

УДК 681.51:622.788

В.Й. Лобов¹, канд. техн. наук, доц.,
М.О. Котляр²1 – Державний вищий навчальний заклад „Криворізький
національний університет“, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: lobov.vjcheslav@yandex.ru2 – ТОВ „ML Company“, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: misha.kotliar@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ШАРУ ОБКОТИШІВ У ГАЗОПОВІТРЯНІЙ КАМЕРІ ОБПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ КОНВЕЄРНОГО ТИПУ

V.I. Lobov¹, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
M.A. Kotliar²1 – State Higher Educational Institution “National University of
Krivoy Rog”, Krivoy Rog, Ukraine, e-mail:

lobov.vjcheslav@yandex.ru

2 – LLC “ML Company”, Krivoy Rog, Ukraine, e-mail:
misha.kotliar@gmail.com

THE RESEARCH OF THE PROCESS OF IRON ORE PELLETS LAYER HEAT TREATMENT IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A BELT KILN

Складність у знятті реальних показників протікання температурного режиму випалу в шарі обкотишів газоповітряної камери обпалювальної машини конвеєрного типу (ОМКТ) не дозволяє отримати реальні дані, що можуть бути використані для введення в систему автоматичного регулювання (САР). У зв'язку з цим виникає необхідність у розрахунку температурних значень, що підтверджуються результатами моделювання та можуть бути враховані при проектуванні нових систем автоматичного керування або при їх модернізації.

Мета. На основі законів теплопередачі та теплового випромінювання необхідно побудувати математичну модель і визначити шляхом моделювання розподіл температурного поля в шарі обкотишів газоповітряної камери ОМКТ.

Методика. Для визначення конкретних значень температур у шарі обкотишів з урахуванням конструктивних параметрів ОМКТ ділянка шару обкотишів розбивається на елементарні мінімальні блоки кубічної форми, що дозволяє змоделювати процеси теплообміну всередині шару обкотишів.

Результати. У середовищі *Matlab Simulink* проведено дослідження розподілу температурного поля в шарі обкотишів, наданий опис основних алгоритмів роботи програми, наведені приклади візуалізації результатів моделювання, визначені шляхи вдосконалення та способи застосування розробленої математичної моделі. Результати моделювання дозволяють використовувати отримані дані для проектування САР процесом термічної обробки обкотишів. При цьому основні режими термічної обробки обкотишів моделюються на основі аналізу інтенсивності генерованого шаром обкотишів інфрачервоного випромінювання. Модель є гнучкою та враховує основні параметри технологічного процесу обпалювання обкотишів і параметрів ОМКТ.

Наукова новизна. Полягає в тому, що термічні процеси обпалювання обкотишів у газоповітряній камері ОМКТ визначаються з урахуванням процесів теплопередачі та теплового випромінювання всередині шару обкотишів, що впливає на підвищення якості кінцевого продукту за рахунок точного дотримання умов термічної обробки обкотишів.

Практична значимість. Результати моделювання дозволяють використовувати отримані дані для проектування сучасних автоматизованих систем керування процесом термічної обробки обкотишів.

Ключові слова: конвеєр, піч, обкотиші, термічна обробка, результати моделювання

Постановка проблеми. Обпалювання обкотишів здійснюється в шахтних печах, у печах конвеєрного типу та в комбінованих установках різних конструкцій. Найчастіше застосовуються обпалювальні машини конвеєрного типу (ОМКТ). Підвищення вимог до якості продукції, зниження її собівартості та покращення екологічної ситуації навколо металургійних підприємств є важливими умовами вдосконалення ОМКТ. Одним із найважливіших напрямів удосконалення виробництва залізрудних окислених обкотишів є ефективне керування процесом їх обпалювання, що забезпечує покращення якості продукції та підвищення продуктивності

обпалювальної печі. У зв'язку з цим задача автоматизації процесу обпалювання обкотишів на ОМКТ є досить актуальною.

Виділення невирішеної проблеми. Техніко-економічні показники діяльності та результатів модернізації фабрик огрудкування показують, що на вітчизняних ОМКТ існують резерви зменшення питомої витрати природного газу за рахунок більш раціонального температурного режиму обпалення обкотишів в ОМКТ. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є вдосконалення системи автоматичного регулювання (САР) автоматизації процесів термічної обробки обкотишів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний стан процесу автоматизації ОМКТ дає змогу

визначити основні тенденції у вирішенні покращення термічних режимів роботи. В основу проектів автоматизації автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) на Північному (м. Кривий Ріг, Ук-раїна), Лебединському (м. Губкін, Росія) й інших ГЗК покладені оновлення конструктивно-технічної бази існуючих систем автоматичного регулювання, використання сучасних програмованих логічних контролерів (ПЛК), розробка нових систем керування процесом обпалювання обкотишів [1–4]. Серед перспективних тенденцій розвитку ОМКТ необхідно виділити напрям використання широтно-імпульсної модуляції в керуванні пальниками. Основною перевагою даного нововведення є забезпечення максимально точного та гнучкого регулювання відношенням повітря-газ для окремого пальника. Широтно-імпульсне керування забезпечує зменшення витрат палива на нагрівання об'єктів, що мають велику теплову інерцію. За рахунок цієї переваги в імпульсних системах досягається економія в розмірі до 25% у порівнянні з пропорційними, збільшення питомої продуктивності – на 10–15%. Однак серед невирішених питань автоматизації ОМКТ залишаються усунення впливу сусідніх пальників на покази регулюючих і контрольних термодар та відсутність системи автоматичного контролю рівномірності нагріву шару обкотишів уздовж ширини конвеєрної стрічки.

Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми. Складність зняття реальних показників протікання температурного режиму обпалення у шарі обкотишів не дозволяє отримати контрольовані дані, що можуть бути використані для введення в САР процесів термічної обробки обкотишів на ОМКТ.

У зв'язку з цим виникає необхідність мати дані, що розраховані аналітичним шляхом, температурні значення яких підтверджуються результатами моделювання та які можуть бути використані при проектуванні нових або модернізації існуючих САР.

Формулювання мети роботи. Метою роботи є підвищення ефективності керування процесом термічної обробки залізородних обкотишів на ОМКТ для забезпечення зниження питомої витрати енергоносіїв, збільшення продуктивності, покращення якісних характеристик кінцевого продукту за рахунок автоматизації процесу із застосуванням для впровадження у виробництво результатів дослідження на математичній моделі розподілу температурного поля у шарі обкотишів газоповітряної камери ОМКТ на основі законів теплопередачі та теплового випромінювання.

Викладення основного матеріалу. Математична модель для дослідження розподілу температурного поля у шарі обкотишів газоповітряної камери реалізована в середовищі *Matlab Simulink* (версія *R2001a*). Графічне представлення моделі в середовищі *Simulink* наведено на рис. 1. Головна програма представлена у вигляді поєднання чотирьох основних функцій, що взаємодіють між собою через технологічні параметри, вихідні величини та глобальні змінні:

1) *Increment_T* – розрахунок зміни розподілу температур обкотишів унаслідок згоряння природного газу.

2) *Temp_dt* – моделювання процесів теплообміну всередині шару обкотишів.

3) *Air_count* – обчислення витрат повітря, що необхідні для повного згоряння палива.

4) *Move* – моделювання руху конвеєрної стрічки.

Інтервал дискретизації роботи *Simulink*-моделі вибраний рівним $0,1$ с. Усі параметри розробленої моделі винесені в окремі блоки та можуть бути легко змінені користувачем.

Опис функції *Increment_T*. Дана функція формує на виході масив $T_inc [a,b,h]$ змін температур, °C, кожного блоку шару обкотишів після впливу на нього теплоти згоряння природного газу. Блок-схема функції *Increment_T* зображена на рис. 2, а в табл. 1 описане призначення кожного блоку наведеної блок-схеми.

Опис функції *Temp_dt*. Дана функція повертає в головну програму масив $T_out [a,b,h]$, що являє собою розподіл температур у шарі обкотишів, який сформувався наприкінці інтервалу часу dt у результаті процесів теплообміну. Блок-схема функції *Temp_dt* зображена на рис. 3, а.

У табл. 2 описане призначення кожного блоку блок-схеми функції *Temp_dt*.

Опис функції *Air_count*. Функція повертає до головної програми масив $air_LR [1,2]$, який містить значення витрат повітря, що необхідні для повного згоряння природного газу на кожному з пальників. Де $air_LR (1,1)$ – витрати повітря на лівому пальнику, $air_LR (1,2)$ – витрати повітря на правому пальнику. Блок-схема функції *Air_count* зображена на рис. 3, б.

У табл. 3 описане призначення кожного блоку блок-схеми функції *Air_count*.

Результати моделювання, з використанням розробленої моделі, представлені на рис. 4. Візуалізація розподілу температур обкотишів реалізується за шаблоном, наведеним на рис. 5. Додатково відображаються значення витрат повітря, що необхідні для повного згоряння природного газу на кожному з пальників.

Висновки та напрям подальших досліджень. Використання розробленої математичної моделі дозволило виконати дослідження термічних процесів обпалювання обкотишів у газоповітряній камері обпалювальної машини конвеєрного типу. Дослідження виконані в середовищі *Matlab Simulink* (версія *R2001a*) з урахуванням процесів теплопередачі та теплового випромінювання всередині шару обкотишів. Результати моделювання дозволяють побудувати САР процесом термічної обробки обкотишів на основі аналізу інтенсивності генерованого шаром обкотишів інфрачервоного випромінювання. Модель є гнучкою та враховує основні параметри технологічного процесу обпалювання обкотишів і параметрів обпалювальної машини конвеєрного типу. При цьому забезпечується економічна ефективність САР, так як вона формуватиметься на основі перерозподілу витрат природного газу між пальниками, забезпечуючи рівномірне теплове поле шару обкотишів. Усе це впливатиме на підвищення якості кінцевого продукту за рахунок точного дотримання умов термічної обробки обкотишів.

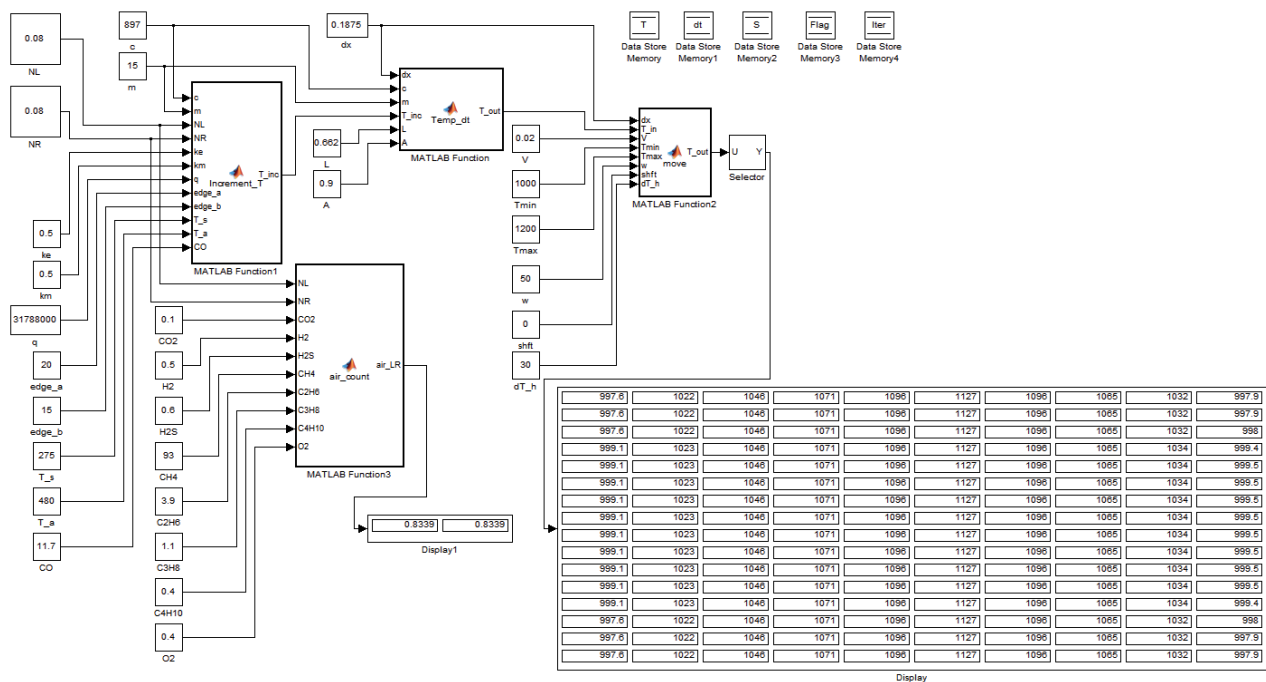


Рис. 1. Графічне представлення моделі розподілу температурного поля у шарі обкотишів, виконане в середовищі Simulink

Таблиця 1

Опис блок-схеми функції Increment_T

Номер блоку	Призначення
0	Початок блок-схеми
1	Визначення параметрів розбиття шару обкотишів на складові елементи, де a, b, h – довжина, ширина та висота досліджуваної ділянки шару обкотишів, виміряна в кількості нероздільних блоків
2	Підключення глобальної змінної dt
3	Обнулення масиву змін температур кожного блоку шару обкотишів
4	Привласнення додатковим коефіцієнтам значень, що відповідають заданому типу палива
5	Обчислення кількостей теплоти, що вивільняються в результаті згоряння газу на кожному з пальників за проміжок часу dt
6	Обчислення кількості блоків, що знаходяться в зоні безпосереднього впливу лівого/правого пальника
7	Цикл зміни індексу ширини ділянки шару обкотишів
8	Цикл зміни індексу довжини ділянки шару обкотишів
9	Перевірка умови розташування поточного блоку в зоні безпосереднього впливу лівого або правого пальника (аналіз по довжині ділянки шару обкотишів)
10	Перевірка умови розташування поточного блоку в зоні безпосереднього впливу правого пальника (аналіз по ширині ділянки шару обкотишів)
11	Обчислення змін температур блоків, що знаходяться в зоні безпосереднього впливу правого пальника
12	Перевірка умови розташування поточного блоку в зоні безпосереднього впливу лівого пальника (аналіз по ширині ділянки шару обкотишів)
13	Обчислення змін температур блоків, що знаходяться в зоні безпосереднього впливу лівого пальника
14	Цикл зміни індексу висоти ділянки шару обкотишів
15	Цикл зміни індексу ширини ділянки шару обкотишів
16	Цикл зміни індексу довжини ділянки шару обкотишів
17	Обчислення зміни температури кожного блоку шару обкотишів у результаті згоряння природного газу, виведення результату виконання функції в головну програму
18	Кінець блок-схеми

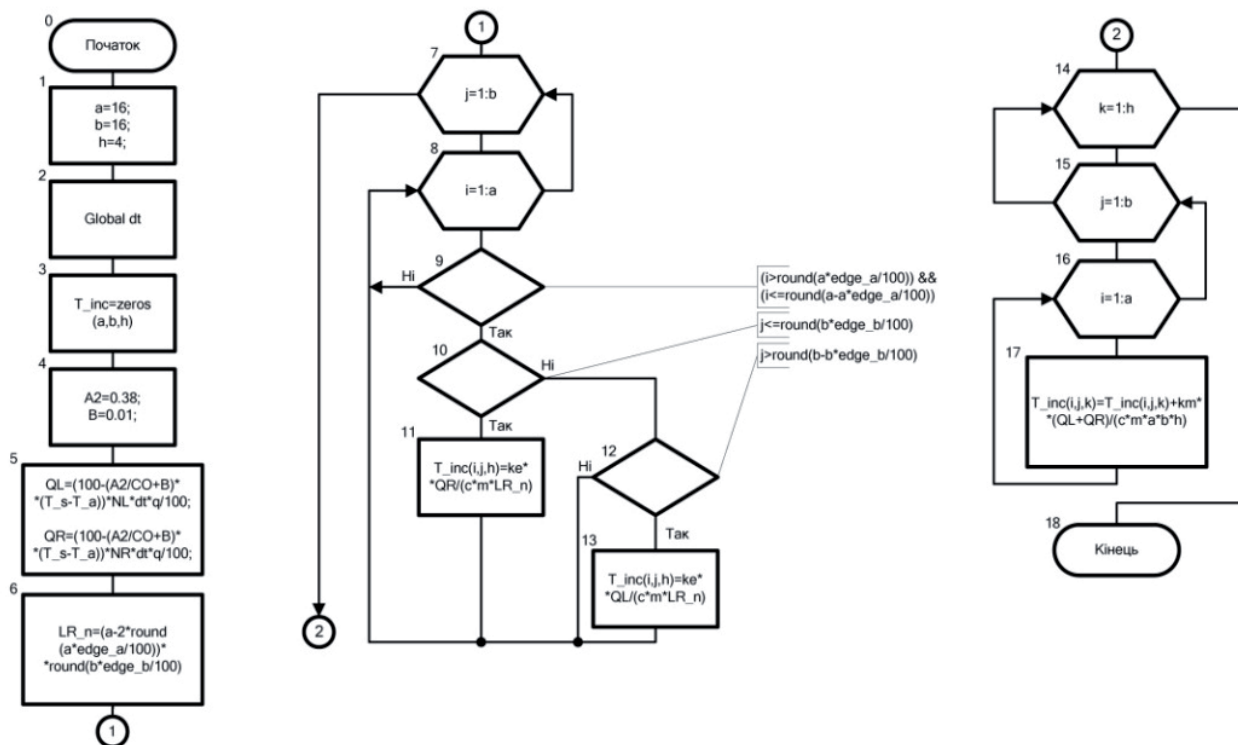


Рис. 2. Блок-схема функції Increment_T

Таблиця 2

Опис блок-схеми функції Temp_dt

Номер блоку	Призначення
0	Початок блок-схеми
1	Визначення параметрів розбиття шару обкотишів на складові елементи, де a, b, h – довжина, ширина та висота досліджуваної ділянки шару обкотишів, виміряна в кількості нероздільних блоків
2	Підключення глобальних змінних T та dt
3	Урахування результатів нагріву шару обкотишів унаслідок згоряння палива (збільшення кожного елемента масиву T на величину, що зберігається у відповідній комірці масиву T_{inc})
4	Обнуління масивів dT та T_{out}
5	Цикл зміни індексу висоти ділянки шару обкотишів
6	Цикл зміни індексу ширини ділянки шару обкотишів
7	Цикл зміни індексу довжини ділянки шару обкотишів
8	Обчислення зміни температури поточного блоку шару обкотишів $dT(i, j, k)$ за інтервал часу dt
9	Формування оновленого стану розподілу температур в шарі обкотишів, виведення результату виконання функції в головну програму
10	Кінець блок-схеми

Таблиця 3

Опис блок-схеми функції Air_count

Номер блоку	Призначення
0	Початок блок-схеми
1	Встановлення значення коефіцієнта надлишку повітря для даної системи керування пальниками
2	Обчислення теоретичного значення об'єму повітря, що необхідне для повного згоряння 1 м^3 природного газу заданого хімічного складу
3	Обнуління масиву витрат повітря $air_{LR}[1,2]$
4	Обчислення значень витрат повітря, що необхідне для повного згоряння природного газу на кожному з пальників
5	Кінець блок-схеми

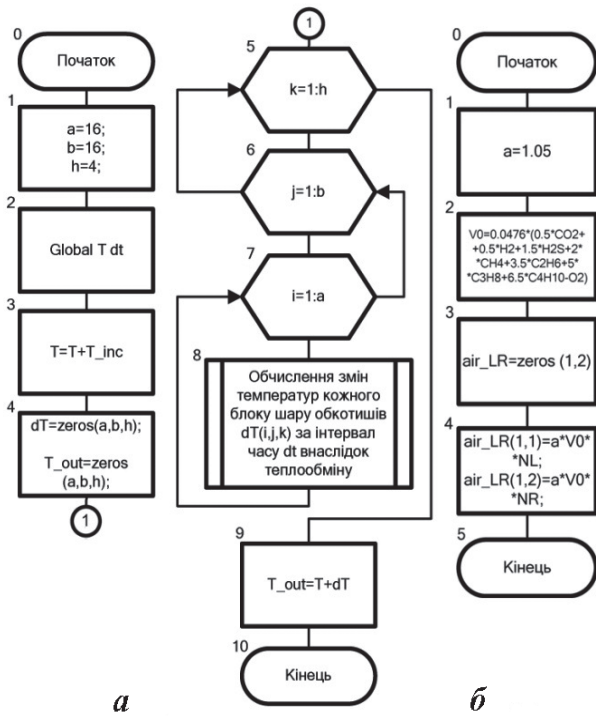


Рис. 3. Блок-схеми функцій Temp_dt (а) та Air_count (б)

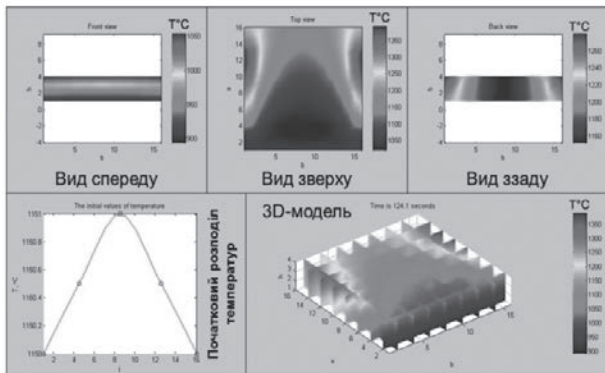


Рис. 4. Графічна інтерпретація розподілу температурного поля у шарі обкатишів

Шар обкатишів (вид спереду)	Шар обкатишів (вид зверху)	Шар обкатишів (вид ззаду)
Графік розподілу температури поверхні шару обкатишів при початковому нагріві (вздовж ширини конвеєру)	Шар обкатишів (3D модель)	

Рис. 5. Шаблон вікна візуалізації результатів роботи головної програми

Список літератури / References

1. Рубан С.А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С.А. Рубан, В.Й. Лобов // *Радиоелектроніка. Інформатика. Управління*. – 2008. – С. 69–74
 Ruban, S.A. and Lobov, V.I. (2008), “Development of principles for thermal management of process of burning of pellets with the forecast of ANFIS models”, *Radioelektronika. Informatika. Menedzhment*, pp. 69–74.
2. Юсфин Ю.С. Интенсификация производства и улучшение качества сырых окатышей / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, Л.К. Антоненко – М.: *Металлургия*, 1994. – 240 с.
 Yusfin, Yu.S., Pashkov, N.F. and Antonenko, L.K. (1994), *Intensifikatsiya proizvodstva i uluchsheniye kachestva syrykh okatyshey* [Production Intensification and Improvement of the Quality of Raw Pellets], Metallurgiya, Moscow, Russia.
3. Цаплин А.И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии / А.И. Цаплин, И.Л. Никулин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. унив., 2011. – 299 с.
 Tsaplin, A.I. and Nikulin, I.L. (2011), *Modelirovaniye teplofizicheskikh protsessov i obyektov metallurgii* [Modeling of Thermal Processes and Objects in Metallurgy], Perm State Technical University, Perm, Russia.
4. Боковиков Б.А. Математическое моделирование динамики процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, М.И. Найдич // *Металлургическая теплотехника*. – 2002. – № 8. – С. 25–31.
 Bokovikov, B.A., Malkin, V.M. and Naidich, M.I. (2002), “Mathematical modeling of the dynamics of the pellets’ firing process on the conveyor machine”, *Metallurgicheskaya Teplotekhnika*, no. 8, pp. 25–31.

Сложность в снятии реальных показателей протекания температурного режима обжига в слое окатышей газозвдушной камеры обжиговой машины конвейерного типа (ОМКТ) не позволяет получить реальные данные, которые могут быть использованы для введения в систему автоматического регулирования (САР). В связи с этим возникает необходимость в расчете температурных значений, которые подтверждаются результатами моделирования и могут быть учтены при проектировании новых систем автоматического управления или при их модернизации.

Цель. На основе законов теплопередачи и теплового излучения необходимо построить математическую модель и определить путем моделирования распределение температурного поля в слое окатышей газозвдушной камеры ОМКТ.

Методика. Для определения конкретных значений температур в слое окатышей с учетом конструктивных параметров ОМКТ участки слоя окатышей разбиваются на элементарные минимальные блоки кубической формы, что позволяет смоделировать процессы теплообмена внутри слоя окатышей.

Результаты. В среде *Matlab Simulink* проведено исследование распределения температурного поля в слое окатышей, дано описание основных алгоритмов работы программы, приведены примеры визуализации результатов моделирования, определены пути совершенствования и способы применения разработанной математической модели. Результаты моделирования позволяют использовать полученные данные для проектирования САР процессом термической обработки окатышей. При этом основные режимы термической обработки окатышей в слое моделируются на основе анализа интенсивности генерируемого слоем окатышей инфракрасного излучения. Модель является гибкой и учитывает основные параметры технологического процесса обжига окатышей и параметров ОМКТ.

Научная новизна. Заключается в том, что термические процессы обжига окатышей в газозооной камере ОМКТ определяются с учетом процессов теплопередачи и теплового излучения внутри слоя окатышей, что влияет на повышение качества конечного продукта за счет точного соблюдения условий термической обработки окатышей.

Практическая значимость. Результаты моделирования позволяют использовать полученные данные для проектирования современных автоматизированных систем управления процессом термической обработки окатышей.

Ключевые слова: *конвейер, печь, окатыши, термическая обработка, результаты моделирования*

The difficulty of reading the actual indicators of temperature behavior of pellet firing in the gas-air chamber of belt kiln does not allow us to obtain the real data required for the introduction of automatic control systems. Therefore, there is a necessity in the calculations of temperature values, which are confirmed by the results of modelling and can be taken into account when designing new systems of automatic control, or their modernization.

Purpose. Based on laws of heat transfer and thermal radiation need to construct the mathematical model and define through the modeling of the temperature field distribution in the layer of pellets in the gas chamber of the belt kiln.

Methodology. To define specific values of temperature in the layer of pellets with account of design parameters of the belt kiln plots layer pellets are divided into elementary minimum blocks of cubic form, which allow us to simulate the processes of heat transfer inside the layer of pellets.

Findings. In the environment of the *Matlab Simulink* the authors researched the distribution of the temperature field in the layer of pellets. The article describes the main algorithms of the program, gives the examples of visualization of the simulation results, and identifies the ways of improvement and the methods of application of the developed mathematical model. The simulation results allow using the obtained data for the NSC SAR process of thermal treatment of pellets. The main modes of heat treatment of pellets in the layer were modeled based on the analysis of the intensity of the generated developer of infrared radiation. The model is flexible and takes into consideration the basic parameters of technological process of burning pellets and settings of the belt kiln.

Originality. Thermal processes of the pellets firing in gas-air chamber of the belt kiln have been determined in the light of the processes of heat transfer and thermal radiation inside the layer of pellets, improving the final product quality due to exact compliance with the terms of thermal processing of pellets.

Practical value. The simulation results may be used for design of modern automated process control systems for thermal processing of pellets.

Keywords: *pipeline, microwave, pellets, thermal processing, simulation results*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук А.І. Купінім. Дата надходження рукопису 05.03.14.