

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

**Державний обліковий номер:** 0820U100649

**Особливі позначки:** відкрита

**Дата реєстрації:** 31-12-2020

**Статус:** Захищена

**Реквізити наказу МОН / наказу закладу:**



## II. Відомості про здобувача

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Коротинський Антон Петрович

2. Korotynskyi Anton

**Кваліфікація:**

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Вид дисертації:** доктор філософії

**Аспірантура/Докторантура:** так

**Шифр наукової спеціальності:** 151

**Назва наукової спеціальності:** Автоматизація та приладобудування. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**Галузь / галузі знань:**

**Освітньо-наукова програма зі спеціальності:** Не застосовується

**Дата захисту:** 22-12-2020

**Спеціальність за освітою:** Автоматизоване управління технологічними процесами

**Місце роботи здобувача:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Перемоги, буд. 37, м. Київ, Київська обл., 03056, Україна

**Форма власності:**

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

### **III. Відомості про організацію, де відбувся захист**

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** ДФ 26.002.012

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Перемоги, буд. 37, м. Київ, Київська обл., 03056, Україна

**Форма власності:**

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

### **IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Перемоги, буд. 37, м. Київ, Київська обл., 03056, Україна

**Форма власності:**

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

### **V. Відомості про дисертацію**

**Мова дисертації:**

**Коди тематичних рубрик:** 50.43, 28.15

**Тема дисертації:**

1. Автоматизація процесу керування багатоканальними печами випалювання вуглеграфітових виробів
2. Automation of the control process of multi-chamber furnaces for baking carbon products

**Реферат:**

1. Виробництво вуглецевих виробів є надзвичайно ресурсо- та енергозатратним через значний вихід браку в кінцевій продукції та значної тривалості енергозатратного виробництва. Підвищення ефективності даного виробництва навіть на незначний рівень призводить до значних фінансових заощаджень, а тому є актуальною науково-практичною проблемою, особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв. На основі проведеного аналізу процесу випалювання встановлено ключову роль етапу «камера під вогнем як основної стадії з точки зору формування параметрів якості готової продукції і потенціалу для підвищення ефективності ресурсо- та енергозбереження процесу виробництва вуглеграфітових виробів в цілому. Підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів базується на визначенні та реалізації у реальному часі оптимальних режимів роботи печі випалювання. Поставлена задача може бути розв'язана шляхом впровадження ефективних систем керування даним технологічним об'єктом на основі

його математичної моделі. У зв'язку з цим, потребує розв'язання актуальне науково-практичне завдання розроблення системи оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка б відповідала сучасним вимогам ресурсо- та енергозбереження. Обґрунтовано застосування методу математичного моделювання, як фактично безальтернативного методу дослідження процесу випалювання, вуглеграфітового виробництва та сформульовані задачі даного дослідження. У результаті проведеного аналізу відомих на сьогоднішній день математичних моделей процесу випалювання та аналогічних йому процесів визначена модель, на основі якої ґрунтується подальше дослідження режимів роботи багатокамерної печі випалювання. Для математичного моделювання кампанії випалювання вуглецевих виробів реалізована математична модель в розподілених параметрах на основі усереднених по Рейнольдсу рівняння нерозривності, збереження кількості руху, транспорту хімічних компонентів реакції горіння, енергії в ентальпійному вигляді, турбулентної кінетичної енергії і швидкості її дисипації. Сформовано методику та порядок проведення досліджень впливу основних технологічних параметрів процесу випалювання вуглецевих виробів на проходження кампанії. Показано, що математична модель процесу випалювання вуглецевих виробів, яка була використана для дослідження режимів роботи даного технологічного об'єкту, потребує значного часу розрахунку – від декількох годин до декількох десятків годин – і тому не може бути використана у системах керування реального часу. Проведено аналіз відомих методів спрощення математичних моделей, наведено їх переваги та недоліки. На основі аналізу обґрунтовано доцільність використання методу, що базується на наближеному поданні точних розв'язків. Для побудови спрощеної математичної моделі процесу випалювання використовувався метод розділення змінних Фур'є. Розроблені спрощені математичні моделі для трьох режимів роботи камери випалювання – охолодження, нагрівання димовими газами та «камера під вогнем». Проведене дослідження точності та адекватності розроблених моделей показало їх високу ефективність. Аналіз існуючих на сьогоднішній день критеріїв якості готової продукції показав неможливість їх застосування як критеріїв готовності кінцевої продукції. У даній роботі запропоновано розглядати ентропію як критерій готовності продукції, базуючись на тому, що зміна стану вуглецевих матеріалів, які піддаються термічній обробці, супроводжується зміною їх термодинамічних властивостей. Проведений аналіз існуючих на сьогоднішній день систем керування процесом випалювання висвітлив переваги та недоліки запропонованих систем керування, а також показав, що основними складнощами при розробленні системи керування даним процесом є неврахування підсосу повітря, температури повітря, що йде на спалювання, інерційність процесу та його перерегулювання. Запропоновано шляхи для вирішення описаних складнощів, а саме: представлення об'єкта управління як послідовності зв'язаних між собою основних етапів кампанії випалювання, та доцільність використання МРС-керування. Проведено дослідження впливу горизонтів прогнозування та керування при розробці МРС-регуляторів. Для дослідження ефективності розробленої системи керування з МРС-регулятором проведено порівняння останньої з класичним ПІД-регулятором, налаштованим методом Циглера – Ніколса, та селективним ПІД-регулятором. Обґрунтовано доцільність синтезу системи керування на базі штучних нейронних мереж для вирішення задачі визначення ймовірності дефектів у заготовках. Вирішена задача обмеженості необхідних для навчання нейронної мережі даних шляхом застосування особливої структури – автоенкодера. В порівнянні з системою керування з класичним ПІД-регулятором, розроблена система забезпечує меншу витрату палива для досягнення продукції необхідної якості. Запропонований регулятор забезпечує менші перепади та прирости температур протягом всього процесу випалювання.

2. Carbon production is extremely resource- and energy-intensive because of the significant shortage of output and the long duration of energy-consuming production. Increasing the efficiency of this production even to a small level leads to significant financial savings, and therefore is an urgent scientific and practical problem, especially in the current conditions of constant increase in the cost of energy. Increasing the efficiency of the carbon product baking process is based on identifying and implementing in real time the optimum operating modes of the furnace. This task can be solved by implementing effective control systems for this technological object based on its mathematical model. In this regard, the urgent scientific and practical task of developing a system of optimal control of the process of baking carbon products that meets the modern requirements of

resource and energy conservation needs to be solved. The application of the mathematical modeling method as a virtually non-alternative method of investigation of the process of baking graphite production and the objectives of this study are substantiated. As a result of the analysis of the mathematical models of the baking process known to date, and similar processes, the model was used, on the basis of which further study of the modes of operation of the multi-chamber baking furnace is based. For mathematical modeling of the campaign of baking carbon products, a mathematical model in distributed parameters is implemented based on the Reynolds-averaged equation of continuity, conservation of the amount of motion, transport of chemical components of the combustion reaction, energy in enthalpy, turbulent kinetic energy and velocity of its energy. The methodology and procedure for conducting research into the influence of the main technological parameters of the carbon baking process on the campaign progress have been established. It has been shown that a mathematical model of the carbon-baking process used to investigate the modes of operation of a given technological object requires a considerable calculation time - from several hours to several tens of hours - and therefore cannot be used in real-time control systems. The known methods of simplification of mathematical models are analyzed, their advantages and disadvantages are given. Based on the analysis, it is reasonable to use a method based on the approximate representation of exact solutions. A Fourier variable method was used to construct a simplified mathematical model of the baking process. Simplified mathematical models have been developed for the three modes of operation of the chamber - cooling, heating with flue gases and "chamber under fire". The conducted study of the accuracy and adequacy of the developed models showed their high efficiency. An analysis of the existing quality criteria for finished products has shown that it is impossible to use them as the criteria for the finished product readiness. In this paper, it is proposed to consider entropy as a product readiness criterion, on the basis that the change in the state of carbonaceous materials undergoing heat treatment is accompanied by a change in their thermodynamic properties. The analysis of existing control systems of the baking process has revealed the advantages and disadvantages of the proposed control systems, and also showed that the main difficulties in the development of the control system of this process is the failure to take into account the air intake, combustion air temperature, inertia of the process and its overregulation. Ways to solve these difficulties are presented: presenting the control object as a sequence of related stages of the baking campaign, and the expediency of using MPC control. The influence of the horizons of forecasting and control during the development of MPC-controller is investigated. To study the effectiveness of the developed control system with the MPC controller, a comparison of the latter with a classical PID-controller, tuned by the Ziegler - Nichols method, and a selective PID-controller was performed. The feasibility of synthesis of control system based on artificial neural networks to solve the problem of determining the defect probability in the blanks is substantiated. The problem of limited necessity for training of neural network of data by application of special structure - autoencoder is solved. Compared to the control system with the classic PID-controller, the developed system provides less fuel consumption to achieve the products of the required quality. The proposed controller provides smaller variations and temperature increases throughout the baking process.

**Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:**

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:**

**Підсумки дослідження:**

**Публікації:**

**Наукова (науково-технічна) продукція:**

**Соціально-економічна спрямованість:**

**Охоронні документи на ОПВ:**

**Впровадження результатів дисертації:**

**Зв'язок з науковими темами:**

## **VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Жученко Олексій Анатолійович
2. Zhuchenko Oleksii Anatoliiovych

**Кваліфікація:** д. т. н., 05.13.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

**Офіційні опоненти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Купін Андрій Іванович
2. Kupin Andriy Ivanovych

**Кваліфікація:** д.т.н., 05.13.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Осадчий Сергій Іванович

2. Осадчий Сергій Іванович

**Кваліфікація:** д.т.н., 05.13.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

### **Рецензенти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Сазонов Артем Юрійович

2. Sazonov Artem

**Кваліфікація:** к.т.н., 05.13.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Волощук Володимир Анатолійович

2. Voloshchuk Volodymyr

**Кваліфікація:** д. т. н., 01.05.02

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

## VIII. Заключні відомості

Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради

Бідюк Петро Іванович

Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні

Бідюк Петро Іванович

Відповідальний за підготовку  
облікових документів

Реєстратор

Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності



Юрченко Т.А.