Reports of the I All-Russian Sci-pract. conf. of Students, Postgraduates and Young Scientists (TIM'2012) with int. participation «Heat engineering and computer science in education, science and production»]. Ekaterinburg, 2012, pp. 43-46. (Rus.)
10. Lazarjev T.V. *Zakonomirnosti procesu vysokotemperaturnogo obroblennja ruhomogo sharu sypuchykh vuglecevykh materialiv v elektrychnykh pechah – elektrokal'tsinatorah*. Diss. kand. techn. nauk [The mechanism of high temperature processing of moving bed of granular carbonaceous material in electric furnaces. Cand. tech.sci. diss.]. Kyiv, 2015. 193 p. (Ukr.)
11. Karvatskii A.Ia., Panov E.N., Kutuzov S.V. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniia tep-*

- loelektricheskogo i mekhanicheskogo sostoianiia vysokotemperaturnykh agregatov* [Theoretical and experimental studies of the thermoelectric and mechanical state of high-temperature aggregates]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2012, 356 p. (Rus.)
12. Panov Je.M., Karvac'kyj A.Ja., Kutuzov S.V., Leleka S.V., Stepura P.V. Modeljuvannja grafituvannja naftovogo koksu v shahtnij elektropechi neperervnoi' dii' [Modeling of the oil coke graphitizing in a continuous electric shaft furnace]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu Ukrainy* «Kyiv's'kyj politehničnyj instytut». Serija «Himichna inzhenerija, ekologija ta resursoberezhennja» – *Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*. Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving», 2011, no. 1, pp. 48-52. (Ukr.)
 13. Borodulia V.A. *Vysokotemperaturnye protsessy v elektrotermicheskom kipiashchem sloe* [High-temperature processes in the electrochemical fluidized bed]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973, 173 p. (Rus.)
 14. Petrov B.F. *Energoberezhenie pri proizvodstve elektrodnoho termoantratsita* [Energy saving in the electrode thermoanthracite production]. Kiev, Ekotekhnologija Publ., 2006, 144 p. (Rus.)
 15. Gasik M.I., Tsybulia E.I., Bezuglyi A.V. Upravlenie protsessom prokalivaniia antratsita po izmeriaemoi velichine padeniia napriazheniia v antratsitovoi zagruzke elektrokalk'insatora [Control of anthracite calcination process by measured value of drop in voltage in anthracite loading of electrocalcinators]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2009, no. 5, pp. 31-35. (Rus.)
 16. Timpanova Zh.L., Nemirovskii I.R., Arlievskii M.P., Kisilev A.M., Sapov Iu.N., Deriabin A.S., Lifson M.I., Margulis S.Z., Rovinskii V.A., Bogdanov L.A. *Elektrodnaia massa dlja samoobzhi-gaiushchikhsia elektrodov rudovosstanovitel'nykh pechei i sposob ee polucheniiia* [Electrode mass for ore reduction furnaces self-baking electrodes and the method for obtaining it]. Patent RU, no. 2121989. (Rus.)

Рецензент: Є.М. Панов
д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Сікорського

Стаття надійшла 24.02.2019

УДК 622.83

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181487

© Добровольська Л.О.¹, Литвиненко С.Е.²

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

У статті розглядаються питання управління температурою перегрітої пари в котельних агрегатах. Температура повинна підтримуватися близькою до своєї величини, заданої при проектуванні агрегату, незалежно від характеру режиму роботи і навантаження котла. Пропонується математичну модель системи регулювання температури перегрітої пари з урахуванням наявних на реальному об'єкті нелінійностей. Встановлено, що система управління адекватно реагує на обурення і відновлює задану температуру перегрітої пари, змінюючи при цьому необхідні параметри системи. Пропонується здійснити модернізацію системи регулювання температурного режиму котельного агрегату за допомогою установки нового пароохолоджувача VariCool і системи діагностики вібрації регулюючих клапанів.

Ключові слова: автоматичне регулювання, котельний агрегат, температура пари, пароперегрівач, пароохолоджувач, регулюючий клапан, уприскування «власного» конденсату, ентальпія пари, математична модель.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ludmila.dobrovolskaya@ukr.net

² студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь