

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СИТНІКОВ Олексій Володимирович

УДК 681.51:666.11

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ
РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ ВАННОГО ТИПУ**

Спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерело _____ О.В. Ситніков

Науковий керівник: д.т.н., проф. Жученко Анатолій Іванович

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Ситніков О.В. Моделювання та автоматичне керування тепловим режимом скловарної печі ванного типу. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2023.

Дисертацію присвячено питанням підвищення ефективності роботи регенеративної скловарної печі ванного типу шляхом створення системи керування, яка забезпечить режим енергозбереження функціонування процесу при незмінних показниках якості виробництва. Скловаріння – процес, що потребує високої температури для розігрівання компонентів, з яких виготовляється скломаса у варильній частині печі. Всі компоненти після підготовки подаються до варильного басейну, де відбувається виготовлення (варка) скломаси. Процес скловаріння досить енергоємний. В розвинених країнах витрати палива на варку скла в 1,5-2 рази нижче, ніж вітчизняні показники аналогічного виробництва. Україна має обмежені запаси природного газу і практично всі питання постачання пального на промислові підприємства вирішуються за рахунок імпортування. Ціни на пальне зростають згідно тенденціям ринку, тому використання газу необхідно вести з максимальною економією, при цьому не погіршуючи якість виробленої продукції.

Для процесу характерні внутрішні збурення, зокрема пов'язані з концентрацією вхідного продукту до варильної зони печі, що можуть призвести до браку готової продукції або небажаних зайвих витрат пального. Для забезпечення означених показників в роботі системи керування тепловим режимом скловарної печі виникла необхідність побудови енергоефективної системи керування, що

забезпечить високу якість керування в умовах дії неконтрольованих внутрішніх збурень та зменшення витрат на керування.

Розроблена математична модель скловарної печі на основі структурно-параметричної схеми об'єкту. Математичний опис скловарної печі як об'єкту дослідження включає в себе рівняння зовнішнього теплообміну для скломаси, кладки та газу, математичний опис процесу нагрівання. Під зовнішнім теплообміном розуміють теплообмін між об'єктом та його оточенням: теплообмін між скломасою та оточуючим її середовищем – кладкою та газовим простором. Для кожної зі складових розроблено математичний опис, що враховує взаємодію між складовими в моделі об'єкту керування. Склomаса, кладка та газовий простір має по дві контактні поверхні між складовими. Розроблена система рівнянь зовнішнього теплообміну отримується з рівнянь балансу для ефективного та результуючого випромінювання поверхні та середовища у вигляді рівнянь відповідних теплових потоків. Ефективне випромінювання поверхні скломаси та кладки підпорядковується закону Ламберта – поглинаючі здібності випромінювачів рівні для всіх променевих потоків та дорівнюють відповідним ступеням чорноти та відповідно складається з власного та відбиваючого випромінювання. Аналіз досліджень був проведений для усталеного режиму роботи печі – в першому наближенні результуюче випромінювання кладки прийнято рівним нулю, температура скломаси та кладки взяті такими, що дорівнюють їх середньоефективним величинам.

Користуючись розробленою та дослідженою системою рівнянь для теплових потоків скломаси та кладки розроблена загальна математична модель скловарної печі, яка враховує зв'язки між складовими елементами об'єкта. На основі розробленої моделі отримана передатна функція скловарної печі являє собою складну структуру, що залежить від передатних функцій скломаси, кладки та газового простору за каналами температура газу – вихідна температура скломаси та температура газу – температура кладки у характерних точках. Дана математична модель може бути застосована для аналізу температурного поля скловарної печі в різних перерізах.

Досліджена математична модель скломаси, що представляє собою об'єкт з розподіленими параметрами, в роботі описана диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є з граничними умовами 3-го роду на зовнішній поверхні скломаси при контакті «скломаса-газ» та 2-го роду при контакті «скломаса-кладка». Граничні умови назовні обумовлені відсутністю обміну тепла з навколишнім середовищем, тобто розглядається умова ідеальної теплоізоляції. Дослідження показали та виходячи із конструкційних особливостей скловарної печі, скломасу умовно можна вважати прямокутною областю, товщиною h , що дозволяє розглядати скломасу як необмежену пластину товщиною h . Однак на відміну від типового виду необмеженої пластини в моделі процесу нагрівання скломаси у ванні печі враховано ряд її конструкційних особливостей скловарної печі.

Результати моделювання показали, що розігрівання внутрішньої сторони кладки відбувається під дією теплових потоків великих значень. Математична модель кладки скловарної печі представлена у вигляді одновимірної задачі теплопровідності, з граничними умовами 2-го роду при контакті «кладка-скломаса». Кладка являє собою напівобмежене тіло товщиною δ . Представлено перехід від температури скломаси до температури кладки в різних шарах скломаси, з яких видно, що температура скломаси тим вища, чим вищий шар розглядається, та по глибині температура кладки спадає, що підтверджує прийняті граничні умови на правій поверхні кладки. Окремо розглянута кладка дна печі, як та що контактує з останнім шаром скломаси; дана особливість врахована в загальній моделі об'єкту керування.

Для використання в системі керування на базі моделі скловарної печі, необхідно перевірити адекватність розробленої математичної моделі. Дослідження показали, що модель динаміки нагрівання скломаси в печі відповідає відповідним критеріям адекватності та може бути використана для синтезу системи керування.

Експериментальні дослідження температурних полів скломаси, кладки, газового простору проведені, використовуючи засоби імітаційного моделювання, для кожної із зон печі побудовані у вигляді температурного розподілу в

конкретному перерізі. Дослідження дозволили виявити реакцію температурного поля скломаси та кладки на дії збурення.

В дисертаційній роботі ставилася задача розробки системи керування процесом виготовлення скломаси, яка мала б зберігати стійкість в роботі системи керування та підтримувати на заданому рівні якість готового (вихідного) продукту, шляхом підтримки заданого температурного режиму в заданих технологічним регламентом межах оптимальній витраті пального. Тому сформульована і розв'язана задача адаптивного керування процесом скловаріння, що полягає у підтримці заданого розподілу температур в об'ємі скломаси. Для розв'язання задачі адаптивного керування розроблений та застосований критерій керування $J_i(T^*_i(t), T_i(t), u_i)$, що залежить від вектору u_i , який розглядається в якості керувальної дії (витрати палива) по пальниках печі. Результатом розрахунку критерію керування виступає оптимізація витрати пального та призводить до зміна вектору керуючих дій u_i . Синтез системи керування опирається на розроблену математичну модель скловарної печі, що моделює поведінку скломаси в певних точках у вигляді зміни температур. Як результат синтезу системи є вдосконалення існуючої системи керування та формування нових параметрів системи виходячи із поставлених в роботі задач. Послідовності нових вхідних керуючих дій u_i для пальників печі є визначальною в питанні оптимізації витрати пального.

Проведено дослідження системи керування подачі газу на пальники печі та керування реверсом факелу в парі протилежних пальників з використанням загального регулятора, використовуючи метод системного аналізу. Даний метод дозволяє більш точно вирішити задачу підтримки температурного режиму печі та підтримки параметрів на різних етапах (в різних перерізах) процесу варіння скломаси. При формуванні алгоритму керування спиралися на розроблений критерій керування. Розроблення структури системи керування та алгоритму адаптивного програмного керування відбувалися з використанням мови програмування *UML* та *UML* –діаграм, що дало можливість дослідити всі можливі зв'язки в системі.

В роботі приведено порівняння результатів роботи розробленої системи з існуючою каскадною системою керування тепловим режимом по кожному перерізу печі, виявлено переваги в роботі розробленої системи, існуюча система керування не дає можливість зменшити перегулювання зони розігріву, що призводить до перевищення та не раціонального використання пального.

Розроблена система керування, реалізувала ряд функцій по оптимізації витрати пального, реагування на дію збурення, що діє на об'єкт керування. По даним температур в зонах скловарної печі, для забезпечення оптимального використання газу, відбувається адаптації параметрів налаштування регулятора в залежності від температури у відповідній зоні.

Для вирішення поставленої в роботі задачі розроблена загальна структура та програмне забезпечення експертної системи керування тепловим режимом скловарної печі, використовуючи бази правил нечіткої логіки та адаптивний нечіткий регулятор. Основна задача, що висувається до адаптивного нечіткого регулятора, є формування нових параметрів налаштування загального ПД-регулятора.

В дисертаційній роботі проведено дослідження шляхом порівнянь результатів роботи розробленої адаптивної система, експертної та загальної системи керування тепловим режимом скловарної печі. З отриманих результатів, видно що адаптивна система показала переваги над звичайною системою та експертною системою, що відображається у зменшенні витрати на керування (раціональне використання витрат пального по пальниках печі)

У навчальний процес кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» впроваджені математичні моделі процесу скловаріння, системи керування процесом виготовлення скломаси.

Ключові слова: скловарна піч, скломаса, математичне моделювання, система керування, адаптивне керування, нечітке керування.

ANOTACIA

Sitnikov O.V. **Modeling and automatic control of the thermal regime of the bath-type glass furnace.** Qualification scientific work manuscript copyright.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.07 – Automation of control processes. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023

The dissertation is devoted to the issue of improving the efficiency of the bath-type regenerative glass furnace by creating a control system that will ensure the energy-saving mode of operation of the process with unchanged production quality indicators. Glass melting is a process that requires a high temperature to heat the components from which the glass mass is made in the cooking part of the furnace. After preparation, all components are fed to the cooking basin, where the production (cooking) of glass mass takes place. The glassmaking process is quite energy-intensive. In developed countries, fuel consumption for glass production is 1.5-2 times lower than domestic indicators of similar production. Ukraine has limited reserves of natural gas, and almost all issues of fuel supply to industrial enterprises are solved through imports. Fuel prices are rising according to market trends, so gas must be used as economically as possible without compromising the quality of the products.

The process is characterized by internal disturbances, in particular, related to the concentration of the input product to the cooking zone of the furnace, which can lead to a shortage of finished products or unwanted excess fuel consumption. In order to ensure the specified indicators in the operation of the thermal mode control system of the glass furnace, it became necessary to build an energy-efficient control system that would ensure high control quality under conditions of uncontrolled internal disturbances and reduce control costs.

A mathematical model of the glass furnace was developed based on the structural and parametric scheme of the object. The mathematical description of the glass furnace as an object of research includes the equations of external heat exchange for glass mass, masonry and gas, a mathematical description of the heating process. External heat exchange means heat exchange between the object and its surroundings: heat exchange between the glass mass and its surrounding environment - masonry and gas space. For each of the components, a mathematical description has been developed that takes into account the interaction between the components in the control object model. Glass mass, masonry and gas space each have two contact surfaces between the components. The developed system of external heat exchange equations is obtained from the balance equations for the effective and resultant radiation of the surface and the environment in the form of the equations of the corresponding heat flows. The effective radiation of the surface of the glass mass and masonry is subject to Lambert's law - the absorption capabilities of the emitters are equal for all radiant fluxes and are equal to the corresponding degrees of blackness and, accordingly, consist of inherent and reflected radiation. The analysis of the research was carried out for the established mode of operation of the furnace - in the first, the approximate resulting radiation of the masonry is taken to be zero, the temperature of the glass mass and the masonry are taken to be equal to their average effective values.

Using the developed and researched system of equations for the heat flows of glass mass and masonry, a general mathematical model of the glass furnace was developed, which takes into account the connections between the constituent elements of the object. On the basis of the developed model, the obtained transfer function of the glass furnace is a complex structure that depends on the transfer functions of the glass mass, masonry and gas space along the channels of gas temperature - output temperature of glass mass and gas temperature - masonry temperature at characteristic points. This mathematical model can be used to analyze the temperature field of the glass furnace in different sections.

The researched mathematical model of the glass mass, which is an object with distributed parameters, is described in the work by the Fourier differential equation of

thermal conductivity with boundary conditions of the 3rd kind on the outer surface of the glass mass at the "glass-gas" contact and of the 2nd kind at the contact " glass mass-laying". Boundary conditions to the outside are caused by the lack of heat exchange with the environment, that is, the condition of ideal thermal insulation is considered. Studies have shown and based on the design features of the glass furnace, the glass mass can be conditionally considered a rectangular area, thickness h , which allows us to consider the glass mass as an unlimited plate of thickness h . However, in contrast to the typical type of unlimited plate, in the model of the process of heating the glass mass in the furnace bath, a number of its design features of the glass furnace are taken into account.

The simulation results showed that the heating of the inner side of the masonry occurs under the influence of large heat flows. The mathematical model of the masonry of the glass furnace is presented in the form of a one-dimensional problem of thermal conductivity, with boundary conditions of the 2nd kind at the "masonry-glass mass" contact. Masonry is a semi-bounded body with a thickness of δ . The transition from the temperature of the glass mass to the temperature of the masonry in different layers of the glass mass is presented, from which it can be seen that the temperature of the glass mass is higher the higher the layer is considered, and the temperature of the masonry decreases with depth, which confirms the accepted boundary conditions on the right surface of the masonry. The laying of the bottom of the furnace, as the one that is in contact with the last layer of glass mass, is considered separately; this feature is taken into account in the general model of the control object.

For use in the control system based on the glass furnace model, it is necessary to check the adequacy of the developed mathematical model. Studies have shown that the model of the dynamics of heating the glass mass in the furnace meets the relevant adequacy criteria and can be used for the synthesis of the control system.

Experimental studies of the temperature fields of glass mass, masonry, and gas space were carried out using simulation tools, for each of the zones of the furnace, the temperature distribution in a specific cross-section was constructed. The research made it

possible to reveal the reaction of the temperature field of glass mass and masonry to the effects of disturbances.

In the dissertation work, the task of developing a control system for the process of glass mass production was set, which should maintain stability in the operation of the control system and maintain the quality of the finished (output) product at a given level, by maintaining a given temperature regime within the limits set by the technological regulations and optimal fuel consumption. Therefore, the problem of adaptive control of the glass-making process, which consists in maintaining the given temperature distribution in the volume of the glass mass, is formulated and solved. To solve the problem of adaptive control, a control criterion was developed and applied $J_i(T^*_i(t), T_i(t), u_i)$, which depends on the vector u_i , which is considered as a control action (fuel consumption) on the furnace burners. The result of the calculation of the control criterion is the optimization of fuel consumption and leads to a change in the vector of control actions u_i . The synthesis of the control system is based on the developed mathematical model of the glass furnace, which simulates the behavior of the glass mass at certain points in the form of temperature changes. The result of the system synthesis is the improvement of the existing control system and the formation of new system parameters based on the tasks set in the work. Sequences of new input control actions u_i for furnace burners are decisive in the matter of fuel consumption optimization.

A study of the control system of gas supply to furnace burners and control of torch reversal in a pair of opposite burners using a common regulator was carried out, using the method of system analysis. This method makes it possible to more accurately solve the problem of maintaining the temperature regime of the furnace and maintaining the parameters at different stages (in different sections) of the process of boiling the glass mass. When forming the control algorithm, they relied on the developed control criterion. The development of the structure of the control system and the algorithm of adaptive software control took place using the UML programming language and UML diagrams, which made it possible to explore all possible connections in the system.

The work compares the results of the developed system with the existing cascade control system of the thermal regime for each cross-section of the furnace, the advantages of the developed system are revealed, the existing control system does not provide an opportunity to reduce the heating zone wandering, which leads to excess and non-rational use of fuel.

The developed control system implemented a number of functions to optimize fuel consumption, response to the action of disturbances acting on the control object. According to the temperature data in the zones of the glass furnace, in order to ensure the optimal use of gas, the adjustment parameters of the regulator are adapted depending on the temperature in the corresponding zone.

To solve the problem set in the work, the general structure and software of the expert system for controlling the thermal regime of the glass furnace was developed, using fuzzy logic rule bases and an adaptive fuzzy controller. The main task presented to the adaptive fuzzy controller is the formation of new parameters for setting the general PID controller.

In the dissertation, a study was conducted by comparing the results of the developed adaptive system, expert and general system for controlling the thermal regime of the glass furnace. From the obtained results, it can be seen that the adaptive system showed advantages over the conventional system and the expert system, which is reflected in the reduction of management costs (rational use of fuel costs for furnace burners)

In the educational process of the department of technical and software automation tools of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorskyi" implemented mathematical models of the glassmaking process, control systems for the glass mass production process.

Key words: glass furnace, glass mass, mathematical modeling, control system, adaptive control, fuzzy control.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях:

1. Лазебна Т.А. Математичне моделювання складних теплових об'єктів [Текст] / Т.А. Лазебна, **О.В. Ситніков**, І.С. Бобонич, О.П. Савченко // Комп'ютерна математика (Национальная академия наук Украины. Институт кибернетики им. Глушкова), №2, 2011.–С.30-35.

Особистий внесок здобувача: сформульовано питання та виведено математичну модель для скловарної печі, як складного теплового об'єкту прораховані граничні умови.

2. Жученко А.І. Отримання передатних функцій елементів скловарної печі [Текст] / А.І. Жученко, **О.В. Ситніков** // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №1(7), 2011 – С.128-129.

Особистий внесок здобувача: наведено алгоритм виведення елементів передатної функції скловарної печі, виведені передатні функції скломаси та кладки, як елементів скловарної печі.

3. Кубрак А.І. Виведення передатної функції ванни скловарної печі [Текст] / А.І. Кубрак, **О.В. Ситніков** // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №2(10), 2012 – С.131-136.

Особистий внесок здобувача: створена структурна модель ванни скловарної печі та за отриманою структурною моделлю виведено загальну передатну функцію.

4. Кубрак А.І. Побудова математичної моделі ванни скловарної печі [Текст] / А.І. Кубрак, **О.В. Ситніков** // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №1(11), 2013 – С.93-97.

Особистий внесок здобувача: виведена математична модель для скловарної печі, в якій окремо враховано теплопередачу між скломасою та кладкою дна, на відміну від попередніх досліджень, де враховувалась кладка бокових стінок печі.

5. Жученко А.І. Розробка системи керування регенеративною скловарною піччю [Текст] /А.І. Жученко, **О.В. Ситніков** // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. №4(Том 30(69)), 2019 – С.57-61 (видання, включене до міжнародної наукометричної баз даних: Index Copernicus International).

Особистий внесок здобувача: сформульовано необхідність створення системи керування тепловим режимом скловарної печі, методом системного аналізу, вперше створена автоматична система керування з використанням регулятора зовнішнього контуру.

6. **Sitnikov A.V.** Study of the adequacy of the mathematical model of the glass heating process [Текст] / **A.V. Sitnikov** // "Modern Technology and Innovative Technologies", №12(part 3), 2020 – С.35-38 (Німетчина)

Особистий внесок здобувача: Розглянуто питання дослідження адекватності розрахованої математичної моделі з використанням критеріїв Стьюдента та Фішера. Встановлено, що всі розраховані значення критеріїв менші за критичні значення відповідних критеріїв, гіпотеза про адекватність отриманої математичної моделі вважається прийнятою.

7. Жученко А.І. Математична модель зовнішнього теплообміну скловарної печі [Текст] /А.І. Жученко, **О.В. Ситніков**, Б.П. Губар// Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. №1(Том 33(72)), 2022 – С.87-90 (видання, включене до міжнародної наукометричної баз даних: Index Copernicus International).

Особистий внесок здобувача: виведено рівняння зовнішнього теплообміну для скломаси, кладки та газу, розроблена система рівнянь зовнішнього теплообміну, теплових потоків скломаси та кладки.

8. Жученко А.І. Дослідження температурних полів скловарної печі [Текст] / А.І. Жученко, **О.В. Ситніков** // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №2(21), 2022 – С.34-41.

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз температурних режимів роботи печі, температурних полів скломаси та кладки. Температурний розподіл в перерізах скловарної печі виконується засобами імітаційного моделювання

9. **Ситніков О.В.** Створення структурно-параметричної схеми об'єкту керування [Текст]/ О.В. Ситніков, Б.І. Гречук//«Вісник херсонського національного технічного університету», №2(81), 2023 – С.26-31.

Особистий внесок здобувача: створення структурно-параметричної схеми, скловарної печі, як об'єкту керування в скловарному виробництві.

Патенти на корисну модель:

10. Пат. Спосіб керування тепловим режимом ванної регенеративної скловарної печі / А.І. Жученко, **О.В. Ситніков** // Патент на корисну модель №141055 Патент опубліковано 25.03.2020, бюл. № 6/2020

Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб керування температурним режимом скловарної печі, в якому використовуються дані із датчика вимірювання температури на виході із регенератора, що враховуються в системі керування температурним режимом скловарної печі.

Тези доповідей у збірках матеріалів конференцій:

11. **Ситніков О.В.** Створення структурної моделі скловарної печі ванного типу [текст] / О.В. Ситніков, В.В. Миколаєнко // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки, Чернівці, 2012. – с.38-39.

Особистий внесок здобувача: розроблено структурну модель скловарної печі, за системою теплових потоків для ванни печі. Приведено обґрунтування необхідності розробки.

12. **Ситніков О.В.** Розрахунок дискретної моделі скловарної печі [текст] / О.В. Ситніков, О.Г. Пилипчук // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки, Чернівці, 2013 – с.45-47.

Особистий внесок здобувача: виведена дискретна модель для скловарної печі ванного типу, з ціллю подальшого комп'ютерного розрахунку значень ординат перехідної характеристики печі, як об'єкту автоматичного регулювання.

13. **Ситніков О.В.** Постановка задачі адаптивного керування скловарною піччю ванного типу [текст] / О.В. Ситніков// Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами, Київ, 2015 – с.82.

Особистий внесок здобувача: запропонована задача розробки блоку адаптації на базі зовнішнього контуру системи керування тепловим режимом нагріву скломаси.

14. **Ситніков О.В.** Адаптивне нечітке керування скловарною піччю ванного типу [текст] / О.В. Ситніков // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами, Київ, 2016 – с.85.

Особистий внесок здобувача: наведено необхідність використання нечіткої логіки в системі керування тепловим режимом скловарної печі.

15. **Ситников А.В.** Система адаптивного управления стекловаренной печи ванного типа [текст] / А.В. Ситников // Science, Research, Development Technic and technology – Роттердам, Голандія, 2018 – с.43-45 (видання іншої держави).

Особистий внесок здобувача: розроблено система керування скловарною піччю з використанням алгоритму нечіткої логіки для регулятора загального контуру.

16. Жученко А.І. Адаптивна система керування скловарною піччю з використанням нечіткої логіки [Текст] /А.І. Жученко, **О.В. Ситніков** //

Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях. Збірник наукових статей дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 2021 – с.133-138

Особистий внесок здобувача: розглянута робота системи керування температурних режимів усіх зон регенеративної скловарної печі ванного типу з адаптацією параметрів її налаштування, представлено результати порівняльного аналізу діючих систем керування та розробленої.

Статті у інших виданнях:

17. Жученко А.І. Система керування тепловим режимом скловарної печі ванного типу [Текст] /А.І. Жученко, **О.В. Синтіков** // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №1(17), 2018 – С.123-127.

Особистий внесок здобувача: досліджено алгоритм побудови системи керування скловарною піччю на основі моделі об'єкту керування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ППРОЦЕСУ СКЛОВАРІННЯ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	27
1.1. Типи скловарних печей.....	27
1.1.1. Класифікація печей ванного типу за способом подання полум’я.....	30
1.1.2. Типи пальників, що використовуються в скловарних печах.....	32
1.2. Аналіз існуючих математичних моделей процесу скловаріння.....	34
1.2.1. Моделювання газового простору скловарної печі	36
1.2.2. Моделювання динаміки плавлення шихти.....	38
1.3. Параметрична схема скловарної печі ванного типу.....	42
1.4. Аналіз існуючих систем контролю та керування виробництвом скломаси.....	49
1.5. Постановка завдання дослідження.....	52
1.6. Висновки до розділу 1.....	53
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ.....	54
2.1. Скловарна піч як об’єкт математичного моделювання.....	54
2.2. Математична модель зовнішнього теплообміну.....	56
2.3. Структурне моделювання об’єкту керування.....	65
2.4. Математичний опис скломаси	71
2.4.1. Математична модель процесу нагрівання скломаси.....	71
2.4.2. Передатна функція за каналом «тепловий потік скломаси – вихідна температура скломаси».....	80

2.5. Математичний опис кладки та розрахунок передатної функції за каналом «тепловий потік кладки – температура кладки в характерних точках».....	87
2.6. Математична модель теплопередачі між скломасою та кладкою дна печі.....	92
2.7. Висновки до розділу 2.....	103
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ.....	104
3.1. Дослідження адекватності математичної моделі процесу нагрівання скломаси.....	104
3.2. Розрахунок апроксимуючої передатної функції ванни печі за каналом « витрата газу – вихідна температура скломаси».....	113
3.3. Дослідження температурних полів скловарної печі	120
3.3.1. Температурний розподіл в зонах газового простору.....	121
3.3.2. Температурний розподіл в поперечному та повздовжньому перерізі скловарної печі.....	124
3.3.3. Температурний розподіл температури полум'я пальника печі.....	132
3.3.4. Температурне поле поверхневого шару скломаси.....	133
3.4. Дослідження впливу збурень на об'єкт	134
3.5. Висновки до розділу 3.....	138
РОЗДІЛ 4. КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ.....	139
4.1. Вибір і дослідження критерія оптимальності.....	141
4.2. Система програмного керування процесом варіння скломаси.....	148
4.2.1 Дослідження каскадної системи керування скловарною піччю.....	148
4.2.2. Розроблення блоку керування АСР тепловим режимом скловарної печі.....	152

4.3. Постановка задачі адаптивного керування.....	162
4.4. Блок адаптації на базі зовнішнього контуру АСК.....	164
4.5. Експериментальне дослідження системи керування тепловим режимом скловарної печі	172
4.5.1 Система керування скловарною піччю з використанням нечіткого керування.....	172
4.5.2. Порівняльний аналіз та дослідження розроблених систем керування тепловим режимом скловарної печі.....	177
4.6. Висновки до розділу 4.....	186
ВИСНОВКИ.....	187
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	189

ВСТУП

Актуальність теми. Скловаріння – процес відомий, виходячи з історичних хронік, з часів стародавнього Єгипту. В наші часи складува замінив оператор варильної частини, а замість трубок використовуються промислові печі. Але, як і в давнину, для виготовлення скляних виробів необхідно високою температурою розігріти компоненти для виготовлення скломаси.

До продукції скловарного виробництва відносять: тарне скло, листове скло, медичне скло, спеціалізоване скло. Листове скло представляє найважливіший вид продукції, що виробляється в скловарній промисловості. Найбільшу частину виробленої продукції використовує автомобілебудування, залізничний транспорт, будівництво.

У процесі час виготовлення скла відбуваються наступні етапи: підготовка шихти та склобою, загрузка підготовленої суміші у варильний басейн, виготовлення скломаси (варка), студка. У свою чергу процес варіння можна поділити на: сілікатоутворення, склоутворення, освітлення, гомогенізація.

Процес виготовлення скла являє собою дуже енергоємну галузь народного господарства[1,2]. Виходячи з такого положення, правильний підхід до створення системи керування тепловим режимом стає першочерговою задачею при експлуатації скловарних печей. Основною задачею виробництва в цілому є зниження витрат природного газу при збереженні потрібних показників якості продукту. В розвинених країнах витрати палива на варку скла в 1,5-2 рази нижче, ніж вітчизняні показники аналогічного виробництва [3]. Цей фактор пояснюється значною відмінністю у питомому виробничому показнику роботи, згідно з [3] цей показник приблизно в 2 рази нижчий, ніж на вітчизняному виробництві. Основною задачею вітчизняної скловарної промисловості є досягнення світового рівня економічної ефективності у виробництві скла.

Україна має обмежені запаси природного газу і практично всі питання постачання пального на промислові підприємства вирішується за рахунок імпортування [3]. Ціни на пальне (природний газ) зростають згідно тенденціям ринку та прогнозам експертів відповідної галузі, тому використання газу необхідно вести з максимальною економією, при цьому не погіршуючи якість виробленої продукції.

Скловарна промисловість та існуючі проблеми на виробництві вивчалися різними вченими, серед яких Гинзбург Д.Б. [4], А.Аbbassi [5], Дзюзер В.Я. [6], Захариков Н.А. [7]. У цих роботах розглянуті питання механізму тепло- та масопереносу, модифікації процесу, також в їх працях запропоновані варіанти моделі процесу виготовлення скломаси (скловаріння) та скловарної печі в цілому, знайдені шляхи створення систем керування, запропоновано оптимальні та адаптивні системи керування. Важливим етапом в розробленні, ефективному дослідженні оптимальної та адаптивної системи керування є створення адекватної моделі об'єкту.

Процес скловаріння достатньо складний для експериментальних досліджень, при перевірці адекватності моделі доводиться порівнювати покази датчиків термопар зі значеннями температури, що розраховані за розробленою моделлю. Перевірка можлива виключно у точках встановлення термопар, тобто необхідна адекватна математична модель, яка буде максимально точно відображати дані температур в точках скломаси де установка датчиків не можлива технічно.

Питання енергоефективності роботи скловарної печі, недостатній рівень розробки питань створення математичних моделей, алгоритмів керування процесом скловаріння та недостатньо ефективні системи в цілому є актуальними задачами, розв'язку яких присвячена робота. Програмні засоби та сучасний розвиток комп'ютерно-інтегрованих систем керування дозволяє вирішити поставлені задачі дослідження на високому технічному рівні [8,9].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана в межах тематики, яка відповідає напрямку наукових досліджень кафедри технічних і програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» у рамках науково-дослідних робіт «Створення комп'ютерно-інтегрованих систем автоматичного контролю та керування, що забезпечують ресурсо- та енергозберігаючі режими функціонування технологічних процесів та виробництв» (номер держреєстрації № 0110U006890)

Мета і задачі дослідження

Метою досліджень є підвищення ефективності процесу виготовлення скломаси шляхом створення системи керування, що забезпечить режим енергозбереження процесу (за допомогою зменшення витрати пального) при збереженні потрібної якості вихідного продукту. Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання наступних задач:

- системний аналіз скловарної печі як об'єкту автоматизації;
- створення та аналіз структурно-параметричної схеми об'єкту керування;
- розроблення математичної моделі зовнішнього теплообміну;
- розроблення та експериментальне дослідження математичної моделі скловарної печі з урахуванням теплообміну з кладкою ванни печі та дослідження моделі динаміки плавлення скломаси;
- створення системи керування заданого температурного режиму печі на основі регулятора зовнішнього контуру;
- експериментальне дослідження системи керування тепловим режимом скловарної печі;

– створення альтернативних системи керування тепловим режимом скловарної печі на основі адаптивного регулятора та з використанням алгоритму нечіткого керування;

– проведення порівняльного аналізу ефективності роботи розроблених систем.

Об'єктом дослідження – технологічний процес виготовлення скломаси.

Предмет дослідження – математична модель скловарної печі та система керування процесом виготовлення скломаси.

Методи дослідження.

Для розв'язання задачі побудови моделі об'єкту керування у роботі використовувались методи математичного моделювання, чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь в частинних похідних, методи ідентифікації параметрів, методи імітаційного моделювання для дослідження ефективності розробленої моделі. При створенні системи керування скловарною піччю використовувалися методи оптимізації, побудови систем з адаптивним керуванням та нечіткої логіки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- модифікована система рівнянь зовнішнього теплообміну за рахунок врахування рівнянь балансу ефективного та результуючого випромінення поверхонь та середовищ (зональний метод розрахунку, метод сальдо-потоків), що дає можливість врахувати всі розподіли температури в печі;

- набула подальшого розвитку математична модель динаміки процесу нагрівання скломаси, яка враховує розподіл температури у повздовжньому і поперечному напрямках нагрівання, та дало можливість визначити в якому напрямку швидкість на порядок вища ;

- вдосконалено спрощену математичну модель варильної зони скловарної печі при контакті «скломаса-стінка» та «скломаса-дно» та доведено доцільність її використання у системах керування;

- вперше запропонована система автоматичного керування процесом скловаріння на основі регулятора зовнішнього контуру, що виконує задачу керування всіма регуляторами по зонах печі;

- набула подальшого розвитку система керування режимом скловарної печі на основі адаптивного регулятора, дало можливість максимально уникнути дію збурення;

- модифікована систему керування тепловим режимом скловарної печі з використанням алгоритму нечіткої логіки.

Практичне значення одержаних результатів :

– розроблена та модифікована структурна модель об'єкту керування дає можливість застосувати її при дослідженні теплових об'єктів керування з розподіленими параметрами;

– створена система керування забезпечує підвищення якості автоматичного контролю і ефективності керування процесом виготовлення скломаси;

– запропонована методика синтезу системи керування скловарною піччю може бути застосована при синтезі систем керування ванними печами для інших технологічних процесів;

– матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі та в межах ініціативної тематики кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Особистий внесок здобувача

Автор самостійно сформулював завдання дослідження, наукові положення і результати, виконав теоретичну та практичну частину роботи. Зміст дисертації викладений автором самостійно. У роботах, що опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: у [10] – дослідження структурно-параметричної схеми

скловарної печі; у [11] – розробка математичної моделі ванни скловарної печі; у [12,13] – розрахунок передатних функцій елементів скловарної печі з врахуванням всіх напрямків теплових потоків; у [14] – спрощення структурної схеми скловарної печі як об'єкту керування; у [15] – наведено перевірка адекватності отриманої математичної моделі скловарної печі; у [16, 17] – розроблення та дослідження роботи системи керування скловарною піччю; у [18] – розроблення математичної моделі зовнішнього теплообміну складових елементів скловарної печі; у [18] – наведено дослідження температурних полів скловарної печі.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідались на всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» (2012р., 2013р. м.Чернівці) [20, 21]; міжнародній науково-технічній *internet*-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (2015р., 2016р. м.Київ) [22, 23]; *Monografia pokonferencyjna «Science, research, development. Technics and technology #3»* (2018р., Rotterdam) [24]; Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях. Збірник наукових статей дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції (2021р., м.Київ) [25];

Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 17 друкованих праць, з них 9 статей у наукових фахових виданнях України, з них 1 стаття у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до ОЕСР, 1 патент України на корисну модель, 6 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій, 1 статті у інших виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг дисертації 200 сторінка, містить 108 рисунків, 7 таблиці.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ППРОЦЕСУ СКЛОВАРІННЯ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1. Типи скловарних печей

Завжди актуальним питанням є економія паливно-енергетичних ресурсів при підтриманні значення вихідних параметрів процесу такими, що відповідають вимогам технологічного регламенту. Дослідження процесу керування виготовлення скломаси на реальних апаратах практично неможливо (ставити досліди на скловарних печах, зупиняючи або призупиняючи виробничий процес), тому виникає задача створення математичної моделі печі, що буде враховувати всі технологічні особливості процесу скловаріння (виготовлення скломаси – плавлення шихти).

Стадія скловаріння представляє собою найбільш відповідальну ланку в технологічній лінії виробництва скла внаслідок того, що від якості виробленої скломаси залежить якість отриманого кінцевого продукту. Процес плавлення шихти можна розділити на п'ять основних стадій: силікатоутворення, склоутворення, дегазації, гомогенезації, охолодження.

Розглянемо типи печей, які існують на виробництві.

Скловарні печі бувають наступних типів : горшкові (оптичне скло), ванні (листоє, тарне скло). Назва печі відповідає конструкції робочої камери. Також розрізняють печі по способу обігріву – полум'яні, електричні, газоелектричні; по способу відводу газів – регенеративні, рекуперативні та по способу подання полум'я – поперечні та підковоподібні.

Деякі структури (типи) приведені на рис. 1.1, 1.2, 1.3.

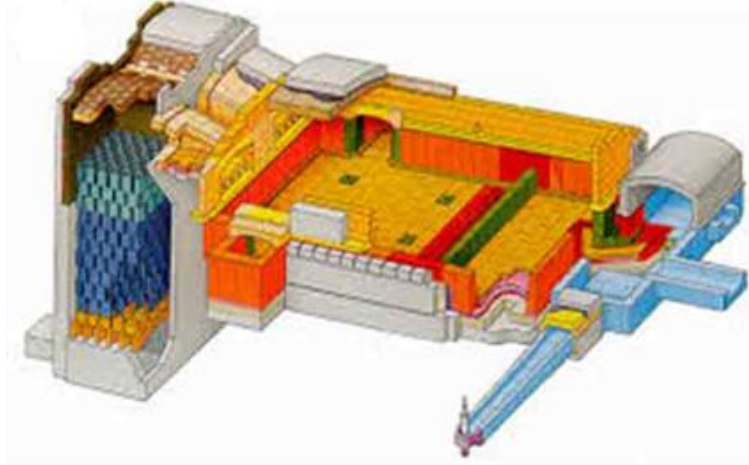
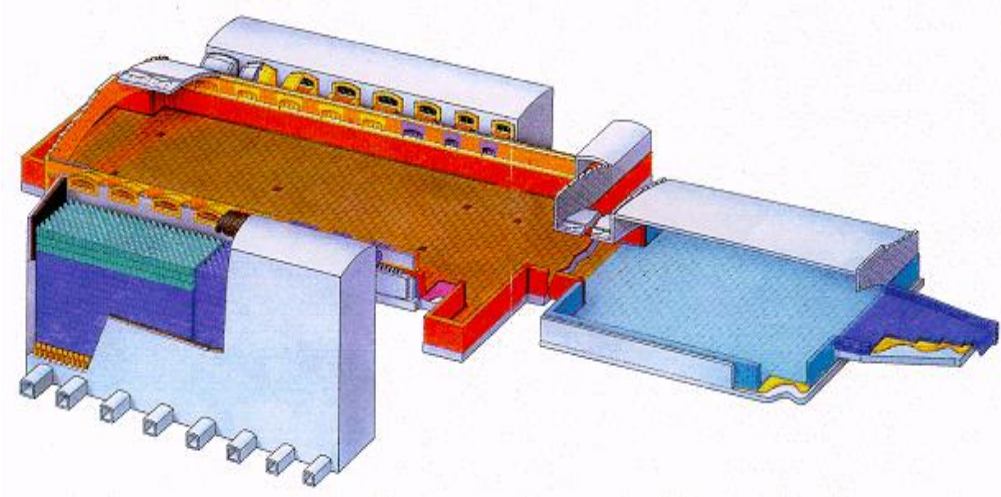


Рисунок 1.1 Ванна регенеративна скловарна піч

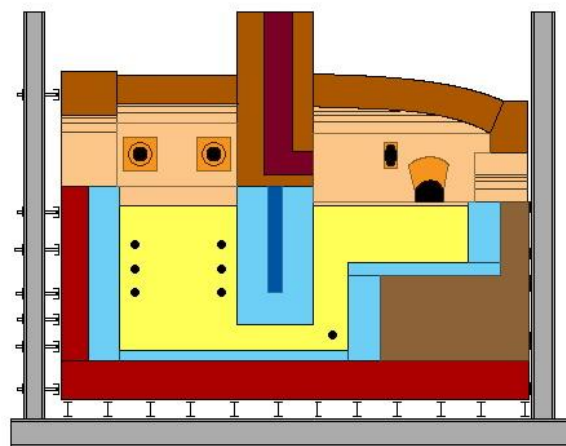


Рисунок 1.2 Електрична скловарна піч



Рисунок 1.3 Скловарна піч горшкового типу

Регенератор – камера, всередині якої знаходиться насадка, що вироблена з вогнестійкої цегли з системою отворів. При проходженні через насадку відроблених димових газів зверху до низу цеглини нагріваються, а потім віддають тепло повітрю, що проходить знизу до верху. Таким чином, повітря нагрівається до температури $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Система керування переключає газові потоки в парах горілок таким чином, щоб одна працювала на горіння пального, а інша – на нагрівання насадки. Через фіксований проміжок часу відбувається переключення газових потоків, тоді друга горілка спалює пальне, а насадка регенератора нагрівається газами, що відводяться.

Рекуператор – теплообмінник, в якому газ, що відводиться неперервно підігрівають повітря в систему подачі повітря на горіння до температури $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Конструкційне рекуператори більш масивні, займають більше місця, але з їх допомогою зручніше регулювати температуру в великих та середніх печах. Рекуперативні печі вигідно використовувати при малих об’ємах виробництва.

Електричні печі – найбільш продуктивні та екологічно безпечні. Існує два типи печей прямого нагрівання: вертикальні та горизонтальні (розрізняються по напрямку руху скломаси від завантаження до виробітки). Найбільш розповсюджені в промисловості печі вертикального типу (рис. 1.2). Завантаження шихти відбувається на дзеркало навареної скломаси, тобто пуск відбувається за допомогою газових пальників, що розміщені на рівні карману для завантаження.

Призначення даних пальників – розплавити деяку кількість шихти та забезпечити необхідний об’єм розплаву для занурення електродів [28].

Нагрівання скломаси буде відбуватися завдяки занурення в неї електродів, що розміщені попарно з двох сторін в середній частині зони для варіння в печі. Відповідно температурний максимум поблизу електродів – 1500 °С, а температура в зоні завантаження значно нижча. Для більш рівномірного провару шихти, що передається на поверхню дзеркала, використовують розрівнювальний пристрій. Електричні печі використовують для варіння спеціального скла внаслідок того, що електроенергія дорожча за природний газ.

У даній роботі розглядається регенеративна скловарна піч ванного типу.

1.1.1. Класифікація печей ванного типу за способом подання полум’я

Як зазначалось в попередньому підрозділі, за способом подання полум’я печі бувають: поперечні та підковоподібні.

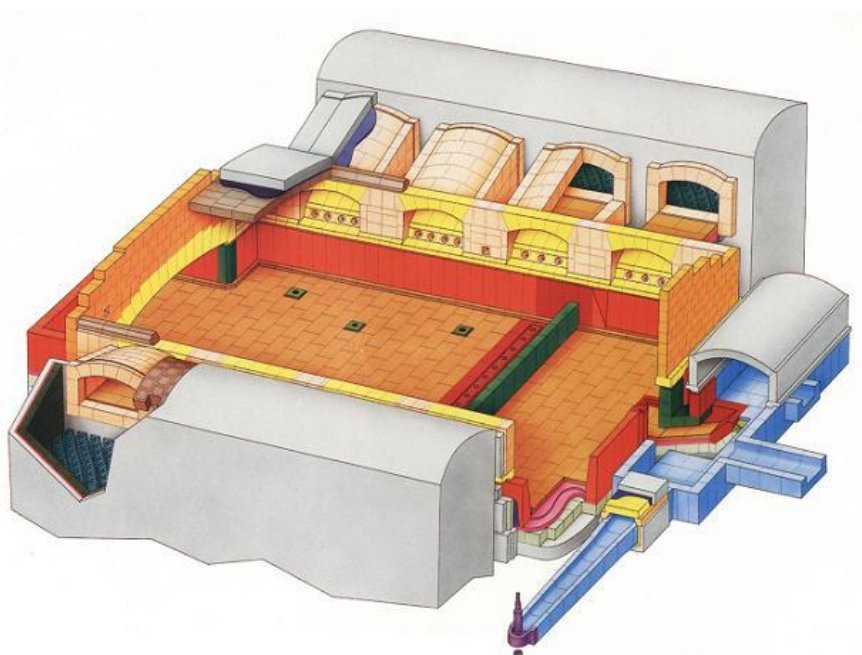
Регенеративна піч ванного типу з поперечним напрямом полум’я складається з власне ванни печі, декількох пар пальників, що розміщені по обидва боки печі, системи завантаження сировини, каналу вироблення (рис.1.4, а). Факел полум’я горілок має конусоподібну форму, розміщений над розплавом та перекриває простір між двома сусідніми парами. Відвід відроблених димових газів з регенераторів відбувається по системі димоходів, що розміщені під ванною печі та з’єднані з загальною димовою трубою.

Перевага даного типу печі в тому, що для кожної пари пальників можна задати своє співвідношення газ/повітря, підтримувати необхідну температуру на кожній ділянці печі та відповідно регулювати швидкість і напрям конвективних потоків у скломасі, що є дуже важливим для великих печей [29].

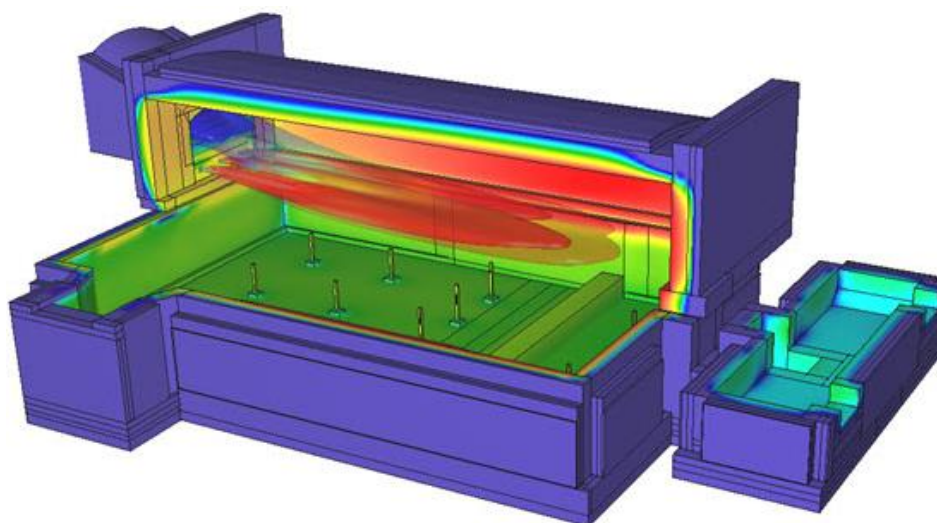
Переважає більшість печей з поперечним напрямом полум’я має шість або вісім пар пальників. Це дозволяє найбільш якісно підтримувати необхідний тепловий режим варіння скла [29].

Регенеративна піч ванного типу з підковоподібним напрямом полум'я містить дві пари пальників з регенераторами, що розміщені в одному кінці печі. Факел полум'я кожного пальника має U-подібну форму (підковоподібну) форму. Таким чином, кожний пальник, що працює, обігриває весь полум'яний простір печі. Скломаса, що отримана в печах такого типу, має меншу степінь гомогенізації [29]. Скловарна піч з підковоподібним напрямом полум'я приведена на рис.1.4, б.

Даний тип печі доцільно використовувати для печей середніх розмірів, як приклад – печі для виготовлення тарного скла внаслідок того, що тара не нормується на світлопроникність.



a



б

Рисунок 1.4 Регенеративна скловарна піч

a – з поперечним напрямом полум'я, *б* – з підковоподібним напрямом полум'я

Для підвищення якості скломаси рекомендовано використовувати додаткове електропідігрівання [28, 29]. Локальне підведення додаткового тепла до розплавленої скломаси відбувається за рахунок встановлення електродів в бокових стінках (горизонтальні електроди) або в дні (вертикальні електроди) для зон з максимальною температурою.

Додаткове електропідігрівання може бути застосоване в різний час роботи печі, а також використане для печей з поперечним напрямом полум'я для виготовлення кольорового скла (внаслідок заниженої теплопрозорості).

1.1.2. Типи пальників, що використовуються в скловарних печах

В регенеративних печах ванного типу з підковоподібним напрямом полум'я пальники призначені для змішування пального та повітря. Для організації вогняного факелу та відведення продуктів горіння (димових газів) використовуються пальники наступного типу (за способом подання газу): бічний односторонній (а), бічний двосторонній (б), нижній (в), зі сторони пальника (г), через дно пальника (д). Схематично спосіб подання газу до пальника показаний на рис. 1.5, а також положення регенератора, факел полум'я та конструкційне положення пальника відносно ванни печі.

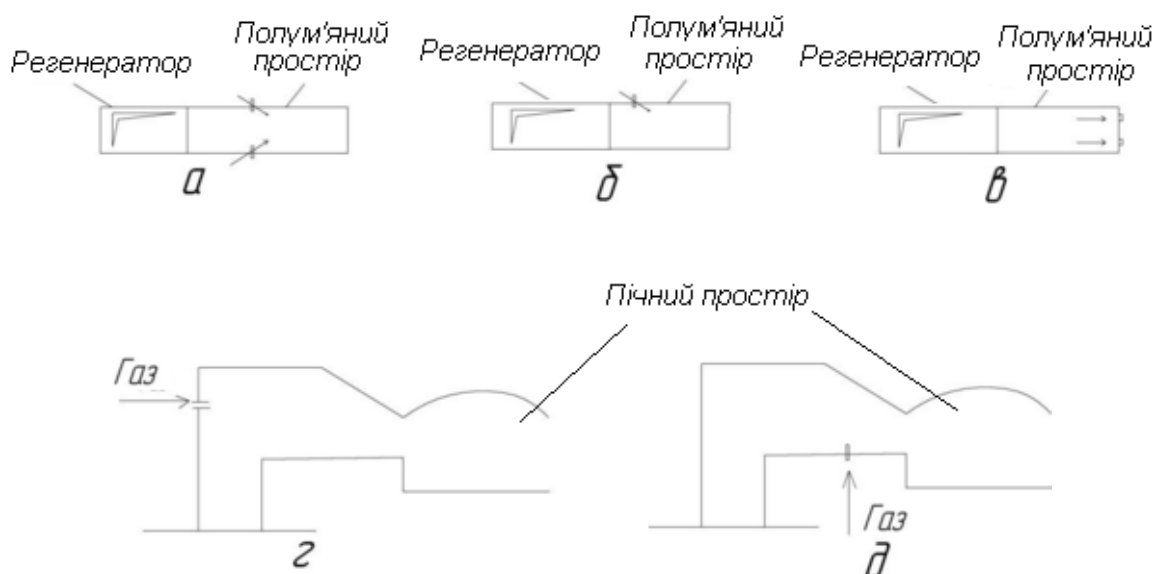


Рисунок 1.5 Пальники за способом подання газу

Кут нахилу газового потоку до скломаси («кут атаки») - $17,5 - 22,5^\circ$. Якщо кут буде більше вказаного діапазону, то факел буде відбиватися від дзеркала скломаси, якщо менше – то факел буде відриватися від поверхні скломаси внаслідок різних густин газового простору та факелу [30].

Вильоти факелу з полум'яного простору печі приведені на рис.1.6, на фотографії приведено всі складові ванни печі в процесі виготовлення скломаси : факел, газовий простір, скломаса, стіни та склепіння печі.

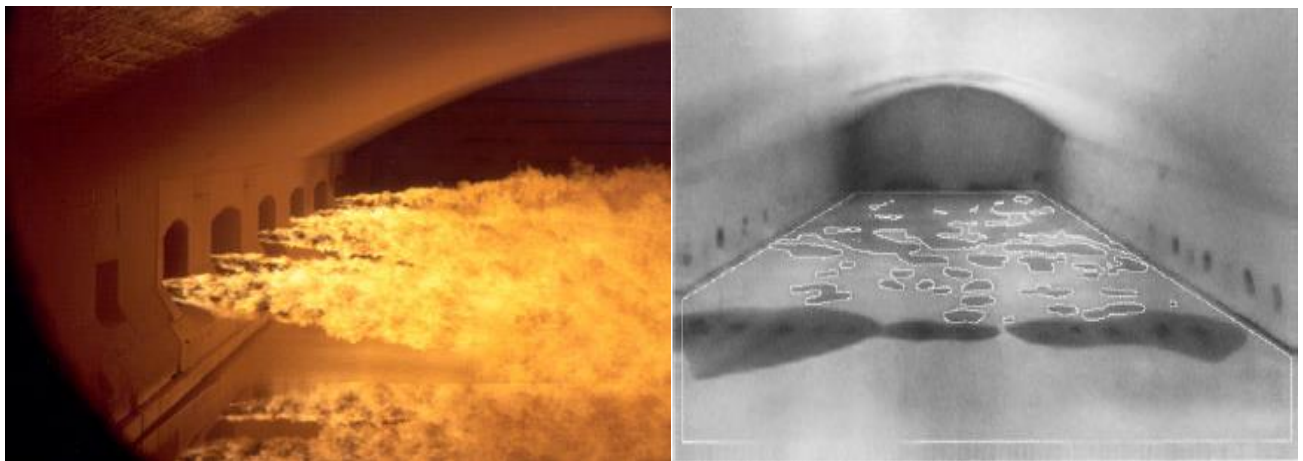


Рисунок 1.6 Факел пальника скловарної печі та положення пальників над розплавом скломаси

Конструкція пальників повинна забезпечувати виконання ряду вимог [29, 30]:

- факел, що утворюється, повинен світитися та бути високотемпературним;
- повинен мати оптимальну довжину;
- переплавлення шихти повинно закінчитися раніше, ніж буде вичерпана норма виділеного об'єму продукту горіння полум'яного простору печі;
- факел повинен повністю покривати поверхню шихти (скломаси);
- процес горіння не повинен призводити до гомогенізації або зафарбовувати скломасу.

Таким чином, виходячи із вище зазначених положень, в регенеративних ванних печах з поперечним напрямом полум'я використовуються горілки типу ГС: цегляні, шахтні, з бічним двостороннім підводам пального, кут нахилу до 20° .

Факел полум'я, що отриманий при такій подачі газу, має необхідну довжину для забезпечення заданої тепловіддачі дзеркалу скломаси. Схема пальника зображена на рис.1.7 [29, 30].

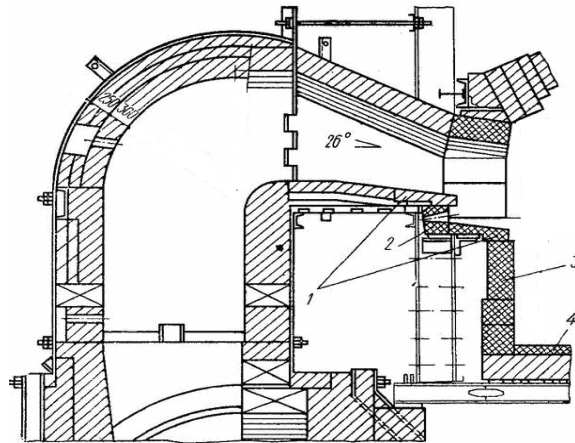


Рисунок 1.7 Схема пальника для регенеративної скловарної печі з поперечним напрямом полум'я. 1- зуб вильоту, 2- муфель для підводу газу, 3- окружка печі, 4- плитка.

1.2. Аналіз математичного опису процесу скловаріння

Скловарна піч, що розглядається в роботі, відноситься до ванних регенеративних печей з поперечним поданням полум'я. До складу об'єкту керування входять 6 пар пальників, що розміщені по обох боках печі [4, 6]. Факел полум'я пальника має конусоподібну форму, розміщується над розплавом скломаси та перекриває весь простір між двома сусідніми парами. Умовно скловарна піч поділена на 6 перерізів (зон), що відповідають кожній парі пальників, в даних перерізах (зонах) встановлені термопари, тому порівняння результатів математичного моделювання з даними виробництва в цих точках має найменшу похибку розрахунків (має найменше відхилення) [4, 5, 7, 27].

Відведення відпрацьованих димових газів відбувається по системі димоходів, що знаходяться під варильною зоною печі.

Регенератор – камера, всередині якої знаходиться насадка та відпрацьовані гази нагрівають повітря, що іде на процес горіння, таким чином відбувається економія газу на нагрівання[4, 30]. На рис. 1.8 представлена структура печі.

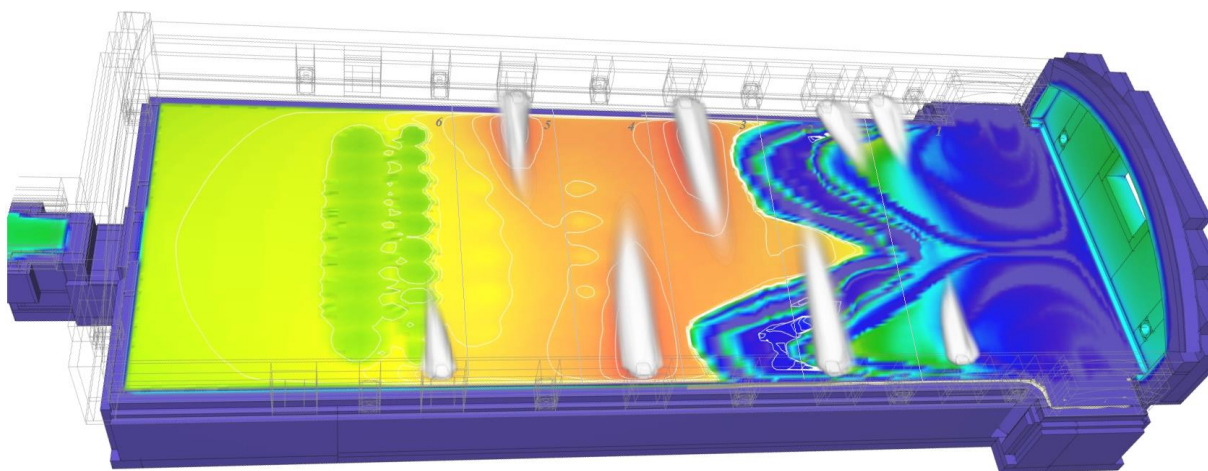


Рисунок 1.8 Регенеративна скловарна піч з поперечним поданням полум'я

В процесі виробництві скла визначальну роль відіграють теплові процеси [27,31]. Скловарна піч відноситься до складних теплових об'єктів, являє собою основний агрегат у технологічному процесі при виробництві скла.

Підходи до моделювання різні у різних наукових розробках [33-36], це пояснюється тим, що розглядаються різні визначальні фактори, які впливають на якість скла – вихідна температура скломаси, показник гомогенізації, температура газового простору, швидкість руху скломаси.

Виходячи з труднощів формалізації рішень, в роботі [37] було запропоновано враховувати розподіл параметрів та гідродинамічні характеристики комірною математичною моделлю. Даний підхід дозволив використовувати принципи системного аналізу – розбиття вихідної задачі на складові з подальшим об'єднанням рішень. Під комірною розуміється рівна ділянка скломаси по довжині апарату, гідродинаміка твердої та рідкої фази моделюється типовою математичною моделлю змішування. При складанні математичної моделі використовувалась дискретна апроксимація по температурному режиму. Фазовий склад шихти змінюється в процесі плавлення, змінюється гідродинаміка потоків в печі [38]. Враховуючи такі положення, окрім розподілених параметрів, модель змінюється по структурі, що значно ускладнює процес розв'язку, стає необхідним створення математичної

моделі яка врахує динаміку розігрівання скломаси. Отримана модель може бути розв'язана чисельно або аналітично. Отримані результати дозволили розв'язати задачу та отримати значення температури скломаси в залежності від часу $T_{ск}(t)$ – температурно-часовий режим процесу.

В роботі [39] розглянуті типи математичних моделей та виявлено математичні моделі якого типу підходять при створенні математичної моделі скловарної печі. Також приведені економічні складові в розрахунку критерію оптимальності та принцип включення до загальної структури моделі собівартість продукції.

Фактично моделювання скловарної печі можна поділити на процеси, що відбуваються в газовому (полум'яному) просторі та модель ванни печі з урахуванням теплообміну між кладкою та скломасою.

1.2.1 Моделювання газового простору скловарної печі

До газового простору скловарної печі відноситься простір між дзеркалом скломаси та кладкою склепіння по вертикальній координаті та між пальниками лівої та правої стінки по горизонтальній. Сюди також можна віднести потужність теплового потоку в зоні 1 рис. 1.8. Питання потужності теплового потоку пального розглянуто в роботі [40], наводяться температурні дані у визначені моменти часу та визначено поведінку температури в залежності від часу.

Фізико-хімічні властивості матеріалу печей з поперечним поданням полум'я подібні в різних технологічних процесах, відрізняється температурою факела пальника, конструкційною особливістю верхньої частини печі (куполу, склепіння) та температурою газового простору. Дані положення визначені в роботах [4, 30, 41].

Основною задачею при виробництві скла є підтримання на заданому рівні температури газового простору над дзеркалом скломаси [4, 5, 41], що, у свою чергу, буде сприяти плавленню шихти та отриманню скломаси згідно технологічного регламенту. Слід зазначити, що до основної задачі також відноситься оптимальна

подача пального до пальників печі, що відповідає питанню економії паливно-енергетичних ресурсів. По даному напрямку з різними підходами питання розглядались в роботах [6, 42-45].

Питання підтримки оптимального теплового режиму в газовому просторі печі розглянуто в роботі [46], де введено поняття критерію теплової ефективності роботи печі, а також приведені залежності виробничих потужностей від витрати газу: $Q_p = Q_n B + \eta N + Q_\phi - Q_d$, де Q_n – нижня температура згорання палива, B – витрата пального, η – ККД додаткового підігріву, N – потужність додаткового електропідігріву, Q_ϕ – фізична теплота, що вноситься тепло-повітряною сумішшю, Q_d – теплота дисоціації продуктів згорання.

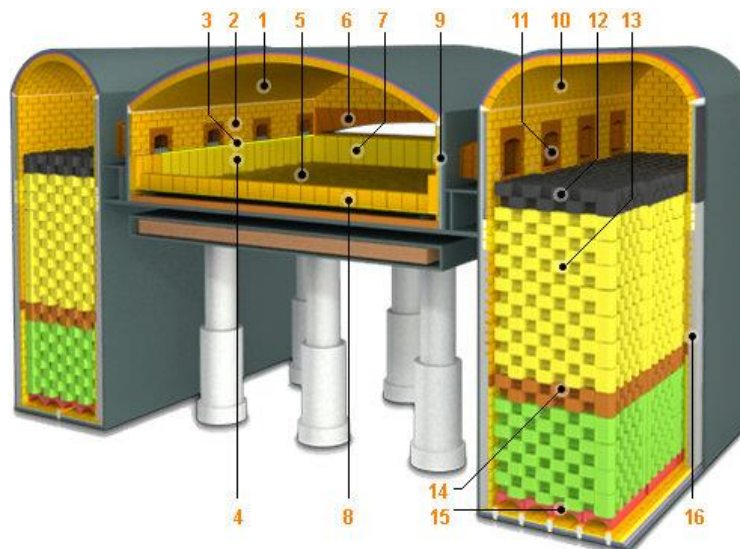


Рисунок 1.9 Тривимірна модель регенеративної скловарної печі, 1 – склепіння печі, 2 – зона басейну, 3 – відмітка рівню скломаси, 4 – зона басейну печі, 5 – дно, 6 – вікно завантаження шихти, 7 – задня стінка басейну, 8 – поріг ванни печі, 9 – теплоізоляція печі, 10 – склепіння та стінки регенераторів, 11 – пальники, 12 – верхній ряд регенераторів, 13 – зона регенератора, 14 – зона насадки регенератора, 15 – опора регенератора, 16 - стінка регенератора.

В скловарному виробництві використовуються пальники з регенераторами (звідси назва – регенеративні печі), які призначені для нагрівання пального, що підводиться до пальників. Це дає змогу в значній мірі зекономити подачу пального на первинне нагрівання газу. Питання роботи та оптимізації роботи регенератора розглядалась авторами у роботах [30, 32, 47].

В роботі [48] розглянуто питання аналізу процесів, з урахуванням того, що повітря подається через регенератор скловарної печі при різних конструктивних параметрах апарату та як вони впливають на енергоефективність роботи пальника та температуру газового простору (підтримки температури газового простору печі).

1.2.2 Моделювання динаміки плавлення шихти

Динаміка плавлення шихти включає в себе дослідження всіх процесів, що відбуваються у варильному басейні (ванні печі) під час розплаву компонентів шихти, склобою до стану в'язкої речовини – скломаси та підтримання температури на заданому рівні. В роботі [31] розглянуто скломасу як об'єкт дослідження, процес плавлення шихти описаний математично диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є. Виведена залежність температури шихти по шарах в залежності від координати та часу. Приведена модель дозволила розрахувати криві розподілу температури в шарах шихти, що розплавляється. Визначено оптимальний рівень завантаження шихти.

В роботі [49] основна увага приділена впливу швидкості руху скломаси на її температуру, розглянуто основні параметри, що впливають на швидкість. Були приведені граничні умови перебігу процесу. Дані термопар (температури у відповідних точках виміру) заносилися до масивів даних, що значно спростило програмну реалізацію досліджень. Програмний блок складався з декількох модулів: розрахунку температурного поля, обчислення в'язкості, обчислення швидкості по глибині скломаси, модуль додаткового електропідігріву. З розроблених програмних блоків розраховується математична модель, що враховувала всі вище розглянуті параметри.

В роботі [50] розглянуто питання усереднення складу скломаси, модель представлена у вигляді крайової задачі, що формується з диференціального рівняння в частинних похідних по довжині та глибині скломаси та граничними умов. Було

отримано рівняння динаміки масообміну з врахуванням зон з повільним масообміном.

Подальше дослідження впливу конвективного масопереносу на швидкість процесу скломасоутворення з виведенням залежностей, що дозволяють уточнювати конструкційні розрахунки скловарних апаратів, були розглянуті авторами в роботі [51]. Проведений аналіз температурних показників та виведені і побудовані часові криві повного розплаву частинок, що у свою чергу впливають на якість скломаси – відсутність у чистому склі нерозплавлених частинок.

Питання масопереносу розглянуто в роботі [52], приводяться загальні особливості моделювання теплових та матеріальних балансів для скловарних печей та вплив результатів моделювання на конструкційні параметри.

Дослідження питання наявності збурення по каналах вимірювання та оцінка значень температурного поля в умовах інтенсивних заводів приведено в роботі [53]. Виконано дослідження використання методу квазілінеаризації для однойменної оцінки параметрів і стану системи. Зміна температури в точці контролю представлена як вихід лінійної динамічної системи. Лінійне представлення вимірювань було обумовлено малим відхиленням робочих значень температури та теплофізичних параметрів скловарної печі. Був запропонований алгоритм одночасної оцінки параметрів та стану системи, що можливий для обробки температури в умовах інтенсивних заводів.

В роботі [54] розглянуто на прикладі печі для плавлення металу принцип створення математичної моделі печі. Розглянуто теплообмін між твердою шихтою, стінкою, склепінням, газом та розплавом. Врахований коефіцієнт потужності подачі енергоресурсів. Визначено, що розподілення температури в об'ємі шихти оцінювалось в циліндричних координатах. Також в даній роботі розглянуто методи перевірки адекватності моделі.

В розглянутих роботах визначається об'єкт дослідження, представлення процесу нагрівання у вигляді диференційного рівняння (системи рівнянь), розглянуто основні положення матеріальних та теплових балансів скловарної печі.

Практично всі розглянуті роботи пройшли практичне випробування, однак не зазначено, що отримані моделі були використані при моделюванні та дослідженні системи керування.

Закономірності потоків скломаси приведені в роботі [55]. Данні дослідження відбувались за допомогою фізичного моделювання гідродинаміки руху скломаси у ванні печі.

Питання управління зміною складу скла розглянуто в роботі [56]. Приведено принцип порівняння результатів роботи отриманої моделі руху скломаси з даними виробництва. Модель, що отримана в дослідженнях, з розподіленими параметрами.

Загальна роль питання режиму руху скломаси у варильній частині печі розглянуто в роботі [57]. Приведене основне призначення гідродинамічного режиму у моделі. Технологічна особливість розглянута на прикладах.

В роботі [58] приведено взаємозв'язок між в'язкістю та температурою скломаси. Визначено, що при топленні шихти мала в'язкість сприяє швидкому виділенню бульбашок газів і отриманню прозорої та однорідної скломаси. Вивчення залежності в'язкості від температури скломаси особливо важливе для автоматизованого виробництва скломаси.

Гідродинаміка руху рідини та система рівнянь, що відповідають поточному режиму, з врахуванням відповідних критеріїв, приведено в роботах [59, 60]. Аналіз задач руху в'язкої речовини для отримання чисельного розв'язку та алгоритми програмної реалізації наведено в роботі [61]

Дослідження, що приведені в роботі [62], показали, що використання динамічних моделей дозволяє максимально точно описати технологічний процес виготовлення листового скла. Була проведена перевірка адекватності моделі та використання (за необхідністю) механізму уточнення параметрів моделі.

Питання вибору граничних умов для математичної моделі теплообміну між скломасою, кладкою та газовим простором в скловарній печі та їх оцінка приведено авторами в роботі [63]. Визначальним факторами вибору граничних умов є матеріал

виготовлення внутрішньої поверхні ванни печі, технічні показники складу шихти, температура газового простору.

В роботі [64] вивчені умови та розглянуто механізм руху скломаси в скловарних печах при виробництві листового скла за умови, що ширина ванни басейну перевищує стандартні розміри. Також при різному характері картограм зони варіння: симетричному та асиметричному положенню шихти на поверхні скломаси. Приведена математична реалізація з врахуванням зазначених умов.

Модель роботи печі для виробництва листового скла методом фізичного моделювання на базі експериментальних даних розглянуто в роботі [65]. Отримана модель була перевірена на адекватність.

В роботі [66] розроблена математична модель рівнянь зовнішнього теплообміну між тепловими потоками скловарної печі. Кладка була розглянута як одна зі складових системи, однак не було розділення на кладку бокових поверхонь та кладку дна варильного басейну печі.

Запізнення реакції системи на зміну вхідних параметрів (сигналу завдання) притаманно практично всім автоматичним системам. Скловарна піч – високо інерційний об'єкт, врахування ефекту транспортного запізнення в моделі приведено в роботі [67].

Таким чином, розглянуті літературні джерела, показали, що існуючі моделі являють собою системи диференціальних рівнянь, граничні умови обирались згідно технологічного регламенту печі. До нерозглянутих питань можна віднести відсутність структурного моделювання об'єкта керування [68], яке дозволяє більш детально розглянути теплообмін між конкретними тепловими потоками та врахування окремо теплопередачі скломаси з кладкою дна печі. Для подальших досліджень необхідно розробити структурно-параметричну схему скловарної печі з врахуванням входів, виходів та збурень, що діють на об'єкт.

1.3. Параметрична схема скловарної печі ванного типу

Економічна ефективність виробництва та його теплова економічність значною мірою залежать від організації теплових режимів роботи печі. Процес варіння скломаси відбувається в умовах граничної температури кладки, інтенсифікація варіння скла стає можливою при раціональному використанні теплової енергії у ванні печі. Задача по дослідженню теплофізичних характеристик роботи печі необхідно для визначення оптимального теплового режиму роботи печі, що відповідає заданим умовам енергоефективності [19, 69-71]. Дослідження можливо на основі результатів математичного моделювання внутрішнього теплообміну та створенню системи керування, яка б підтримувала заданий тепловий режим. Однак почати дослідження доцільно із розроблення та спрощення структурно-параметричної схеми регенеративної скловарної печі ванного типу з поперечним напрямом полум'я з урахуванням всіх входів, виходів та збурень[19].

Для побудови структурно-параметричної схеми об'єкту керування необхідно виділити входи, виходи та збурення[19]:

Вихідними регульованими параметрами для даного апарату [19]:

- рівень скломаси в печі ($L_{ск}$);
- тиск розрідження в печі ($P_{роз}$);
- температура скломаси на виході з апарату ($T_{ск}$);
- температура газоповітряної суміші в зоні освітлення ($T_{газ-пов}$);
- вміст кисню у вихідних газах печі (відроблених) ($Q_{кис}$).

Вхідні параметри [19] :

- витрата палива (газу) ($F_{газ}$);
- витрата повітря на процес горіння ($F_{пов}$);
- витрата вихідних газів (нагрівання повітря) ($F_{вих.газ}$);

- витрата шихти ($F_{\text{ших}}$);
- витрата повітря на барботаж ($F_{\text{пов.барб}}$);

В печі, окрім керуючих дій, присутні збурюючі дії, які у свою чергу діляться на керовані та некеровані [19].

Керовані :

- фізичні параметри газу на вході (тиск, температура, вологість) ($P_{\text{газ}}, T_{\text{газ}}, f_{\text{газ}}$);
- фізичні параметри повітря на вході (тиск, температура, вологість) ($P_{\text{пов}}, T_{\text{пов}}, f_{\text{пов}}$);

Некеровані :

- склад сировини (шихти) ($Q_{\text{ших}}$);
- швидкість завантаження шихти в ході процесу варки ($V_{\text{ск}}$);
- фізичні параметри навколишнього середовища (тиск, температура, вологість) ($P_{\text{н.с.}}, T_{\text{н.с.}}, f_{\text{н.с.}}$);

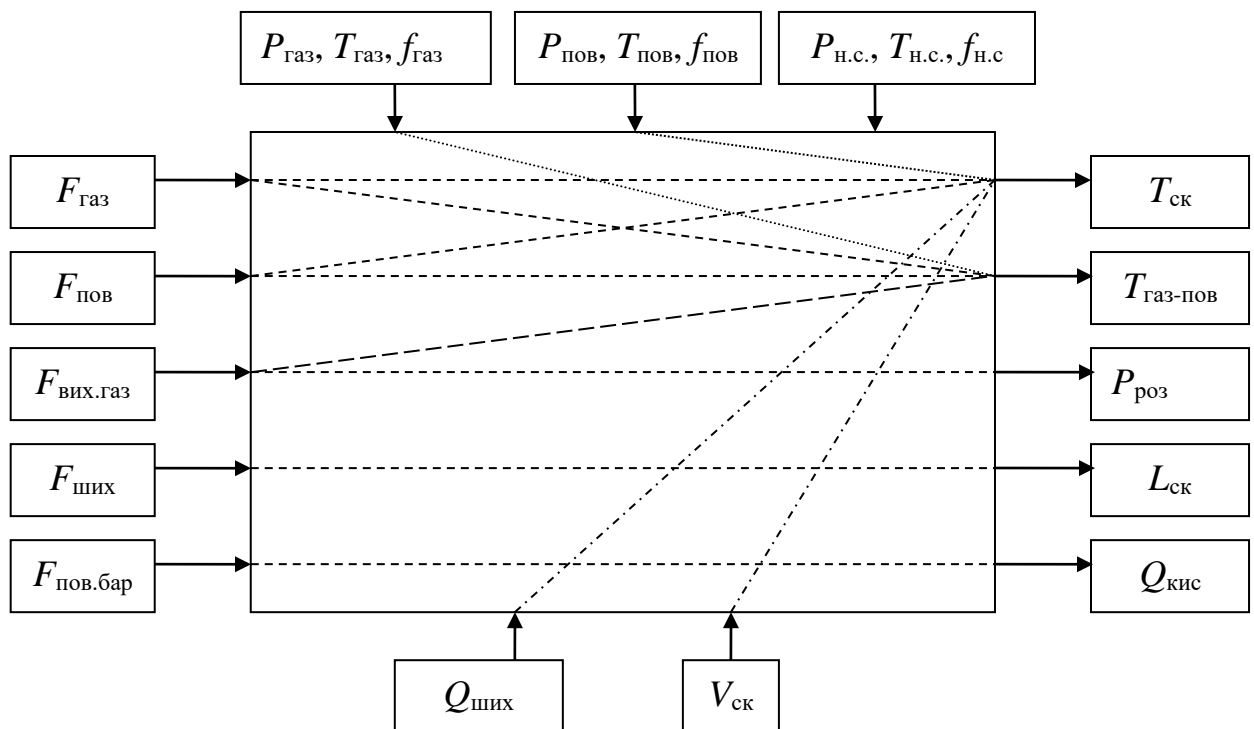


Рисунок 1.10 Параметрична схема скловарної печі.

На рис.1.10 зображена параметрична схема скловарної печі, в якій враховані вхідні, вихідні параметри та збурюючі дії, відповідно керовані та некеровані, а також зображені лінії впливу вхідних параметрів та збурень на вихідні параметри [72].

Параметрична схема приведена на рис.1.10 свідчить про те, що скловарна піч являє собою складний об'єкт. Структурно-параметрична схема складається із основних та допоміжних ліній зв'язку.

Як видно з рис.1.10, вміст кисню у вихідних газах печі напряму залежить від витрати повітря на барботаж, рівень скломаси – від витрати шихти [38, 51], розрідження – від витрати вихідних газів [19, 47, 52, 73], що подаються на нагрівання вхідного повітря. Вище зазначені вихідні параметри регулюються одноконтурними системами керування [71, 72] і тому надалі будемо вважати їх сталими, внаслідок того, що ці параметри практично не впливають на якість вихідного продукту (скломаси), на вище розглянуті параметри не розповсюджується дія збурення (швидкість завантаження шихти та її склад). Фізичні параметри навколишнього середовища (тиск, температура, вологість – $P_{н.с.}$, $T_{н.с.}$, $f_{н.с.}$) не можуть чинити суттєвий вплив на перебіг процесу [4, 6], внаслідок того, що діапазон зміни їх значень менше, ніж значення параметрів технологічного регламенту [19, 53, 58]. Таким чином, значеннями даних параметрів можна нехтувати і вважати їх сталими, та перейти до більш спрощеної схеми, виключивши одноконтурні системи керування.

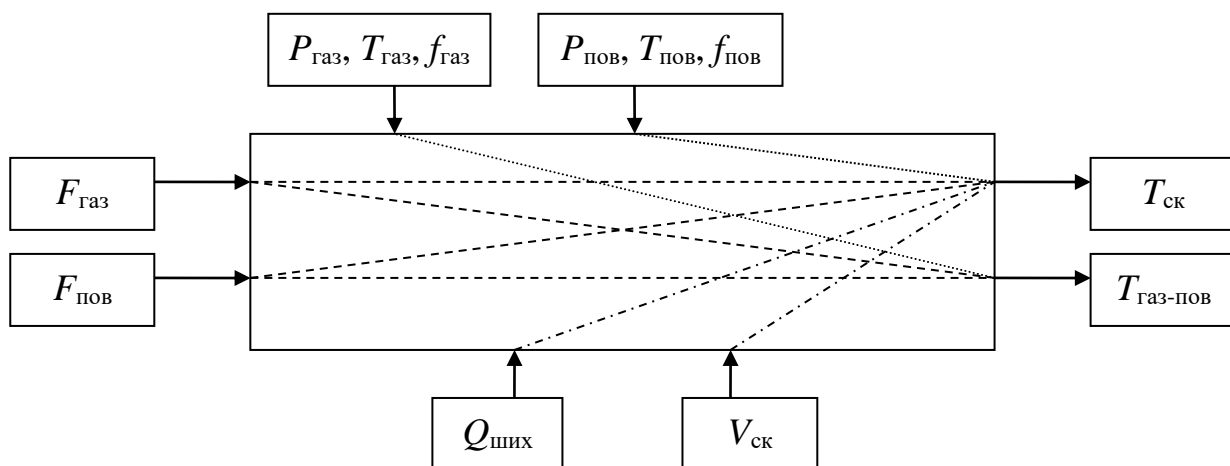


Рисунок 1.11 Спрощена параметрична схема скловарної печі (перший етап).

Температура в зоні освітлення газоповітряної суміші ($T_{\text{газ-пов}}$) – один з найважливіших параметрів печі, тому що він напряду впливає на якість скломаси [71-73]. На виробництві реалізована схема керування температурою в зоні освітлення печі регулюванням подачі газу на пальники [71]. В системі присутня дія на об'єкт одного з керованих збурень – температури повітря на вході. Відбувається регулювання температури газоповітряної суміші в зоні освітлення скловарної печі одноконтурною замкненою системою з одним вхідним сигналом ($F_{\text{пов}}$), сигналом керування ($F_{\text{газ}}$) і керованим збуренням ($T_{\text{пов}}$). В свою чергу підігрівання повітря на вході здійснюється використанням вихідних (відроблених) газів. На рис.1.10 не показана лінія керування витратою вихідних газів ($F_{\text{вих.газ}}$) та температурою керованого збурення ($T_{\text{пов}}$), але на виробництві підігрівання виконується регенераторами і не потребує додаткових фінансових витрат на процес нагрівання пального [30]. Таким чином, кероване збурення $T_{\text{пов}}$ можна розглядати в окремому контурі керування $F_{\text{вих.газ}}-T_{\text{пов}}$. Тиск газу та повітря впливає на надійну і безпечну роботу апарату, безпосередньо вплив на температуру скломаси не чинить. В печі необхідно підтримувати постійний тиск, системи контролю тиску автономні та настроєні на відповідне значення тиску, незалежно від значення $T_{\text{ск}}$ та $T_{\text{газ-пов}}$ [71,72].

Основним вихідним параметром скловарної печі як теплового об'єкту автоматизації виступає температура скломаси ($T_{\text{ск}}$) в точках встановлення термопар (бокові стінки, склепіння, дно, поверхня скломаси) [71-73]. Температура скломаси ($T_{\text{ск}}$) залежить від витрати газу ($F_{\text{газ}}$), витрати повітря ($F_{\text{пов}}$), температури газу на вході ($T_{\text{газ}}$), складу шихти ($Q_{\text{ших}}$), швидкості руху скломаси в ході процесу варки ($V_{\text{ск}}$), що залежить, у свою чергу, від роботи завантажувачів. Параметрична схема, що приведена на рис.1.11, розкладається на дві підсхеми. В першій виходом буде виступати температура скломаси ($T_{\text{ск}}$), вимірювання відбувається донними термопарами, а в другій – температура в зоні освітлення газоповітряної суміші ($T_{\text{газ-пов}}$), вимірювання відбувається термопарами склепіння.

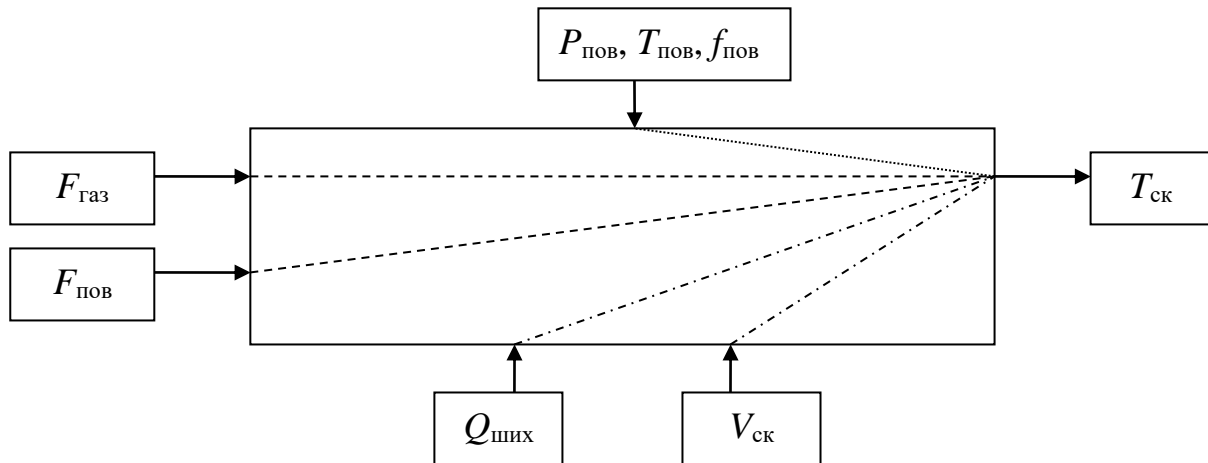


Рисунок 1.12 Частина параметричної схеми скловарної печі з вихідним параметром «температура скломаси».

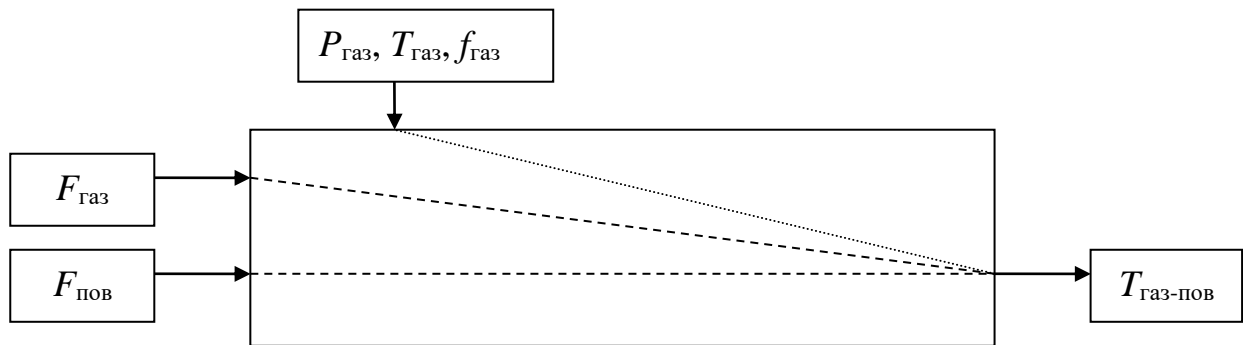


Рисунок 1.13 Частина параметричної схеми скловарної печі з вихідним параметром «температура газоповітряної суміші в зоні освітлення».

Для подальшого дослідження об'єкта керування розглянемо параметричні схеми, що представлені на рис.1.12 та 1.13. Вхідні параметри в обох схемах однакові, а збурення різні. Як було зазначено вище, на значення $T_{\text{газ-пов}}$ суттєвий вплив має кероване збурення $T_{\text{пов}}$. Фактично температура газоповітряної суміші впливає на температуру скломаси і система, в якій вихідним параметром є $T_{\text{газ-пов}}$, входить до складу системи керування подачі пального до пальників печі, як один з контурів. Відповідно вихідним параметром загальної системи виступає температура скломаси. На виробництві створені окремі системи керування для підтримання сталої температури в зоні освітлення.

Розглянемо більш детально параметричну схему з вихідним параметром «температура скломаси». Два параметри – склад сировини (шихти – $Q_{\text{ших}}$) та швидкість руху завантаження шихти в ході процесу варки ($V_{\text{ск}}$), являють собою некеровані збурення [26, 56] і основною задачею при синтезі системи керування є мінімізувати їх вплив на температурний режим скловарної печі, що у свою чергу впливає на якість вихідної продукції [4, 19, 53]. Склад вхідної сировини буде визначатися технологом виробництва, якщо правильно підібрано складові і в правильних пропорціях, то даний параметр перестане бути збуренням, тобто по своєму складу повністю відповідає виробничим нормам і не зможе негативно впливати на якість скломаси [19, 28, 53].

Перед представленням остаточного каналу керування постає задача по виявленню впливу швидкості руху скломаси. На швидкість руху впливає швидкість завантаження нової шихти та температура скломаси [4, 56, 57]. Якщо розглядаємо налаштовану систему керування завантаженням та підтримується відповідний тепловий режим роботи печі, то швидкість руху скломаси не буде змінюватися (для зміни немає підстав). Отримуємо замкнене коло – при зміні температури – змінюється швидкість, а при зміні швидкості – температура. Як і у випадку зі складом шихти, розглядаємо випадок коли завантаження відбувається згідно з технічними вимогами до печі. І тому, виходячи з вище сказаного, швидкість не буде впливати на якість теплового режиму у випадку підтримання відповідного теплового режиму печі.

Параметр $f_{\text{газ}}$ та $P_{\text{газ}}$ (фізичні параметри газу на вході, тиск і вологість) впливають тільки на якість та безпечну роботу газових пальників [71]. Підтримувати усталений тепловий режим пальника, який не відповідає робочим нормам, не можливо, тому таку ситуацію можна віднести до аварійної, яку надалі розглядати не будемо [71]. Дещо інша ситуація з температурою газу на виході з пальника ($T_{\text{газ}}$), даний параметр повинен виступати у ролі константи, але безпосередньо впливає на температуру скломаси, внаслідок присутності теплообміну між газовим простором та верхнім шаром скломаси та температурою газового простору [19, 71, 73]

Таким чином, в схемі приведеної на рис.1.12 представлено основний канал

керування скловарною піччю

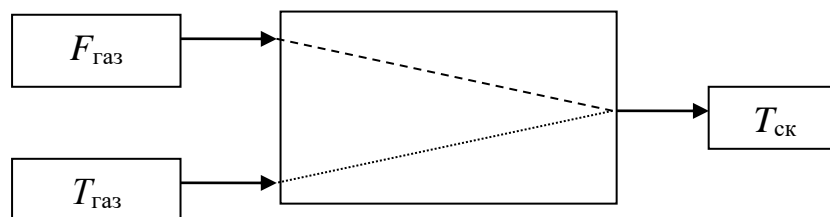


Рисунок 1.14 Основний канал керування скловарної печі

Для роботи печі необхідно провести ряд експериментів, щодо впливу витрати пального та повітря (їх співвідношення) на якість вихідного продукту, встановити оптимальні параметри для оптимально теплового режиму. Виходячи з того, що за якість вихідного продукту (скломаси) відповідає температура $T_{ск}$ [5, 7, 19, 28, 71], досліди проводять за реакцією системи на зміну температури (сигнали донних термопар виходу та термопар склепіння). Зрозуміло, що проводити експерименти, використовуючи власне піч, економічно не доцільно. Це пояснюється дуже високими цінами на пальне (газ) [2, 3, 15, 19]. З даної проблеми будемо виходити за допомогою математичного та імітаційного моделювання скловарної печі.

Досліджуваний об'єкт складається з декількох складових, таких як скломаса, кладка, газовий простір [5, 7, 19, 28, 71]. Необхідно для кожного з них створювати окрему модель і в подальшому створювати модель побудовану за модульним принципом, що буде об'єднувати вище перераховані складові елементи, з яких формується загальна модель об'єкта. Всі входи, виходи та збурення будуть використовуватися при моделюванні згідно розробленої параметричної схеми скловарної печі. При створенні математичної моделі та перевірці її адекватності, окрім проведення аналізу існуючих моделей ванних регенеративних скловарних печей, необхідно врахувати дані та конструкційні особливості печей на виробництві.

В результаті проведених досліджень з параметричною схемою скловарної печі було визначено основний канал керування: витрата газоповітряної суміші ($F_{газ}$) – температура скломаси ($T_{ск}$) та температура газу ($T_{газ}$) [19]. Результати будуть використані при розробленні математичної моделі скломаси як частини об'єкту керування, створенні моделі нагрівання скломаси в скловарній печі, що буде побудована за модульним принципом, та синтезі адаптивної системи керування тепловим режимом скловарної печі .

1.4. Аналіз існуючих систем контролю та керування виробництвом скломаси

Складність технологічного процесу виробництва скломаси та його інерційність потребує створення сучасної автоматичної системи керування, що буде відповідати потребам виробництва. Результати досліджень по розробленню і синтезу систем керування представлено у роботах [74-89]. Проведемо аналіз цих розробок.

В роботі [74] приведено, що основу автоматизованих систем керування складають мікропроцесорні засоби контролю та керування. Під час розробки та синтезу системи керування необхідно опиратись на математичну модель об'єкта, що буде повністю відповідати за технологічним регламентом поведінці реальної скловарної печі. Фактори які підлягають розгляду представлено в роботі [75]:

- підтримання регламенту технологічного процесу – внаслідок великого об'єму варіння скломаси (500-800 тон за добу), навіть невеликі відхилення призводять до значних економічних втрат;
- висока собівартість ванни печі (зменшення витрати на ремонт) та паливно-енергетичних ресурсів, викликає необхідність оптимального режиму роботи системи керування;
- розв'язок задач, що ставляться до якості скла, досягається оперативним керуванням по значенню вихідного параметра – температури скломаси.

У дослідженнях [76-77] представлено, що автоматизація керування процесом виробництва скла відбувається шляхом створення системи керування конкретними технологічними стадіями: система керування підготовки шихти, система керування процесу скловаріння, система керування формування скляної стрічки, система керування різки скла. Розробка автоматизованої системи керування починається зі створення моделі об'єкту керування та її дослідження. Створення системи керування потребує наявності значної інформації про об'єкт та будується на базах даних технологічних параметрів.

В роботі [78] представлено, що в практиці розробки автоматизованих систем керування технологічним процесом скловарного виробництва досягнуто значних результатів по підтриманню заданого теплового режиму: реалізовані теоретичні основи побудови автоматизованих систем керування, розроблені бази даних технологічних параметрів, системи представлення графічної інформації, розроблені та побудовані математичні моделі, що відтворюють зв'язок якості готової продукції та режиму варіння, частково вирішені задачі контролю технологічних параметрів та розрахунок техніко-економічних показників. Представлено, що контроль температурного режиму відбувається за допомогою показів вимірів термопар (пірометрів) дна та склепіння. Передбачено окремі системи автоматичного регулювання технологічних параметрів:

- система підтримання заданої витрати газу;
- система підтримання заданого співвідношення «газ-повітря»;
- система підтримання заданої температури в печі;
- система підтримання рівня скломаси в печі;
- система підтримання тиску в печі.

Значна увага основним підходам по створенню та роботі систем керування процесом виготовлення скломаси приведені авторами в роботах [79-86]. На виробництві, як регулятори використовують мікроконтролери, контрольні системи, що реалізують відповідні закони регулювання. Представлено використання програмованих мікроконтролерів, що дозволяє складати алгоритми керування довільної складності та дає можливість об'єднати окремі локальні алгоритми керування в єдину систему керування. Також приводиться принцип зняття сигналів з термопар, з використанням промислової мережі (тип сигналу – аналоговий, параметри по мережі передаються в цифровому вигляді).

У роботі [8] представлено сучасний засіб побудови комп'ютерно-інтегрованої систем керування, що базується на використанні SCADA-систем. Авторами представлено, що до комп'ютерно-інтегрованої системи пред'являється ряд вимог: візуалізація параметрів на екран оператора, архівування даних, документування

параметрів (дозволяє провести аналіз роботи системи). Термінал оператора, що призначений для відображення технологічних параметрів та налаштування параметрів системи, представляє собою *TFT*-панель, значно спрощена задача видачі команд конкретним ланкам системи керування.

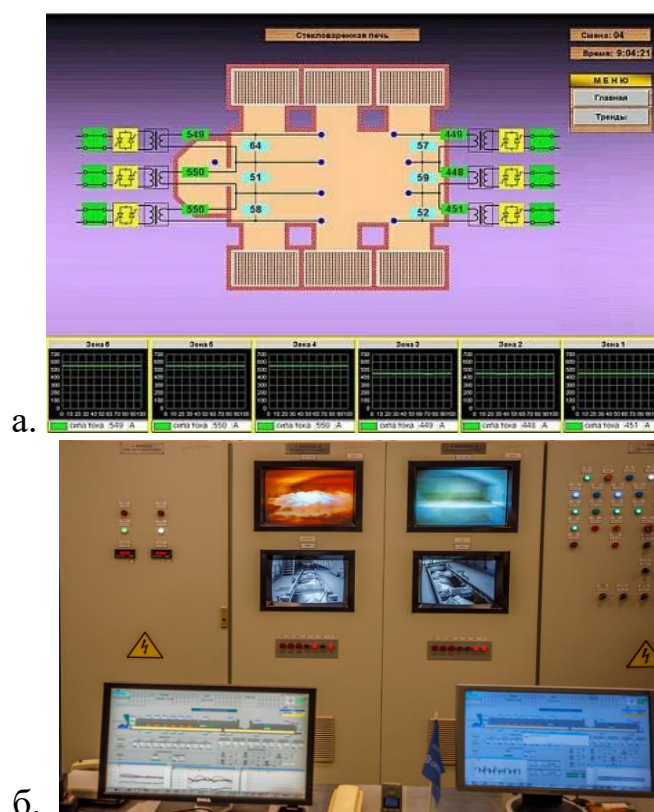


Рисунок 1.15 Приклад *SCADA*-системи керування скловарною піччю

На рис. 1.15. приведено приклад контролю значень температури скломаси у відповідних зонах печі з побудовою графіків зміни температур (а) та контрольний пункт оператора з можливістю досліджувати процес горіння полум'я в варильній зоні печі.

В роботах [87,88] наведено використання алгоритму нечіткого керування та методу нечітких множин при створенні систем керування скловарним виробництвом. Застосування даної методики дало можливість значно розширити можливості алгоритмів керування.

В праці [89] наведено приклад розрахунку теплового балансу та побудови бази даних витрати пального для пошуку оптимальної витрати, що дало можливість враховувати в системах керування та запобігати виникненню перерегулювання.

У дослідженнях [90, 91] представлено принцип системного аналізу процесу варіння скла, використовується при створенні автоматизованої системи керування. Компоненти є складовими системи та лінії зв'язку між ними. Розроблені *UML*-діаграми та представлено, як на їх базі сформувавши алгоритм керування технологічним процесом варіння скла. Розробниками запропоновано підхід до побудови автоматизованої системи регулювання (АСР) процесом варіння скломаси, що забезпечує цілісність системи керування, спрощує процес моделювання та проектування системи.

1.5. Постановка завдання дослідження

Метою досліджень є підвищення енергоефективності процесу виготовлення скломаси шляхом створення системи керування, яка сприятиме підвищенню рівня енергозбереження процесу (шляхом зменшення витрат пального) при забезпеченні якості вихідного продукту, що відповідає даним технологічного регламенту.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання основних задач:

- аналіз скловарної печі як об'єкту автоматизації;
- дослідження структурно-параметричної схеми об'єкту керування;
- розроблення математичної моделі зовнішнього теплообміну;
- розроблення математичної моделі скловарної печі з урахуванням теплопередачі з кладкою ванни печі та дослідження моделі динаміки плавлення скломаси;
- експериментальне дослідження математичної моделі скловарної печі;
- створення та синтез системи керування підтримки заданого температурного режиму роботи печі;
- експериментальне дослідження роботи системи керування тепловим режимом скловарної печі.

1.6. Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз фізико-хімічних процесів, які відбуваються в скловарній печі, досліджено типи існуючих скловарних печей та газових пальників. Наведено показники високих витрат паливно-енергетичних ресурсів в скловарному виробництві.
2. За результатами проведеного дослідження стану математичного моделювання процесу виготовлення скломаси сформульовано завдання на вдосконалення існуючої математичної моделі скловарної печі як об'єкту дослідження.
3. Аналіз літературних джерел за тематикою роботи свідчить про те, що процеси теплообміну між кладкою та скломасою в скловарній печі розглянуті детально, але не приділена увага теплообміну між кладкою дна печі та скломасою, що потребує врахування при дослідженні.
4. Розроблена структурно-параметрична схема скловарної печі, в якій було враховано та досліджено всі вхідні, вихідні параметри та збурення, визначені основні канали керування.
5. Проведені дослідження стану сучасних систем автоматичного керування виробництвом скломаси показали, що в основному системи керування спрямовані на стабілізацію температурного режиму в скловарній печі, врахування реакції на дію некерованого збурення відбувається шляхом збільшення витрати газу, однак потребує оптимального розподілення витрати пального по пальникам.
6. За результатами аналізу фізико-хімічних процесів, що відбуваються в скловарній печі, стану математичного моделювання та систем керування, сформовано завдання дисертаційних досліджень.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

2.1. Скловарна піч як об'єкт математичного моделювання

Для аналізу та синтезу системи керування необхідно розроблення досконалої моделі об'єкта керування. Побудова моделі базується на формалізації закономірностей функціонування об'єкта. Одним з найефективніших методів побудови моделі складного об'єкта є його ідентифікація.

Якість продукції та економія пального значною мірою залежать від організації теплових режимів роботи печі [26]. Процес варіння скломаси відбувається в умовах граничної температури експлуатації кладки, інтенсифікація варіння скла стає можливою при раціональному використанні теплової енергії ванни печі. Задача по дослідженню теплофізичних характеристик роботи печі необхідно для режиму роботи печі, що відповідає заданим умовам енергоефективності. У свою чергу дослідження можливе на основі результатів математичного моделювання внутрішнього теплообміну та створенню системи керування, яка б ефективно підтримувала заданий тепловий режим [27].

Складність створення математичної моделі обумовлена в представленні всього різноманіття фізичних явищ, що протікають в процесі варіння скломаси. Сталість теплотехнічних параметрів роботи печі відповідає отриманню скломаси з високим ступенем термічної однорідності. Підтримання заданого температурного режиму скловарної печі обумовлено процесами хімічного перетворення та сприяє нагріванню шихти до температури плавлення, повного розчинення компонентів шихти в розплаві скла. В основу математично опису покладено розгляд наступних процесів: гідродинамічних, термодинамічних, хімічних. Рівняння, що будуть охоплювати відповідні процеси: руху Нав'є-Стокса, переносу тепла, неперервності, стану середовища [6, 7, 32]. Всі рівняння, що перелічені вище, відповідають певним граничним умовам [31].

Об'єктом дослідження є регенеративна скловарна піч ванного типу з поперечним поданням полум'я, що встановлена на ряді вітчизняних виробничих та зарубіжних підприємств. Піч даної конструкції використовується для виготовлення листового скла будівельного призначення.

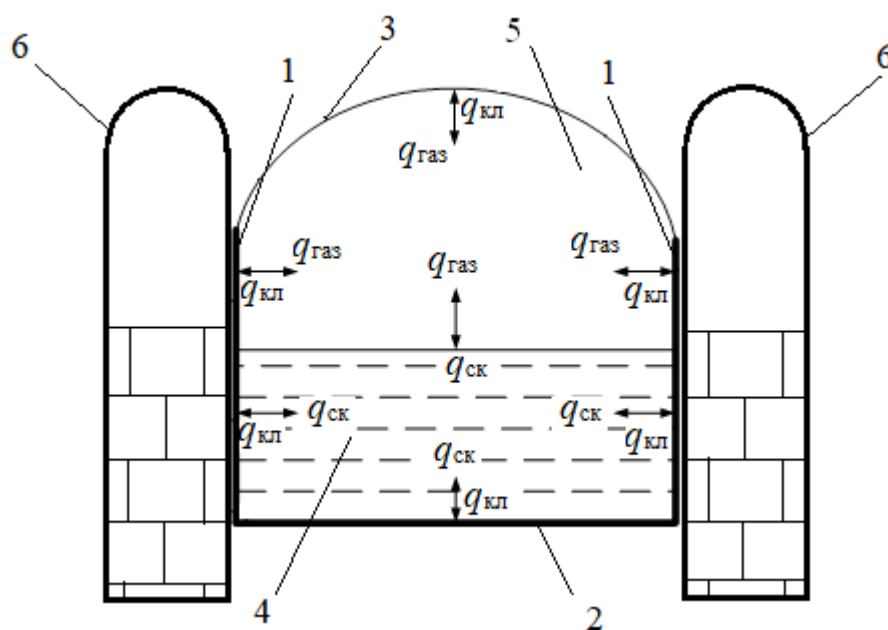


Рисунок 2.1 Схема скловарної печі ванного типу в поперечному перерізі

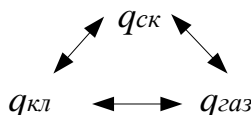
1 – бокові стінки, 2 – дно, 3 – склепіння, 4 – скломаса, 5 – газовий простір, 6 – регенератори

Як видно зі схеми, скломаса контактує з газовим середовищем, стінками і дном (надалі 1, 2 і 3 позначаються як кладка), газовий простір – з скломасою та кладкою, кладка – з скломасою та газовим простором.

Аналіз стану математичного моделювання скловарної печі був наведений в пп. 1.2-1.3 на основі робіт [27-73], були розглянуті процеси, що протікають під час виготовлення скломаси та взаємозв'язок між ними (до процесів відноситься теплообмін та гідродинамічний рух скломаси у ванні печі), розроблена структурно-параметрична схема скловарної печі, наведено основні канали керування.

Математична модель об'єкту керування повинна враховувати всі технологічні особливості процесу. Скловарна піч як об'єкт математичного моделювання містить у собі декілька складових: скломаса, кладка та газовий простір. Кожна зі складових моделі повинна мати свій математичний опис для розрахунку взаємодії між

складовими в моделі об'єкту керування. Кожна із складових має по два контакти з іншою, тобто теплові потоки скломаси ($q_{ск}$), кладки ($q_{кл}$) та газ ($q_{газ}$) будуть взаємодіяти один з одним за схемою:



Даний взаємозв'язок використовується при створенні системи рівнянь теплових потоків [94, 95].

Математичний опис скловарної печі як об'єкту дослідження включає в себе рівняння зовнішнього теплообміну для скломаси, кладки та газу, математичний опис процесу нагрівання, що будуть використані для розрахунку передатних функцій скломаси та кладки [33, 36, 49, 54] за каналами «температура газу – вихідна температура скломаси» та «температура газу – температура кладки у характерних точках» відповідно. Із зазначених складових буде формуватися передатна функція ванни печі. Під зовнішнім теплообміном розуміють теплообмін між об'єктом та його оточенням, наприклад теплообмін між скломасою та оточуючим її середовищем – кладкою бічних поверхонь, кладкою дна, газовим простором.

Виходячи із конструкційних особливостей скловарної печі, скломасу можна вважати паралелепіпедові форми (прямокутною областю товщиною h), що дозволяє розглядати скломасу як необмежену пластину товщиною h [95, 97]. Однак на відміну від типового виду необмеженої пластини з урахуванням конструктивних особливостей скловарної печі [4, 29, 93, 95] та врахувати їх у математичній моделі процесу нагрівання скломаси у ванні печі.

2.2. Математична модель зовнішнього теплообміну

Система рівнянь зовнішнього теплообміну отримується з рівнянь балансу для ефективного та результуючого випромінювання поверхні та середовища у вигляді

рівнянь теплових потоків відповідних груп, які приймають участь у теплообміні [33, 49, 92, 93]. При цьому приймається, що ефективне випромінення поверхні скломаси та кладки підпорядковується закону Ламберта – поглинаючі здібності випромінювачів рівні для всіх променевих потоків та дорівнюють відповідним ступеням чорноти [93]. Оптичні характеристики випромінюючого середовища та поверхні не залежать від просторових координат та беруться як середньоефективні величини [93, 95]. Аналіз досліджень ведеться для усталеного режиму роботи печі – в першому наближенні результуюче випромінення кладки прийнято рівним нулю [36,96].

Введемо припущення [17, 36, 40, 42, 52, 56] – сталість густини ефективного випромінення скломаси та кладки, сірі властивості випромінювачів, рівність температури випромінюючого середовища по загальному об'єму простору, що випромінюється. Поглинальні здібності випромінювачів однакові для всіх променевих потоків та рівні визначеним ступеням чорноти. Температура скломаси та кладки беруться рівними середньоефективним величинам. Використаємо формулу для розрахунку передачі тепла q [17, 95] :

$$q = \sigma_v (T_{\text{вип}}^4 - T_{\text{пром}}^4),$$

де σ_v – видимий коефіцієнт випромінення, $T_{\text{вип}}$ – температура випромінюючого середовища, $T_{\text{пром}}$ – температура променесприймаючого середовища.

Ефективне випромінення дзеркала скломаси $E_{\text{еф.ск}}$ обраховується за формулою [17, 92-94, 96] :

$$E_{\text{еф.ск}} = E_{\text{влас}} + E_{\text{відр}},$$

де $E_{\text{влас}}$ – власне випромінення, $E_{\text{відр}}$ – відбиваюче випромінення.

Розглянемо окремо складові ефективного випромінення дзеркала скломаси [17, 92-94, 96] :

$$E_{\text{влас}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{ск}} \cdot F_{\text{в}} \cdot T_{\text{ск}}^4 = 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4,$$

де σ_0 – стала Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$), $\varepsilon_{\text{ск}}$ – ступінь чорноти скломаси 0,82 [17, 93, 96], $T_{\text{ск}}$ – температура скломаси, $F_{\text{в}}$ – поверхня ванни.

$$E_{\text{відр}} = E_{\text{відр.газ}} + Q_{\text{відр.кл}},$$

де $E_{\text{відр.газ}}$ – відбиваюче випромінення газу, $Q_{\text{відр.кл}}$ – тепловий потік від кладки.

В свою чергу [17, 93, 94, 96]

$$\begin{cases} E_{\text{відр.газ}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{газ}} \cdot F_{\text{в}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ск}}) \cdot T_{\text{газ}}^4, \\ Q_{\text{відр.кл}} = E_{\text{еф.кл}} \cdot \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{в}}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ск}}); \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{\text{відр.газ}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{газ}} \cdot F_{\text{в}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ск}}) \cdot T_{\text{газ}}^4, \\ Q_{\text{відр.кл}} = E_{\text{еф.кл}} \cdot \Psi_{\text{кл}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ск}}); \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{\text{відр.газ}} \approx 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4, \\ Q_{\text{відр.кл}} \approx 0,2 \cdot E_{\text{еф.кл}}; \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\varepsilon_{\text{газ}}$ – ступінь чорноти газу 0,222 [17, 93, 96], $T_{\text{газ}}$ – температура газу, $F_{\text{кл}}$ – поверхня кладки, $\Psi_{\text{кл}}$ – ступінь розвитку кладки, що дорівнює відношенню взаємовипромінюючих площ $\Psi_{\text{кл.}} = F_{\text{кл}}/F_{\text{ск}}$, $F_{\text{ск}}=96\text{м}^2$, $F_{\text{кл}}=141,08\text{м}^2$, таким чином $\Psi_{\text{кл}}=1,47$.

Таким чином, $E_{\text{еф.ск}}$ розраховується за формулою, виходячи із відповідних значень степені чорноти тіла та площі дзеркала скломаси :

$$E_{\text{эф.ск}} = 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 1,47 \cdot E_{\text{эф.кл}}$$

Ефективне випромінення кладки в (2.1) необхідно знайти. Для розв'язання поставленої задачі знаходимо власне випромінення кладки, відбиваюче випромінення кладки і відбиваюче випромінення газу [17, 93-96] : $E_{\text{влас.кл.}}$, $E_{\text{відр.кл.}}$, $E_{\text{відр.газ}}$.

$$E_{\text{влас.кл}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{кл}} \cdot F_{\text{к}} \cdot T_{\text{к}}^4 = 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{к}}^4$$

$$E_{\text{відр. кл}} = E_{\text{відр.газ}} + Q_{\text{відр.ск}} + Q_{\text{відр.кл}},$$

$$E_{\text{відр.газ}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{газ}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot (1 - \epsilon_{\text{кл}}) = 12,43 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4,$$

де $\epsilon_{\text{кл}}$ – ступінь чорноти кладки (0,93) [17, 93, 96], $T_{\text{кл}}$ – температура кладки.

Значення $Q_{\text{відр.ск}}$ та $Q_{\text{відр.кл}}$ знаходим за формулами [17, 93-96]

$$\begin{aligned} Q_{\text{відр.ск}} &= E_{\text{эф.ск}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{кл}}) = \\ &= E_{\text{эф.ск}} \cdot (1 - 0,222) \cdot (1 - 0,93) = 0,05 \cdot E_{\text{эф.ск}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{відр.кл}} &= E_{\text{эф.кл}} \cdot (1 - \psi_{\text{ск}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{кл}}) = \\ &= E_{\text{эф.кл}} \cdot (1 - 0,68) \cdot (1 - 0,222) \cdot (1 - 0,93) = 0,02 \cdot E_{\text{эф.кл}} \end{aligned}$$

$$E_{\text{эф.кл}} = 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 12,43 \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,05 \cdot E_{\text{эф.ск}} + 0,02 \cdot E_{\text{эф.кл}}$$

де $\Psi_{\text{ск.}}$ – ступінь розвитку скломаси, що дорівнює відношенню взаємовипромінюючих площ $\Psi_{\text{ск.}} = F_{\text{ск}}/F_{\text{кл}}$, $F_{\text{ск}}=96\text{м}^2$, $F_{\text{кл}}=141,08\text{м}^2$, таким чином $\Psi_{\text{ск}}=0,68$.

Існує залежність, що об'єднує результуюче, падаюче та ефективне випромінення [17, 96] :

$$E_{\text{рез}} = E_{\text{пад}} + E_{\text{эф}},$$

виходячи з якої необхідним для пошуку є значення падаючого ($E_{\text{пад}}$) та результуючого ($E_{\text{рез}}$) випромінення [17, 94, 96]:

$$\begin{aligned} E_{\text{пад.ск}} &= \frac{E_{\text{відр.ск}}}{(1 - \varepsilon_{\text{ск}})} = \frac{21,75 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 0,2 \cdot E_{\text{эф.кл}}}{(1 - 0,82)} = \\ &= 120,8 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 1,11 \cdot E_{\text{эф.кл}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{пад.кл}} &= \frac{E_{\text{відр.кл}}}{(1 - \varepsilon_{\text{кл}})} = \frac{12,43 \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,05 \cdot E_{\text{эф.ск}} + 0,02 \cdot E_{\text{эф.кл}}}{(1 - 0,93)} = \\ &= 177,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,71 \cdot E_{\text{эф.ск}} + 0,28 \cdot E_{\text{эф.кл}} \end{aligned}$$

$$E_{\text{рез.ск}} = 120,8 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 1,11 \cdot E_{\text{эф.кл}} - E_{\text{эф.ск}}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{рез.кл}} &= 177,6 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 0,71 \cdot E_{\text{эф.ск}} + 0,28 \cdot E_{\text{эф.кл}} - E_{\text{эф.кл}} = \\ &= 177,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,71 \cdot E_{\text{эф.ск}} - 0,72 \cdot E_{\text{эф.кл}} \end{aligned}$$

В результаті отримана система з 4-х рівнянь з 4-ма невідомими :

$$\begin{cases} E_{\text{еф.ск}} = 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,2 \cdot E_{\text{еф.кл}}, \\ E_{\text{еф.кл}} = 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 12,43 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,05 \cdot E_{\text{еф.ск}} + 0,02 \cdot E_{\text{рез.кл}}, \\ E_{\text{рез.ск}} = 120,8 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 1,11 \cdot E_{\text{еф.кл}} - E_{\text{еф.ск}}, \\ E_{\text{рез.кл}} = 177,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,71 \cdot E_{\text{еф.ск}} - 0,7 \cdot E_{\text{еф.кл}}; \end{cases} \quad (2.2)$$

де $E_{\text{рез.ск}}$ – результуюче випромінення для теплового потоку скломаси $q_{\text{ск}}$, $E_{\text{рез.кл}}$ – результуюче випромінення для теплового потоку кладки $q_{\text{кл}}$ [17, 95, 96].

Після зведення подібних (2.2) прийме вигляд

$$\begin{aligned} E_{\text{еф.кл}} &= 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 12,43 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 22,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + \\ &+ 1,09 \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,005 \cdot E_{\text{еф.кл}} + 0,02 \cdot E_{\text{еф.кл}} \\ 0,975 \cdot E_{\text{еф.кл}} &= 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 13,52 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 22,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 \\ E_{\text{еф.ск}} &= 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + \\ &+ 0,2 \cdot (763 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 13,9 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 22,8 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4) \\ E_{\text{еф.ск}} &= 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 152,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + \\ &+ 2,78 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 4,56 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} E_{\text{еф.ск}} = 450,56 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 24,53 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 152,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4, \\ E_{\text{еф.кл}} = 763 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 13,9 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 22,8 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4; \end{cases} \quad (2.3)$$

Розв'язуючи систему (2.2) відносно $E_{\text{рез.ск}}$ та $E_{\text{рез.кл}}$, з врахуванням (2.3), отримаємо

$$q_{\text{ск}} = \frac{E_{\text{рез.ск}}}{F_{\text{в}}} = \frac{-435,8 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 343,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 105,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4}{96}$$

$$q_{\text{кл}} = \frac{E_{\text{рез.кл}}}{F_{\text{кл}}} = \frac{297,85 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 - 480,7 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 184,1 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4}{141,08}$$

Таким чином, тепловий потік для скломаси та кладки буде мати вигляд [17] :

$$\begin{cases} q_{\text{ск}} = -4,54 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 3,57 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4, \\ q_{\text{кл}} = 2,11 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 - 3,41 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4. \end{cases} \quad (2.4)$$

Після перетворень

$$\begin{cases} q_{\text{ск}} = 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{кл}}^4 - T_{\text{ск}}^4) + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{газ}}^4 - T_{\text{ск}}^4), \\ q_{\text{кл}} = 2,11 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{ск}}^4 - T_{\text{кл}}^4) + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{газ}}^4 - T_{\text{кл}}^4); \end{cases}$$

В результаті отримана система рівнянь (2.4) для теплових потоків, що буде використана при створенні структурної моделі об'єкту [17, 97].

В наслідок того, що процес скловаріння відбувається у вузькому температурному діапазоні, необхідно обмежитись лінеаризованими рівняннями для теплових потоків скломаси та кладки. Існує два основних напрямку лінеаризації [98]: графоаналітичний (лінійно-кускова апроксимація) і аналітичний. Лінійно-кускові методи лінеаризації базуються на заміні окремих криволінійних частин характеристик відрізками прямої і формування відповідних аналітичних залежностей. Аналітичні методи лінеаризації базуються на розкладанні нелінійної

функції в ряд довкола деякої (робочої, номінальної) точки характеристики. Застосовують ряди Паде, Фур'є, Тейлора. Для ряду Тейлора нелінійну функцію можна записати у вигляді нескінченного ряду [17, 98].

Запишемо систему рівнянь (2.4) в приростах:

$$\begin{cases} q_{ск.0} + \Delta q_{ск} = -4,54 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{ск.0} + \Delta T_{ск})^4 + 3,57 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{кл.0} + \Delta T_{кл})^4 + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{газ.0} + \Delta T_{газ})^4, \\ q_{кл.0} + \Delta q_{кл} = 2,11 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{ск.0} + \Delta T_{ск})^4 - 3,41 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{кл.0} + \Delta T_{кл})^4 + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{газ.0} + \Delta T_{газ})^4; \end{cases} \quad (2.5)$$

Використовуючи розкладання в ряд Тейлора та нехтуючи величинами другого та вищого порядку, внаслідок їх малого значення [93, 95], складові системи рівняння будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} (T_{ск.0} + \Delta T_{ск})^4 &= T_{ск.0}^4 + 4T_{ск.0}^3 \Delta T_{ск} + \dots, \\ (T_{кл.0} + \Delta T_{кл})^4 &= T_{кл.0}^4 + 4T_{кл.0}^3 \Delta T_{кл} + \dots, \\ (T_{газ.0} + \Delta T_{газ})^4 &= T_{газ.0}^4 + 4T_{газ.0}^3 \Delta T_{газ} + \dots, \end{aligned}$$

Доданки з приростом в степені 2 досить малі, тому прирівнюються до 0 [95, 99], таким чином, (2.5) прийме вигляд

$$\begin{cases} q_{ск.0} + \Delta q_{ск} = -4,54 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{ск.0}^4 + 4T_{ск.0}^3 \Delta T_{ск}) + 3,57 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{кл.0}^4 + 4T_{кл.0}^3 \Delta T_{кл}) + \\ + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{газ.0}^4 + 4T_{газ.0}^3 \Delta T_{газ}), \\ q_{кл.0} + \Delta q_{кл} = 2,11 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{ск.0}^4 + 4T_{ск.0}^3 \Delta T_{ск}) - 3,41 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{кл.0}^4 + 4T_{кл.0}^3 \Delta T_{кл}) + \\ + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{газ.0}^4 + 4T_{газ.0}^3 \Delta T_{газ}); \end{cases}$$

Розкриваємо дужки для подальших розрахунків:

$$\begin{cases} q_{ск.0} + \Delta q_{ск} = -4,54 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^4 - 18,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^3 \Delta T_{ск} + 3,57 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^4 + \\ + 14,28 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^3 \Delta T_{кл} + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^4 + 4,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^3 \Delta T_{газ}, \\ q_{кл.0} + \Delta q_{кл} = 2,11 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^4 + 8,44 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^3 \Delta T_{ск} - 3,41 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^4 - \\ - 13,64 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^3 \Delta T_{кл} + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^4 + 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^3 \Delta T_{газ}; \end{cases}$$

Відокремимо рівняння статики, тобто складові приростів Δ по температурі скломаси, кладки, газу та по тепловому потоку скломаси і кладки.

$$\begin{cases} \Delta q_{ск} = -18,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^3 \Delta T_{ск} + 14,28 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^3 \Delta T_{кл} + 4,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^3 \Delta T_{газ}, \\ \Delta q_{кл} = 8,44 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^3 \Delta T_{ск} - 13,64 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^3 \Delta T_{кл} + 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^3 \Delta T_{газ}; \end{cases} \quad (2.6)$$

де $T_{ск.0}$, $T_{кл.0}$, $T_{газ.0}$ – початкові значення температури скломаси, газу та кладки згідно технологічного регламенту, що можуть змінюватись в залежності від початку точки відліку, як приклад, якщо вимірювання починати з першої донної термопари, то $T_{ск.0\text{дно}1}$ буде відрізнятись від $T_{ск.0\text{дно}3}$ (якщо вимірювання починати з третьої донної термопари).

Позначимо коефіцієнти при відповідних ΔT

$$\begin{cases} a_1 = -18,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^3, \\ a_2 = 14,28 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^3, \\ a_3 = 4,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^3, \\ b_1 = 8,44 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ск.0}^3, \\ b_2 = -13,64 \cdot 10^{-8} \cdot T_{кл.0}^3, \\ b_3 = 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot T_{газ.0}^3; \end{cases}$$

Підставляємо коефіцієнти в систему (2.6)

$$\begin{cases} \Delta q_{ск} = a_1 \cdot \Delta T_{ск} + a_2 \cdot \Delta T_{кл} + a_3 \cdot \Delta T_{газ}, \\ \Delta q_{кл} = b_1 \cdot \Delta T_{ск} + b_2 \cdot \Delta T_{кл} + b_3 \cdot \Delta T_{газ}; \end{cases}$$

Виконаємо перетворення за Лапласом відповідної системи рівнянь :

$$\begin{cases} q_{ск}(p) = a_1 \cdot T_{ск}(p) + a_2 \cdot T_{кл}(p) + a_3 \cdot T_{газ}(p), \\ q_{кл}(p) = b_1 \cdot T_{ск}(p) + b_2 \cdot T_{кл}(p) + b_3 \cdot T_{газ}(p); \end{cases} \quad (2.7)$$

Таким чином, отримана система рівнянь для теплових потоків, представлена в перетвореннях за Лапласом, що буде покладена в основу створення структурної моделі об'єкту керування.

2.3. Структурне моделювання об'єкту керування

Структурна модель – вид моделі, що отриманий за допомогою передатних функцій (ланок) елементів об'єкта [68]. Структурна модель представлена у вигляді схеми зв'язків між складовими елементами. Необхідність створення структурної моделі об'єкту керування полягає у спрощенні задачі розрахунку передатної функції скловарної печі з системи теплових потоків. В свою чергу передатна функція скловарної печі являє собою складну структуру, що залежить від передатних функцій скломаси, кладки та газового простору.

В п. 2.2 було розглянуто процес створення системи рівнянь для теплових потоків (2.4), що випромінюють скломаса ($q_{ск}$) та кладка ($q_{кл}$) ванни скловарної печі, в системі рівнянь теплових потоків (2.7) представлені температури $T_{ск}$, $T_{кл}$, $T_{г}$ – скломаси, кладки та газу відповідно. Розглядаючи систему (2.4) в приростах та виконавши перетворення за Лапласом [98] для лінеаризованої системи, перейшли до вигляду (2.7).

В системі (2.7) коефіцієнти $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ відповідають фізичним параметрам скломаси, кладки та газу. З урахуванням даних виробництва [1, 5, 6] значення коефіцієнтів відповідно дорівнюють :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = -18,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск.0}}^3, T_{\text{ск.0}} = 1200^0 \text{ C}, a_1 = -317,95; \\ a_2 = 12 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл.0}}^3, T_{\text{кл.0}} = 1300^0 \text{ C}, a_2 = 263,64; \\ a_3 = 4,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ.0}}^3, T_{\text{газ.0}} = 1250^0 \text{ C}, a_3 = 85,94; \\ b_1 = 8,44 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск.0}}^3, T_{\text{ск.0}} = 1200^0 \text{ C}, b_1 = 145,84; \\ b_2 = -13,64 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл.0}}^3, T_{\text{кл.0}} = 1300^0 \text{ C}, b_2 = -299,67; \\ b_3 = 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ.0}}^3, T_{\text{газ.0}} = 1250^0 \text{ C}, b_3 = 101,56; \end{array} \right.$$

Початкові значення температури скломаси, газу та кладки були усереднені, таким чином щоб не переходили допустимі межі технологічного регламенту [78, 92].

Введемо коефіцієнти $k_1, k_2, k, k_2, T_1(x), T_2, T_3, T_4$ для передатних функцій складових структурної моделі об'єкту. Врахувавши дані виробництва [1, 5, 6], коефіцієнти відповідно дорівнюють:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{ск}}, \lambda_{ск} = 21,19 \frac{Вт}{м \cdot град}, k_1 = 0,0236; \\ k_2 = \frac{1}{\lambda_{кл}}, \lambda_{кл} = 2,09 \frac{Вт}{м \cdot град}, k_2 = 0,78; \\ k = \frac{1}{\lambda_{ск}}, \lambda_{ск} = 21,19 \frac{Вт}{м \cdot град}, k = 0,0472; \\ k_2 = \frac{4 \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot T_{z0}^3 \cdot T_2(p)}{G_{z0}}, \sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot град^2}, \varepsilon_2 = 0,222, k_2 = \frac{98,34 \cdot T_2(p)}{G_{z0}}; \\ T_1(x) = \frac{x^2}{a_{ск}}, a_{ск} = 0,44 \cdot 10^{-5}, T_1(x) = \frac{x^2}{0,44 \cdot 10^{-5}}; \\ T_2 = \frac{h^2}{a_{ск}}, a_{ск} = 0,44 \cdot 10^{-5}, h = 0,63 м, T_2 = 9,02 \cdot 10^4; \\ T_3 = \frac{(\delta - y)^2}{a_{кл}}, a_{кл} = 0,18 \cdot 10^{-5}, y = \delta, T_3 = 0; \\ T_4 = \frac{\delta^2}{a_{кл}}, a_{кл} = 0,18 \cdot 10^{-5}, \delta = 0,6 м, T_4 = 2 \cdot 10^5; \end{array} \right.$$

Тепловий потік для газу [92, 96] визначається як функція залежності від витрати, теплоємності та температури газу при вильоту з пальника

$$q_2(p) = G_2 c T_2^4, \quad (2.8)$$

де G_2 – витрата газу.

Передатні функції елементів скловарної печі представлені у вигляді відношення вихідного значення температури до теплового потоку [97], передатна функція скломаси описує об'єкт з розподіленими параметрами $W_{ст}(x, p)$.

$$W_{ск}(p) = \frac{T_{ск}(p)}{q_{ск}(p)} \quad (2.9)$$

$$W_{кл}(p) = \frac{T_{кл}(p)}{q_{кл}(p)} \quad (2.10)$$

$$W_{ск}(x, p) = \frac{T_{ск}(x, p)}{q_{ск}(p)} \quad (2.11)$$

$$W_2(p) = \frac{T_2(p)}{q_2(p)} \quad (2.12)$$

Структурна модель об'єкта керування [97], що відповідає системі (2.7), приведена на рис.2.2, дозволяє визначити структуру печі, як об'єкту керування на основі окремих ланок.

Коефіцієнти $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ враховані як ланки та передатні функції (2.9) – (2.12) з'єднані послідовно.

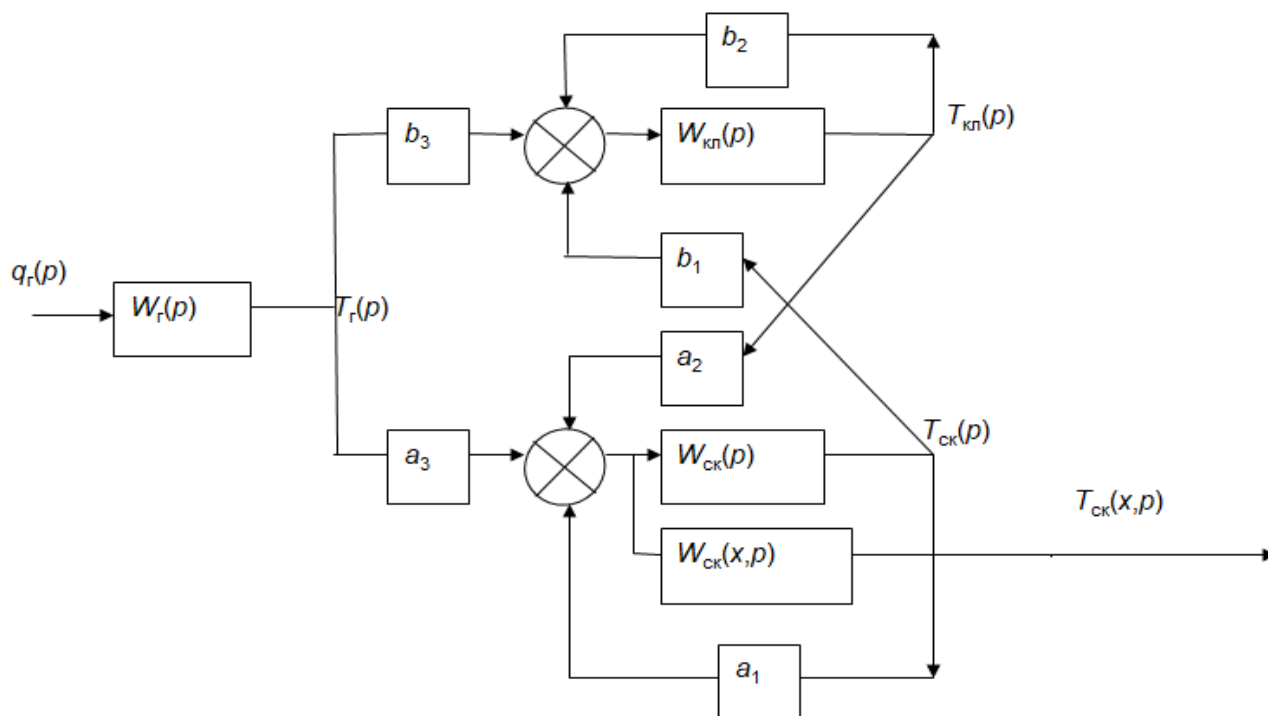


Рисунок 2.2 Структурна модель об'єкта керування.

Однак на схемі, що представлена на рис. 2.2, не враховані теплообмін між скломасою та кладкою дна – теплопередачі між скломасою та кладкою дна печі. З включенням до структурної моделі даних складових, загальний вигляд структурної моделі об'єкту керування набуває вигляду

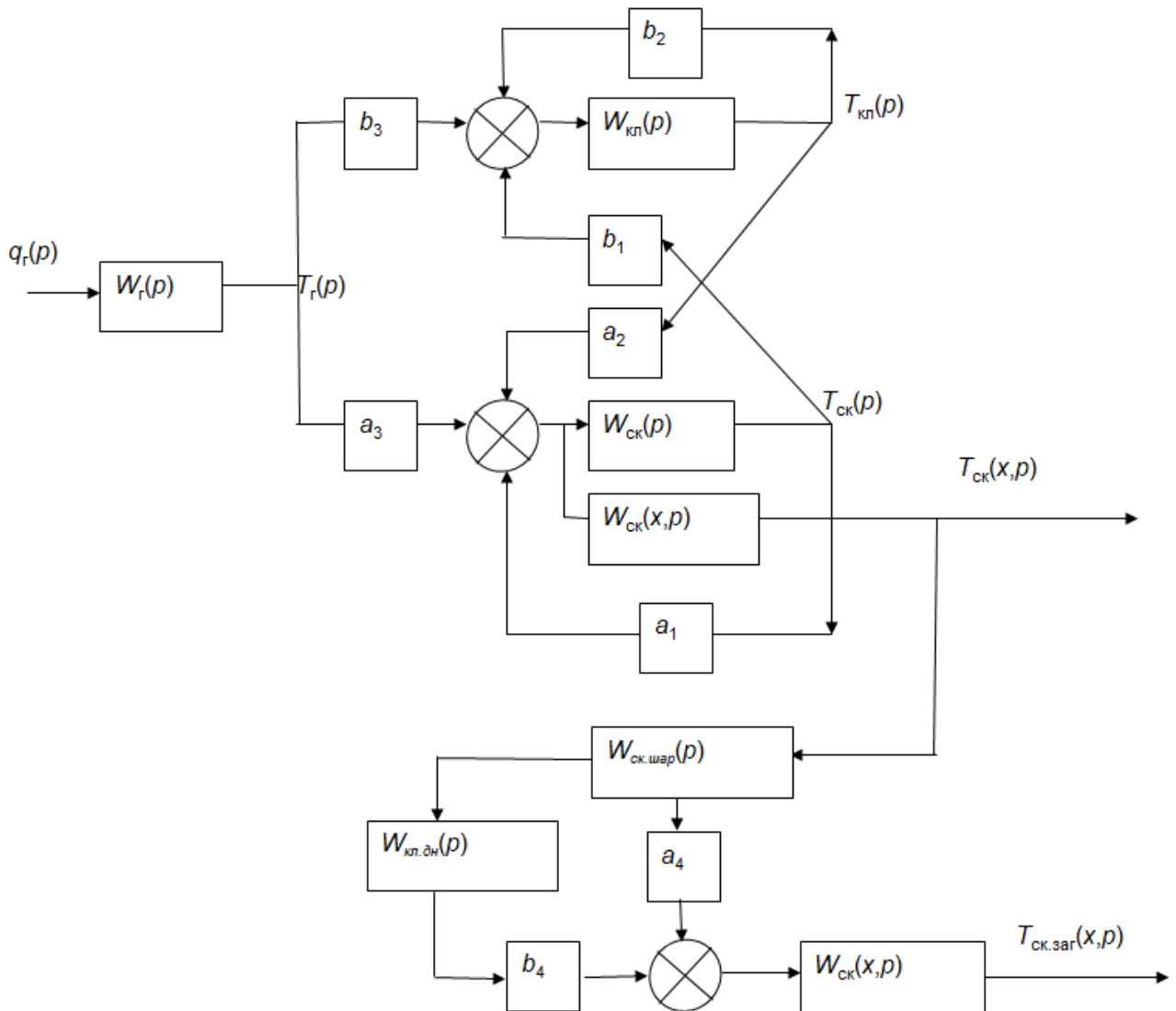


Рисунок 2.3 Структурна модель об'єкту керування.

Наступною задачею є спрощення отриманої структури внаслідок того, що в програмних продуктах, призначених для обробки та розрахунку моделей, наявність великої кількості ліній зв'язку між складовими об'єкту керування викликають похибки вихідних результатів обрахунків. Спрощення структурної моделі призначено для розрахунку загальної передатної функції об'єкту за каналом

«витрата газу – вихідна температура скломаси», яка у свою чергу, необхідна для синтезу адаптивної системи керування скловарною піччю.

В загальному вигляді після спрощень схема рис. 2.3 набуває вигляду

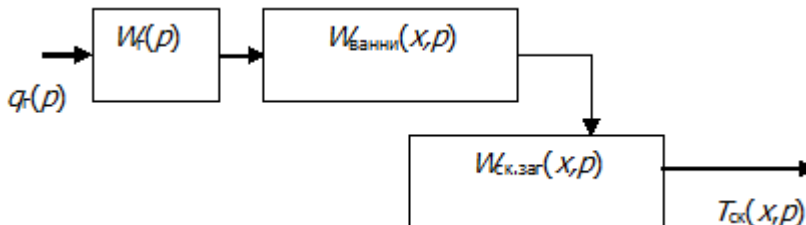


Рисунок 2.4 Спрощена структурна модель об'єкту керування.

На рис.2.3. та 2.4. присутні $W_{кл.дн}(p)$ – передатна функція кладки дна печі, $W_{кл}(p)$ – передатна функція кладки печі, $T_{ск}(p)$ – проміжна температура скломаси, $T_{кл}(p)$ – температура кладки, $T_r(p)$ – температура газу, $W_{ванни}(x,p)$ – передатна функція ванни печі з розподіленням по глибині скломаси, $W_{ск.заг}(x,p)$ – передатна функція скломаси з розподіленням по глибині скломаси, $T_{ск}(x,p)$ – вихідна температура скломаси для відповідного перерізу з розподіленням по глибині скломаси, $W_r(p)$ – передатна функція газу, $q_r(p)$ – тепловий потік газу.

Таким чином, отримана спрощена (зведена до одного блоку передатної функції ванни печі) структурна модель об'єкту керування, що необхідна для розрахунку загальної передатної функції скловарної печі.

$$W_{печи}(p,x) = \frac{W_{ск.шар}(p)(a_4 + b_4 W_{кл.дн}(p))W_{ск}(p,x_{шар})(1 - b_2 W_{кл}(p))(1 - a_1 W_{ск}(p))W_{ск}(p,x)W_c(p)}{((1 - b_2 W_{кл}(p))(1 - a_1 W_{ск}(p)) - b_1 a_2 W_{ск}(p)W_{кл}(p))W_{ск}(p)} \quad (2.13)$$

Подальші розрахунки будуть пов'язані з розрахунком складових передатної функції об'єкту керування. Використання передатних функцій пов'язано з тим, що даний інструмент представляє собою один із універсальних засобів дослідження об'єктів з розподіленими параметрами [37, 45, 62, 97]

2.4. Математичний опис скломаси

2.4.1. Математична модель процесу нагрівання скломаси

В основу побудови математичної моделі покладені взаємозв'язані рівняння внутрішнього та зовнішнього теплообміну [10, 95] в робочому просторі ванни печі, що є розв'язками системи рівнянь власного випромінювання за законом Стефана-Больцмана [94], горіння, теплообміну в робочому просторі та внутрішнього теплообміну. Система алгебраїчних рівнянь отримується з рівнянь балансу результуючих та ефективних поверхонь (кладка печі, поверхня дзеркала скломаси) та середовищ (газ, скломаса) та була розв'язана в параграфі 2.2. Для подальших досліджень необхідно визначити граничні умови процесу.

З іншого боку, ванна печі являє собою об'єкт з розподіленими параметрами, що описується диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є з граничними умовами 3-го роду на зовнішній поверхні скломаси при контакті «газ-скломаса», ідеального теплового контакту на внутрішній поверхні ванни при контакті «скломаса-кладка» (фактично граничними умовами 4-го роду) та 2-го роду на внутрішній для кладки [10, 98]. Граничні умови назовні обумовлені відсутністю обміну тепла з навколишнім середовищем, тобто розглядається умова ідеальної теплоізоляції.

Граничні умови ідеального теплового контакту на внутрішній поверхні ванни при контакті «скломаса-кладка» та граничні умови 3-го роду на зовнішній поверхні скломаси при контакті «газ-скломаса» [10]:

$$\begin{cases} T_{\text{ск}}|_{X=0} = T_{\text{кл}}|_{X=0}, \\ -\lambda_{\text{ск}} \frac{\partial T_{\text{ск}}}{\partial x} \Big|_{X=0} = -\lambda_{\text{кл}} \frac{\partial T_{\text{кл}}}{\partial x} \Big|_{X=0}. \end{cases} \quad (2.14)$$

$$-\lambda_{ск} \left. \frac{\partial T_{ск}}{\partial x} \right|_{X=0} = -\alpha_0 (T_{г} - T_{ск}|_{X=0}).$$

$T_{ск}$, $T_{кль}$, $T_{г}$ – температури скломаси, поверхні кладки та газу відповідно. $\lambda_{ск}$, $\lambda_{кль}$ – коефіцієнт теплопровідності скломаси та кладки. α_0 – коефіцієнт тепловіддачі (теплообміну) від теплоносія до стінки. Зрозуміло, що під теплоносієм розглядається газ [10].

Рівняння теплопровідності Фур'є в загальному вигляді має вигляд [10, 93, 95] :

$$\frac{\partial(\lambda \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} = C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.15)$$

де x , y , z – координати уздовж осей, направлених відповідно по глибині шару шихти, по ширині печі і в напрямку повздовжньої осі.

Проте розв'язання тривимірного рівняння (2.15) пов'язане з можливими похибками обрахунків [31]. В той же час без витрат точності розрахунку завдання можна спростити. Експериментальні дослідження показали [10, 31], що сальдо-потоки на скломасу з боку полум'яного простору не значним чином змінюються уздовж ширини печі. У першому наближенні можна вважати, що зміна сальдо-потоків по ширині печі не перевищує 10%, тобто теплоперенос в поперечному перетині печі малий. Це означає, що в лівій частині рівняння (2.15) другий член на порядок менше, ніж сума решти членів, і ним можна нехтувати [10, 31].

Якщо рухома координата z' , зв'язана з рушійною в напрямку осі шихтою; z – нерухома координата; V – швидкість руху шихти [59], тоді можна записати [10, 31] :

$$z = z' + V \cdot t \quad (2.16)$$

Враховуючи вище зазначене і (2.16) рівняння теплопровідності в рухомих координатах має вигляд [10, 31]:

$$\frac{\partial(\lambda \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} = C\rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Спростимо отриманий результат, вважаючи що λ – стала величина [10, 31, 95]

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = C\rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Відповідно температура T в шарі скломаси є функцією координат і часу [10]

$$T=f(x,y,z,t)=f(x,z(z',t),t)$$

Продиференціюємо функцію T по t

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial t},$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = V,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial z} V + \frac{\partial T}{\partial t}.$$

Внаслідок того, що процес плавлення шихти відбувається в квазістаціонарному режимі $\frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow 0$ [10, 31], таким чином

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial z} V.$$

Продиференціюємо функцію T по z'

$$\frac{\partial T}{\partial z'} = \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial z'},$$

$$\frac{\partial z}{\partial z'} = 1,$$

$$\frac{\partial T}{\partial z'} = \frac{\partial T}{\partial z}.$$

Впливає

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = C_p V \frac{\partial T}{\partial z}$$

Звідси, модель процесу нагрівання розплаву скломаси формується у вигляді двовимірного рівняння теплопровідності [10]

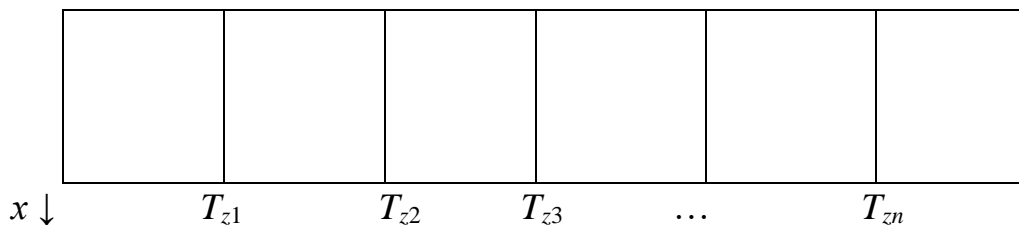
$$a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = V \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.17)$$

де a_x , a_z – коефіцієнти теплопровідності по відповідних осях x та z і дорівнює [10] :

$$a = \frac{\lambda}{C\rho}.$$

Розглянемо теплоперенос уздовж вісей x (глибина шару скломаси) і z (уздовж довжини печі) [10].

Поперечний переріз печі представляє собою прямокутну область, представлений рядом значень температур по ширині (глибині x) та довжині (ширина печі, координата y)



де $T_{z1}-T_{zn}$ – температура скломаси в z -му поперечному перерізі, n – кількість повздовжніх перерізів, x – координата по глибині скломаси.

Як зазначалось вище, опираючись на дослідження [10,31], що зміна температури скломаси по ширині печі не перевищує 10%, тобто теплоперенос в поперечному перерізі печі малий. З цього випливає низька різниця між $T_{z1}-T_{zn}$ в одному шарі скломаси, тобто по відношенню до зміни температури по глибині в поперечному перерізі ($T_{z1,x1} > T_{z1,xn}$) і по шарах ($T_{z1,x1}$, $T_{z2,x1}$... $T_{zn,x1}$) спостерігається однорідність температури, виходячи з даних експериментальних досліджень [10, 31, 36] .

[31] і рівняння (2.17) прийме вигляд

$$a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = V \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (2.18)$$

Таким чином рівняння (2.15) зведено до одновимірного і роль часу відіграє координата z [10].

Для подальших розрахунків вводимо параметр h , що визначає глибину шару скломаси, вимірюється від верхнього рівня до дна печі. Помилковим було дослідження не шару робочого матеріалу (скломаси, шихти), а глибини ванни, тому що під час руху скломаси в деяких ділянках значення h може змінюватись. Звідси можна зробити висновок, що h не є константою [10].

Розглянемо регулярний тепловий режим при нагріванні прямокутної області [10, 95] з граничними умовами 2-го роду при контактi «газ-скломаса».

$$q(h+l)dt = c_{ск} \rho_{ск} h l dT_{ск}, \quad (2.19)$$

де $c_{ск}$, $\rho_{ск}$, $T_{ск}$ – теплоємність скломаси, густина, середня температура в розглядуваній прямокутній області; l – значення координати по осі y , відображає розмірну величину для прямокутника (довжину), h – друга розмірна величина для прямокутника (ширина), q – тепловий потік [10, 31].

Отримаємо

$$\frac{dT_{ск}}{dt} = \frac{q(h+l)}{c_{ск} \rho_{ск} hl}$$

Швидкість нагрівання v може бути знайдена із диференціального рівняння балансу енергії (розмірності лівої та правої частини повністю співпадають) подібному (2.19)

$$qldt=c_{ck}\rho_{ck}hldT_{ck},$$

$$\frac{dT_{ck}}{dt} = \frac{ql}{c_{ck}\rho_{ck}lh} = \frac{q}{c_{ck}\rho_{ck}h} = \frac{qa}{\lambda h}, \text{ т.я. } a = \frac{\lambda}{c_{ck}\rho_{ck}}, \frac{1}{c_{ck}\rho_{ck}} = \frac{a}{\lambda}$$

$$v = \frac{dT_{ck}}{dt} = \frac{aq}{\lambda h}.$$

В регулярному режимі в довільний момент часу

$$T_{ck}=T_0+vt, \tag{2.20}$$

де T_0 – початкова температура.

Граничні умови контакту «газ-скломаса»

$$\begin{cases} -\lambda_{ck} \frac{\partial T_{ck}(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ -\lambda_{ck} \frac{\partial T_{ck}(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=h} = q. \end{cases} \tag{2.21}$$

Відповідно для координати у граничні умови писати немає сенсу, враховуючи (2.18).

При умові, що вхідна (початкова) температура скломаси $T_0=const$, в регулярному температурному режимі розв'язок рівняння теплопровідності (2.18) визначається у вигляді суми лінійної функції часу та квадратичної функції

координат. З врахуванням початкових та граничних умов (2.21) отримаємо температурну функцію для регулярного температурного режиму:

$$T(x, t) = vt + \frac{q}{\lambda} \frac{x^2}{h} + b, \quad (2.22)$$

де b – це деяка постійна, що потребує розрахунку.

Результат (2.22) може бути проінтегрований по площині S , що відповідає площині прямокутної ділянки скломаси [10]. Таким чином $T_{\text{ск}}$ може бути розраховано

$$\begin{aligned} T_{\text{ск}} &= \frac{1}{S} \iint_s \left(vt + \frac{q}{\lambda} \frac{x^2}{h} + b \right) ds = \frac{1}{S} \iint_s vtds + \frac{q}{\lambda S} \iint_s \frac{x^2}{h} ds + \frac{1}{S} \iint_s bds = \\ &= \frac{S}{S} vt + \frac{q}{\lambda S} \iint_s \frac{x^2}{h} ds + \frac{S}{S} b \end{aligned}$$

$$T_{\text{ск}} = vt + \frac{q}{\lambda S} \iint_s \frac{x^2}{h} ds + b, \quad (2.23)$$

де s – площа по якій ведеться інтегрування, S – її значення [10].

Розрахуємо значення b за (2.20) та (2.23)

$$b = T_0 - \frac{q}{\lambda S} \iint_s \frac{x^2}{h} ds, \quad (2.24)$$

В результаті розрахунку (2.24) і послідовно інтегруючи, при умові $S=hl$ (як площа прямокутної області), отримаємо

$$b = T_0 - \frac{q}{\lambda} \left(\frac{h}{3} + 1 \right) = T_0 - \frac{q(h+3)}{3\lambda}, \quad (2.25)$$

Підставляємо отримане значення b в (2.23)

$$T_{ск}(x,t) = vt + \frac{q}{\lambda S} \frac{x^2}{h} ds + T_0 - \frac{q(h+3)}{3\lambda}$$

Враховавши, що $V = aq/\lambda h$ і значення інтегрування під час отримання b , температури буде розраховуватися [10]

$$T_{ск}(x,t) - T_0 = \frac{aqt}{\lambda h} + \frac{qx^2}{\lambda h} - \frac{q(h+3)}{3\lambda}$$

або після спрощень

$$T_{ск}(x,t) - T_0 = \frac{qh}{\lambda} \left(\frac{at}{h^2} + \frac{x}{h^2} - \frac{h+3}{3 \cdot h} \right) \quad (2.26)$$

Виходячи з конструкційних особливостей скловарної печі, що розглянуті в п. 2.1, звернемося до вирішення одновимірної задачі теплопровідності для необмеженої пластини товщиною h , при нульових початкових умовах та граничних умов другого роду. Функція для температури нагрівання скломаси $T_{ск}(x,t)$, представляє собою розв'язок одновимірної задачі теплопровідності [10, 95], що на всій довжині нестационарного процесу приймає вигляд:

$$T_{ck}(x, t) - T_0 = \frac{qh}{\lambda_{ck}} \left(\frac{at}{h^2} - \frac{h+3}{3h} + 1 - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos\left(\frac{(2n-1)\pi x}{2h}\right) e^{-\left(\frac{(2n-1)\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{at}{h^2}\right)} \right), \quad (2.27)$$

де h – глибина шару скломаси, a – коефіцієнт температуропровідності, λ – коефіцієнт теплопровідності, T_0 – початкова температура скломаси, q – тепловий потік [10].

В результаті проведених досліджень отримана розрахункова формула для температурного поля скломаси, що представляє собою математичну модель з розподіленими параметрами (2.27). Необхідно провести експериментальні дослідження статичної імітаційної моделі та розглянути значення температури (температурного поля) в різних перерізах скловарної печі та дослідити адекватність отриманої моделі. Отримана функція для температури нагрівання скломаси буде використана при розрахунку передатної функції об'єкта керування за каналом керування.

2.4.2. Передатна функція за каналом «тепловий потік скломаси – вихідна температура скломаси»

Для розробленої в п. 2.3 структурної моделі об'єкту керування необхідно розрахувати складові блоків. В свою чергу блоки представлені передатними функціями за відповідними каналами.

В п. 2.2.1. була отримана математична модель з розподіленими параметрами [99-101] для скломаси скловарної печі, що залежить від часу нагрівання t та глибини шару x .

Фізико-хімічні параметри скломаси та кладки зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 Параметри скломаси та кладки.

		$a, \text{ м}^2/\text{год}$	$\lambda, \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c, \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$	$\delta, \text{ м}$
Скломаса	перехід від шихти до скломаси	$0,44 \cdot 10^{-5}$	21,19	1450	3300	0,53
	прозора маса	$0,45 \cdot 10^{-5}$	16,3	2250	1600	0,53
	не прозора маса	$0,11 \cdot 10^{-5}$	4,56	2500	1600	0,53
Кладка	шамот	$0,18 \cdot 10^{-5}$	2,09	2200	530	0,6
	динасова цегла	$0,11 \cdot 10^{-5}$	1,28	2200	530	0,6
Газ		$2,9 \cdot 10^{-5}$	0,0465	0,72	2200	–

Для розрахунку загальної передатної функції ванни печі необхідно розрахувати передатні функції складових ванни, до них відноситься скломаса, кладка та газовий простір. У свою чергу кладка бічних поверхонь та кладка дна відрізняються по принципу проходження теплового потоку – по глибині шару скломаси та повздовж одного шару.

Ділимо ліву і праву частини (2.28) на $q_{ск}$ – тепловий потік для скломаси, що являє собою керуючу дію для даної складової загальної моделі об'єкту керування.

$$\frac{T_{ск}(x,t) - T_0}{q_{ск}} = \frac{h}{\lambda_{ск}} \left(\frac{2h-3}{3h} + \frac{at}{h^2} - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos\left(\frac{(2n-1)\pi x}{2h}\right) e^{-\left(\frac{(2n-1)\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{at}{h^2}\right)} \right) \quad (2.28)$$

Розкриваємо дужки у (2.28)

$$\frac{T_{ck}(x,t) - T_0}{q_{ck}} = \frac{2h-3}{3\lambda_{ck}} + \frac{1}{\lambda_{ck}} \left(\frac{at}{h} - 4h \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos\left(\frac{(2n-1)\pi x}{2h}\right) e^{-\left(\frac{(2n-1)\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{at}{h^2}\right)} \right) \quad (2.29)$$

Другий доданок у (2.29) являє собою одномірну задачу теплопровідності для необмеженої пластини товщиною h [11, 95], при граничних умовах 2-го роду та відомих початкових умовах.

$$\frac{\partial T_{ck}(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_{ck}(x,t)}{\partial x^2}. \quad (2.30)$$

Початкові умови :

$$T_{ck}(x,t)|_{t=0} = T_0 = \text{const}.$$

При складних граничних умовах 2-го роду на границі ванни та обмежених розмірах скловарної печі неможливо пряме використання кінцевих інтегральних перетворень по координатах, що повинні мати граничні обмеження інтегрування на границі [11, 63]. Граничні умови :

$$\begin{cases} -\lambda_{ck} \frac{\partial T_{ck}(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ -\lambda_{ck} \frac{\partial T_{ck}(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=h} = q_{ck}(t). \end{cases} \quad (2.31)$$

Робимо перетворення за Лапласом для (2.30) та (2.31) :

$$pT_{ck}(x, p) = a \frac{\partial^2 T_{ck}(x, p)}{\partial x^2}. \quad (2.32)$$

$$\begin{cases} -\lambda_{ck} \frac{\partial T_{ck}(x, p)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ -\lambda_{ck} \frac{\partial T_{ck}(x, p)}{\partial x} \Big|_{x=h} = q_{ck}(p). \end{cases} \quad (2.33)$$

Перепишемо рівняння (2.32) у вигляді [11]:

$$\frac{\partial^2 T_{ck}(x, p)}{\partial x^2} - \frac{p}{a_x} T_{ck}(x, p) = 0. \quad (2.34)$$

Запишемо (2.34) у вигляді характеристичного рівняння :

$$r^2 - \frac{p}{a} = 0, \quad (2.35)$$

Корені характеристичного рівняння (2.35) : $r = \pm \sqrt{\frac{p}{a}}$, тоді розв'язок

однорідного лінійного диференціального рівняння (2.34), згідно з [11, 98], прийме вигляд:

$$T_{ck}(x, p) = C_1(p) e^{x\sqrt{\frac{p}{a}}} + C_2(p) e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} \quad (2.37)$$

Для знаходження $C_1(p)$ та $C_2(p)$ скористаємося граничними умовами (2.33) на поверхні скломаси при $x=0$ та при $x=h$ [11].

$$\begin{cases} C_1(p) + C_2(p) = 0, \\ C_1(p)e^{h\sqrt{\frac{p}{a}}} + C_2(p)e^{-h\sqrt{\frac{p}{a}}} = \frac{q_{ск}(p)}{\lambda_{ск}}. \end{cases} \quad (2.38)$$

Розв'язком системи (2.38) відповідно буде значення $C_1(p)$ та $C_2(p)$:

$$\begin{cases} C_1(p) = \frac{q_{ск}(p)}{\lambda_{ск} \left(e^{h\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-h\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)}, \\ C_2(p) = -\frac{q_{ск}(p)}{\lambda_{ск} \left(e^{h\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-h\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)}. \end{cases} \quad (2.39)$$

Рівняння (2.37) з врахуванням (2.39) [11]:

$$T_{ск}(x, p) = \frac{q_{ск}(p)}{\lambda_{ск} \left(e^{h\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-h\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)} e^{x\sqrt{\frac{p}{a}}} - \frac{q_{ск}(p)}{\lambda_{ск} \left(e^{h\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-h\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)} e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}},$$

або після зведення подібних

$$T_{ck}(x, p) = \frac{q_{ck}(p) \left(e^{x\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)}{\lambda_{ck} \left(e^{h\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-h\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)},$$

(2.40)

враховуючи, що $sh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$, рівняння (2.40) набудатиме вигляду [11]:

$$T_{ck}(x, p) = \frac{q_{ck}(p)}{\lambda_{ck}} \frac{sh\left(x\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{sh\left(h\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}. \quad (2.41)$$

Занесемо під корінь x та h :

$$T_{ck}(x, p) = \frac{q_{ck}(p)}{\lambda_{ck}} \frac{sh\left(\sqrt{x^2 \frac{p}{a}}\right)}{sh\left(\sqrt{h^2 \frac{p}{a}}\right)}.$$

Вводимо змінні $T_1(x)$ та T_2 , що являтимуть собою сталі часу [11]:

$$T_1(x) = \frac{x^2}{a_{ck}}, \quad T_2 = \frac{h^2}{a_{ck}}.$$

В результаті перетворень рівняння (2.40) [11]:

$$T_{ck}(x, p) = \frac{q_{ck}(p)}{\lambda_{ck}} \frac{\text{sh}(\sqrt{T_1(x)p})}{\text{sh}(\sqrt{T_2p})}.$$

Передатна функція другого доданку у (2.31), буде дорівнювати відношенню перетворення за Лапласом функції температурного поля скломаси до теплового потоку

$$W_{ck}(x, p) = \frac{T_{ck}(x, p)}{q_{ck}(p)} = k \frac{\text{sh}(\sqrt{T_1(x)p})}{\text{sh}(\sqrt{T_2p})}, \quad (2.42)$$

де $k = \frac{1}{\lambda_{ck}}$

Розглянемо перший доданок рівняння (2.29). Він являє собою константу при умові, що коефіцієнт теплопровідності λ є незмінним, а отже, в такому випадку :

$$k_1 = \frac{2 \cdot h - 3}{3\lambda_{ck}}.$$

Передатна функція скломаси, як елементу скловарної печі, буде сумою (2.42) та останнього виразу (з врахуванням (2.29))буде мати вигляд

$$W_{ck}(x, p) = k_1 + k \frac{\text{sh}(\sqrt{T_1(x)p})}{\text{sh}(\sqrt{T_2p})}. \quad (2.43)$$

Передатна функція описує температурне поле при нагріванні дзеркала скломаси або по глибині скломаси [11].

2.5. Математичний опис кладки та розрахунок передатної функції за каналом «тепловий потік кладки – температура кладки в характерних точках»

Розігрівання внутрішнього боку кладки відбувається під дією значних теплових потоків [34, 36]. Алгоритм розрахунку математичної моделі кладки скловарної печі та передатної функції за каналом тепловий потік – температура кладки аналогічний до попереднього параграфу – отримання передатної функції скломаси.

Кладка являє собою напівобмежене тіло [11, 36]. Математичний опис кладки представлено у вигляді одновимірної задачі теплопровідності, товщина шару δ , при граничних умовах 2-го роду. Напрямок руху теплового потоку кладки $q_{кл}(t)$ зображено на рис.2.5.

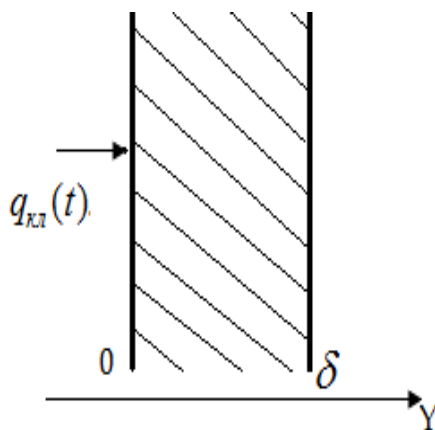


Рисунок 2.5 – Напрямок руху теплового потоку кладки $q_{кл}(t)$.

$$\frac{\partial T_{кл}(y,t)}{\partial t} = a_{кл} \frac{\partial^2 T_{кл}(y,t)}{\partial y^2}.$$

Граничні умови [11]:

$$\begin{cases} -\lambda_{\text{кл}} \frac{\partial T_{\text{кл}}(y,t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_{\text{кл}}(t), \\ -\lambda_{\text{кл}} \frac{\partial T_{\text{кл}}(y,t)}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = 0. \end{cases}$$

Тепловий потік кладки різний по висоті та залежить від відповідного шару скломаси [11]. Аналогічним чином, як і для скломаси

$$T_{\text{кл}}(y,p) = C_1(p)e^{y\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}} + C_2(p)e^{-y\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}} \quad (2.44)$$

Знаходимо $C_1(p)$ та $C_2(p)$ для кладки, розв'язуючи систему рівнянь :

$$\begin{cases} C_1(p) = \frac{q_{\text{кл}}(p)e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}}}{\lambda_{\text{кл}} \left(1 - e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}}\right)}, \\ C_2(p) = -\frac{q_{\text{кл}}(p)}{\lambda_{\text{кл}} \left(1 - e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}}\right)}. \end{cases} \quad (2.45)$$

Рівняння (2.44) з врахуванням (2.45):

$$T_{\text{кл}}(y,p) = \frac{q_{\text{кл}}(p)}{\lambda_{\text{кл}}} \left(\frac{e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}} e^{y\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}}}{\left(1 - e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}}\right)} - \frac{e^{-y\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}}}{\left(1 - e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{\text{кл}}}}}\right)} \right)$$

Після спрощень, аналогічно до розділу 2.2.2. отримаємо [11]:

$$T_{\text{кл}}(y, p) = \frac{q_{\text{кл}}(p)}{\lambda_{\text{кл}}} \frac{\text{sh}\left(\sqrt{\frac{(y-\delta)^2}{a_{\text{кл}}} p}\right)}{\text{sh}\left(\sqrt{\frac{\delta^2}{a_{\text{кл}}} p}\right)}.$$

Вводимо змінні T_3 та T_4 , що являтимуть собою сталі часу :

$$T_3 = \frac{(y-\delta)^2}{a_{\text{кл}}}, \quad T_4 = \frac{\delta^2}{a_{\text{кл}}}.$$

Рівняння для температури кладки прийме вигляд [11]:

$$T_{\text{кл}}(y, p) = q_{\text{кл}}(p) k_2 \frac{\text{sh}(\sqrt{T_3 p})}{\text{sh}(\sqrt{T_4 p})},$$

де $k_2 = \frac{1}{\lambda_{\text{кл}}}$

Передатна функція кладки за каналом «тепловий потік кладки – температура кладки в характерній точці», як елементу скловарної печі матиме вигляд

$$W_{\text{кл}}(p) = \frac{T_{\text{кл}}(p)}{q_{\text{кл}}(p)} = k_2 \frac{\text{sh}(\sqrt{T_3 p})}{\text{sh}(\sqrt{T_4 p})}. \quad (2.46)$$

Для побудови температурних полів в шарах скломаси та кладки (2.43) та (2.46) необхідно виконати зворотне перетворення за Лапласом. Однак при цьому виникає складність, що полягає в неможливості прямого перетворення для гіперболічної функції [95, 98, 100]. Для розв'язання даної задачі розкладемо чисельник та знаменник зазначених передатних функцій в ряд Фур'є. Розкладання гіперболічного синуса виконуємо за відомим співвідношенням [11, 98, 100]:

$$\operatorname{sh}x = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots + \frac{x^{2m-1}}{(2m-1)!} + \dots, \quad x \in h;$$

де h – глибина шару скломаси, x – поточне значення шару.

Таким чином, характеристики зміни температури скломаси в різних шарах та кладки у характерній точці по товщині виглядатимуть наступним чином

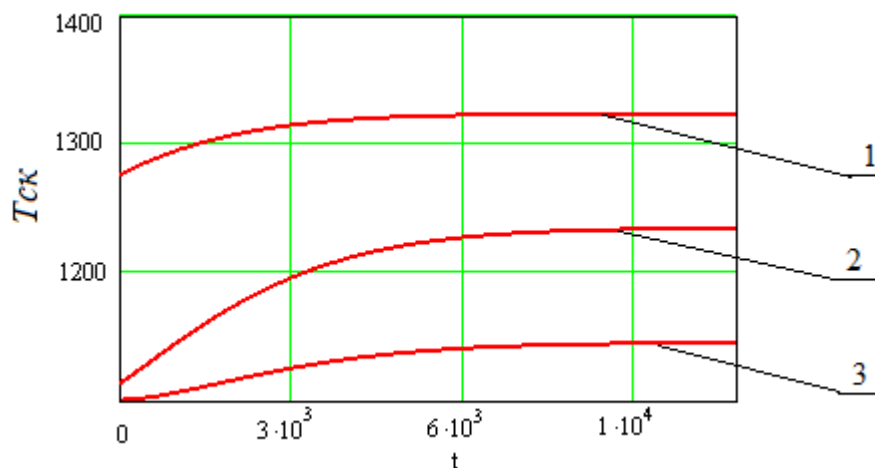


Рисунок 2.6 Характеристика зміни (прогрівання) температури скломаси в різних шарах (1 – 0,2м по глибині, 2 – 0,4м по глибині, 3 – 0,6м по глибині) та першому перерізі.

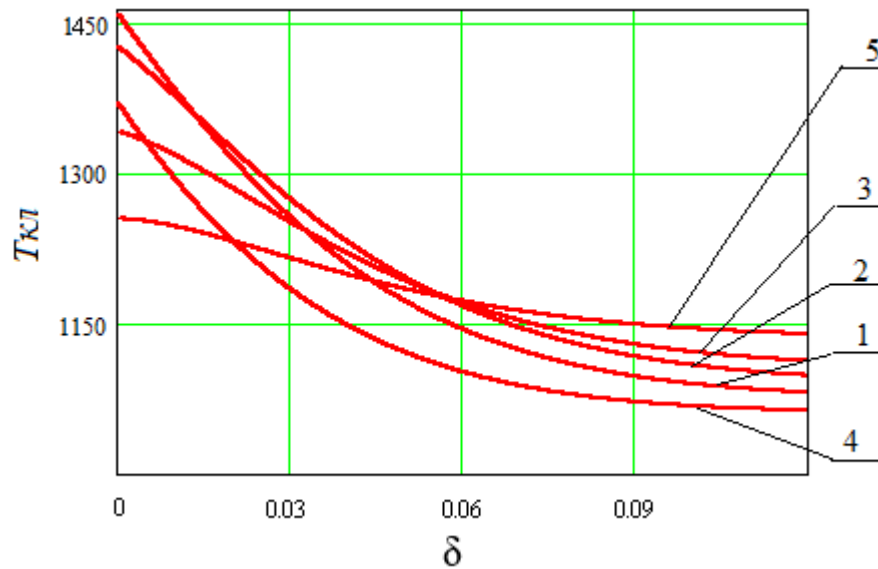


Рисунок 2.7 Характеристика зміни температури кладки (по товщині кладки δ) в другому перерізі та у відповідних шарах скломаси в точці контакту з кладкою (глибини скломаси по шарах 1 – 0,1м, 2 – 0,2м, 3 – 0,3м, 4 – 0,4м, 5 – 0,5м).

Представлено перші 0,1 м кладки, та різні зони по висоті шару скломаси (від поверхні до нижніх шарів), температура скломаси знижується з верхніх, до нижніх шарів. На рис. 2.8 представлено температури скломаси та кладки, під нулем розуміється поверхня скломаси, три графічні залежності відповідають за різні перерізи скломаси.

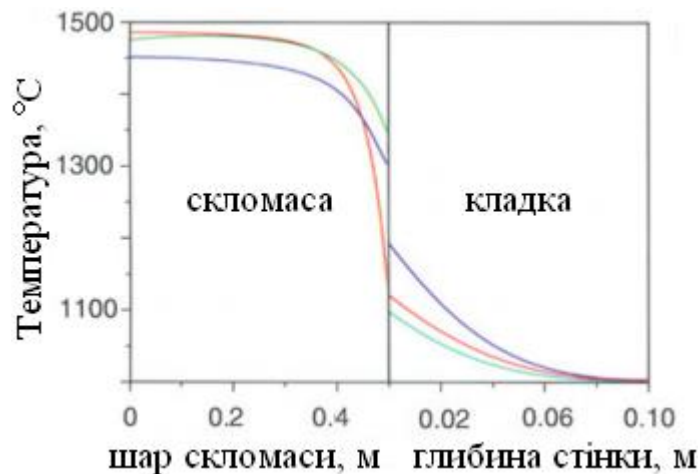


Рисунок 2.8 Температури скломаси та кладки

З отриманих залежностей випливає, що температура скломаси тим вища, чим вищий шар скломаси розглядається. По другому сімейству температурних кривих

видно, що верхня крива має більш високу швидкодію (швидше прогривається), т.я. безпосередньо контактує з більш високим значенням теплового потоку від скломаси дві інші криві відповідають іншим значенням теплового потоку та прогриваються повільніше. Початок кривих прогривання скломаси починається з верхнього шару, а кладки – починаються з її лівої поверхні.

2.6. Математична модель теплопередачі між скломасою та кладкою дна печі

В розділі 2.2.1 була розроблена модель теплового режиму скломаси, як частини об'єкту керування, в розділі 2.2.2 та 2.3 передатні функції скломаси, та кладки. Нараз ставиться задача отримання математичної моделі для скломаси та кладки у вигляді їх передатних функцій, за умови напряду передачі теплового потоку від скломаси до дна печі. Основною відмінністю від попереднього параграфу є те, що враховано товщину шару скломаси та вплив на теплопередачу між скломасою та кладкою дна печі.

На рис.2.9 розглядається скломаса та кладка дна в поперечному розрізі, представлені наступними параметрами: $\delta_{ск}$, $\delta_{кл}$ – товщина шару скломаси та кладки відповідно, x , x_1 – поточне значення глибини шару, a_0 – коефіцієнт теплообміну між газом та верхньою поверхнею скломаси, T_z – температура газового простору, h , h_1 – крок по координаті x та x_1 , m , m_1 – число шарів на яке розбивається скломаса та кладка [13].

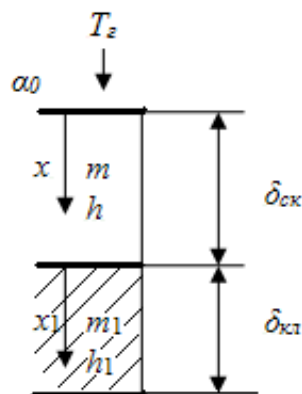


Рисунок 2.9 Шари скломаси та кладки дна, зображена в поперечному розрізі.

Записуємо рівняння теплопровідності [13, 95] для скломаси та кладки, а також граничні умови на поверхні контакту газу та скломаси, умови ідеального теплового контакту між скломасою та кладкою, ідеальної теплової ізоляції на нижній поверхні кладки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_{ск}}{\partial t} = a_{ск} \frac{\partial^2 T_{ск}}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq \delta_{ск}, \\ \frac{\partial T_{кл}}{\partial t} = a_{кл} \frac{\partial^2 T_{кл}}{\partial x_1^2}, \quad 0 \leq x_1 \leq \delta_{кл}, \\ -\lambda_{ск} \frac{\partial T_{ск}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 \left(T_z - T_{ск} \Big|_{x=0} \right), \\ -\lambda_{ск} \frac{\partial T_{ск}}{\partial x} \Big|_{x=\delta_{ск}} = -\lambda_{кл} \frac{\partial T_{кл}}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0}, \\ T_{ск} \Big|_{x=\delta_{ск}} = T_{кл} \Big|_{x_1=0}, \\ \frac{\partial T_{кл}}{\partial x_1} \Big|_{x_1=\delta_{кл}} = 0. \end{array} \right.$$

Переходимо до дискретної моделі [13, 100] для розрахунку крок по координаті x , що в свою чергу необхідно для розрахунку складових матриці коефіцієнтів системи

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(T_{ск})_{s,v+1} - (T_{ск})_{s,v}}{\tau} = a_{ск} \frac{(T_{ск})_{s-1,v} - 2(T_{ск})_{s,v} + (T_{ск})_{s+1,v}}{h^2}, \quad 1 \leq s \leq m-1, \\ \frac{(T_{кл})_{s,v+1} - (T_{кл})_{s,v}}{\tau} = a_{кл} \frac{(T_{кл})_{s-1,v} - 2(T_{кл})_{s,v} + (T_{кл})_{s+1,v}}{h^2}, \quad 1 \leq s \leq m_1-1, \\ -\frac{\lambda}{\alpha_0} \cdot \frac{(T_{ск})_{1,v+1} - (T_{ск})_{0,v+1}}{h} = (T_z)_{v+1} - (T_{ск})_{0,v+1}, \\ \lambda_{ск} \frac{(T_{ск})_{m,v+1} - (T_{ск})_{m-1,v+1}}{h} = \lambda_{кл} \frac{(T_{ск})_{1,v+1} - (T_{ск})_{0,v+1}}{h_1}; \\ (T_{ск})_{m,v+1} = (T_{кл})_{0,v+1}, \\ (T_{кл})_{m_1,v+1} = (T_{кл})_{m_1-1,v+1}. \end{array} \right. \quad (2.48)$$

Розв'яжемо рівняння системи (2.48) відносно температури в $(v+1)$ -ий момент часу [13]

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_{ck})_{s,v+1} = (T_{ck})_{s,v} + d \left((T_{ck})_{s-1,v} - 2(T_{ck})_{s,v} + (T_{ck})_{s+1,v} \right), \quad 1 \leq s \leq m-1, \\ (T_{kl})_{s,v+1} = (T_{kl})_{s,v} + d_1 \left((T_{kl})_{s-1,v} - 2(T_{kl})_{s,v} + (T_{kl})_{s+1,v} \right), \quad 1 \leq s \leq m_1-1, \\ \left(1 + \frac{\lambda_{ck}}{\alpha_0 h} \right) (T_{ck})_{0,v+1} = (T_z)_{v+1} + \frac{\lambda_{ck}}{\alpha_0 h} (T_{ck})_{1,v+1}, \\ \left(\frac{\lambda_{ck}}{h} + \frac{\lambda_{kl}}{h_1} \right) (T_{ck})_{m,v+1} = \frac{\lambda_{kl}}{h_1} (T_{kl})_{1,v+1} + \frac{\lambda_{ck}}{h} (T_{ck})_{m-1,v+1}, \\ (T_{ck})_{m,v+1} = (T_{kl})_{0,v+1}, \\ (T_{kl})_{m_1,v+1} = (T_{kl})_{m_1-1,v+1}. \end{array} \right. \quad (2.49)$$

Значення q та q_1 визначаються формулами [13]:

$$d = \frac{a_{ck} \cdot \tau}{h^2}; \quad (2.50)$$

$$d_1 = \frac{a_{kl} \cdot \tau}{h_1^2}. \quad (2.51)$$

Крок розрахунку для часу τ має бути спільним для скломаси та кладки [13], а $d=d_1=1/6$

$$\frac{dh^2}{a_{ck}} = \frac{dh_1^2}{a_{kl}}, \text{ звідки } \frac{h^2}{a_{ck}} = \frac{h_1^2}{a_{kl}}$$

$$h_1 = h \sqrt{\frac{a_{\kappa\lambda}}{a_{\text{CK}}}} \quad (2.52)$$

А параметр m_1 (число шарів на яке розбивається скломаса) обраховується $m_1 = \text{round}(\delta_{\kappa\lambda}/h_1)$

Виходячи з (2.50)-(2.52) система (2.49) набуває вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_{\text{CK}})_{s,v+1} = (T_{\text{CK}})_{s,v} + d \left((T_{\text{CK}})_{s-1,v} - 2(T_{\text{CK}})_{s,v} + (T_{\text{CK}})_{s+1,v} \right), \quad 1 \leq s \leq m-1, \\ (T_{\kappa\lambda})_{s,v+1} = (T_{\kappa\lambda})_{s,v} + d_1 \left((T_{\kappa\lambda})_{s-1,v} - 2(T_{\kappa\lambda})_{s,v} + (T_{\kappa\lambda})_{s+1,v} \right), \quad 1 \leq s \leq m_1-1, \\ (T_{\text{CK}})_{0,v+1} = b_0 (T_{\text{CK}})_{1,v+1} + b_1 \cdot (T_z)_{v+1}, \\ (T_{\text{CK}})_{m,v+1} = b_2 (T_{\text{CK}})_{m-1,v+1} + b_3 \cdot (T_{\kappa\lambda})_{1,v+1}, \\ (T_{\kappa\lambda})_{0,v+1} = (T_{\text{CK}})_{m,v+1}, \\ (T_{\kappa\lambda})_{m_1,v+1} = (T_{\kappa\lambda})_{m_1-1,v+1}, \end{array} \right. \quad (2.53)$$

$$\text{де } b_0 = \frac{\lambda_{\text{CK}}}{\lambda_{\text{CK}} + \alpha_0 h}, \quad b_1 = 1 - b_0, \quad b_2 = \frac{\lambda_{\kappa\lambda}}{\lambda_{\kappa\lambda} + \lambda_{\text{CK}} \frac{h_1}{h}}, \quad b_3 = 1 - b_2$$

Виконуємо перетворення за Лапласом для системи [13]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2(\overline{T}_{ск})}{dx^2} - \frac{p}{a_{ск}}(\overline{T}_{ск}) = 0, \\ \frac{d^2(\overline{T}_{кл})}{dx_1^2} - \frac{p}{a_{кл}}(\overline{T}_{кл}) = 0, \\ -\lambda_{ск} \cdot \frac{d(\overline{T}_{ск})}{dx} \Big|_{x=\delta_{ск}} = -\lambda_{кл} \cdot \frac{d(\overline{T}_{кл})}{dx_1} \Big|_{x_1=0}, \\ (\overline{T}_{ск}) \Big|_{x=\delta_{ск}} = (\overline{T}_{кл}) \Big|_{x_1=0}, \\ -\frac{\lambda_{ск}}{\alpha_0} \cdot \frac{d(\overline{T}_{ск})}{dx} \Big|_{x=0} = (\overline{T}_{\rho}) - (\overline{T}_{ск}) \Big|_{x=0}, \\ \frac{d(\overline{T}_{кл})}{dx_1} \Big|_{x_1=\delta_{кл}} = 0. \end{array} \right.$$

Характеристичні рівняння [13, 98] для першого та другого рівняння системи, будуть мати вигляд:

$$r^2 - \frac{p}{a_{ск}} = 0 \text{ та } U^2 - \frac{p}{a_{кл}} = 0$$

корені яких відповідно

$$r_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}, U_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}$$

Розв'язок вищезгаданих рівнянь матиме вигляд

$$\left(\overline{T}_{СК}\right) = C_1 e^{x \sqrt{\frac{p}{a_{СК}}}} + C_2 e^{-x \sqrt{\frac{p}{a_{СК}}}} \quad (2.54)$$

$$\left(\overline{T}_{КЛ}\right) = C_3 e^{x_1 \sqrt{\frac{p}{a_{КЛ}}}} + C_4 e^{-x_1 \sqrt{\frac{p}{a_{КЛ}}}}. \quad (2.55)$$

Підставляємо розв'язки $\left(\overline{T}_{СК}\right)$ та $\left(\overline{T}_{КЛ}\right)$ в граничні умови [13]

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\lambda_{СК}}{\alpha_0} \cdot \sqrt{\frac{p}{a_{СК}}} (C_1 - C_2) = \left(\overline{T}_2\right) - C_1 - C_2, \\ \left(C_1 e^{\delta_{СК} \sqrt{\frac{p}{a_{СК}}}} - C_2 e^{-\delta_{СК} \sqrt{\frac{p}{a_{СК}}}} \right) = b_5 (C_3 - C_4), \\ C_1 e^{\delta_{СК} \sqrt{\frac{p}{a_{СК}}}} + C_2 e^{-\delta_{СК} \sqrt{\frac{p}{a_{СК}}}} = C_3 + C_4, \\ C_3 e^{\delta_{КЛ} \sqrt{\frac{p}{a_{КЛ}}}} - C_4 e^{-\delta_{КЛ} \sqrt{\frac{p}{a_{КЛ}}}} = 0. \end{array} \right.$$

$$\text{де } b_5 = \frac{\lambda_{КЛ}}{\lambda_{СК}} \sqrt{\frac{a_{СК}}{a_{КЛ}}}.$$

Перегрупуємо доданки

$$\begin{cases} C_1 \left(1 - \frac{\lambda_{ck}}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}} \right) + C_2 \left(1 + \frac{\lambda_{ck}}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}} \right) + 0 \cdot C_3 + 0 \cdot C_4 = (\bar{T}_z), \\ C_1 e^{\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}} - C_2 e^{-\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}} - b_5 C_3 + b_5 C_4 = 0, \\ C_1 e^{\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}} + C_2 e^{-\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}} - C_3 - C_4 = 0, \\ C_1 \cdot 0 + C_2 \cdot 0 + C_3 e^{\delta_{кл} \sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} - C_4 e^{-\delta_{кл} \sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} = 0. \end{cases}$$

Матриця коефіцієнтів системи [13]

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 - \frac{\lambda_{ck}}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}; & 1 + \frac{\lambda_{ck}}{\alpha_0} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}; & 0; & 0 \\ e^{\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}}; & -e^{-\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}}; & -b_5; & b_5 \\ e^{\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}}; & e^{-\delta_{ck} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}}; & -1; & 1 \\ 0; & 0; & e^{\delta_{кл} \sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}}; & -e^{-\delta_{кл} \sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} \end{vmatrix}$$

За правилом Крамера значення C будуть розраховуватися [13]

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \\ C_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \\ C_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \\ C_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta}. \end{cases}$$

де $\Delta_z (1 \leq z \leq 4)$ отримується з Δ шляхом заміни z -го стовпчику стовпчиком

$$\begin{vmatrix} T_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Розкриваємо Δ_z за елементами z -го стовпця

$$\begin{cases} C_1 = \overline{T}_z \cdot \frac{D_1(p)}{\Delta}; \\ C_2 = -\overline{T}_z \cdot \frac{D_2(p)}{\Delta}; \\ C_3 = \overline{T}_z \cdot \frac{D_3(p)}{\Delta}; \\ C_4 = -\overline{T}_z \cdot \frac{D_4(p)}{\Delta}. \end{cases}$$

де

$$D_1(p) = \begin{vmatrix} -e & -\delta_{СК} \sqrt{\frac{P}{a_{СК}}} & \\ & -b_5 & b_5 \\ e & -\delta_{СК} \sqrt{\frac{P}{a_{СК}}} & -1 & -1 \\ & 0 & \delta_{КЛ} \sqrt{\frac{P}{a_{КЛ}}} & -\delta_{КЛ} \sqrt{\frac{P}{a_{КЛ}}} \end{vmatrix}, \quad D_2(p) = \begin{vmatrix} e & \delta_{СК} \sqrt{\frac{P}{a_{СК}}} & \\ & -b_5 & b_5 \\ e & \delta_{СК} \sqrt{\frac{P}{a_{СК}}} & -1 & -1 \\ & 0 & \delta_{КЛ} \sqrt{\frac{P}{a_{КЛ}}} & -\delta_{КЛ} \sqrt{\frac{P}{a_{КЛ}}} \end{vmatrix},$$

$$D_3(p) = \begin{vmatrix} e^{\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & -e^{-\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & b_5 \\ e^{\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & -e^{-\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & -1 \\ 0 & 0 & -e^{-\delta_{кл}\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} \end{vmatrix}, \quad D_4(p) = \begin{vmatrix} -e^{-\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & -e^{-\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & -b_5 \\ -e^{-\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & -e^{-\delta_{ск}\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} & -1 \\ 0 & 0 & e^{\delta_{кл}\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} \end{vmatrix}.$$

Рівняння (2.54) та (2.55) набудуть вигляду [13]

$$(\overline{T}_{ск}) = \frac{\Delta_1}{\Delta} e^{x\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} + \frac{\Delta_2}{\Delta} e^{-x\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}},$$

$$(\overline{T}_{кл}) = \frac{\Delta_3}{\Delta} e^{x_1\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} + \frac{\Delta_4}{\Delta} e^{-x_1\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}}.$$

З врахуванням

$$(\overline{T}_{ск}) = \frac{\overline{T}_2}{\Delta} \cdot \left[D_1(p) \cdot e^{x\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} - D_2(p) \cdot e^{-x\sqrt{\frac{p}{a_{ск}}}} \right] \quad (2.56)$$

$$(\overline{T}_{кл}) = \frac{\overline{T}_2}{\Delta} \cdot \left[D_3(p) \cdot e^{x_1\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} - D_4(p) \cdot e^{-x_1\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} \right] \quad (2.57)$$

Передатні функції [98] для (2.56) та (2.57) матимуть вигляд

$$W_{T_z \rightarrow T_{ck}(x)}(p, x) = \frac{D_1(p) \cdot e^{x \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}} - D_2(p) \cdot e^{-x \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}}}{\Delta}$$

$$W_{T_z \rightarrow T_{ck}(x)} \Big|_{x=x_{out}}(p) = \frac{D_1(p) \cdot e^{x_{out} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}} - D_2(p) \cdot e^{-x_{out} \sqrt{\frac{p}{a_{ck}}}}}{\Delta}$$

$$W_{T_z \rightarrow T_{kl}(x)}(p, x) = \frac{D_3(p) \cdot e^{x_1 \sqrt{\frac{p}{a_{kl}}} - D_4(p) \cdot e^{-x_1 \sqrt{\frac{p}{a_{kl}}}}}{\Delta}$$

Для задачі структурного моделювання можна записати в наступному вигляді [13]:

$$\left(\overline{T}_{ck}\right) = \overline{T}_z \cdot W_{T_z \rightarrow T_{ck}(x)}(p, x) \text{ та } \left(\overline{T}_{kl}\right) = \overline{T}_z \cdot W_{T_z \rightarrow T_{kl}(x)}(p, x)$$

або

$$W_{T_z \rightarrow T_{ck}(x)}(p, x) = \frac{\left(\overline{T}_{ck}\right)}{\overline{T}_z},$$

$$W_{T_z \rightarrow T_{ck}(x)} \Big|_{x=x_{out}}(p) = \frac{\left(\overline{T}_{ck}\right)}{\overline{T}_z},$$

$$W_{T_z \rightarrow T_{kl}(x)}(p, x) = \frac{\left(\overline{T}_{kl}\right)}{\overline{T}_z}.$$

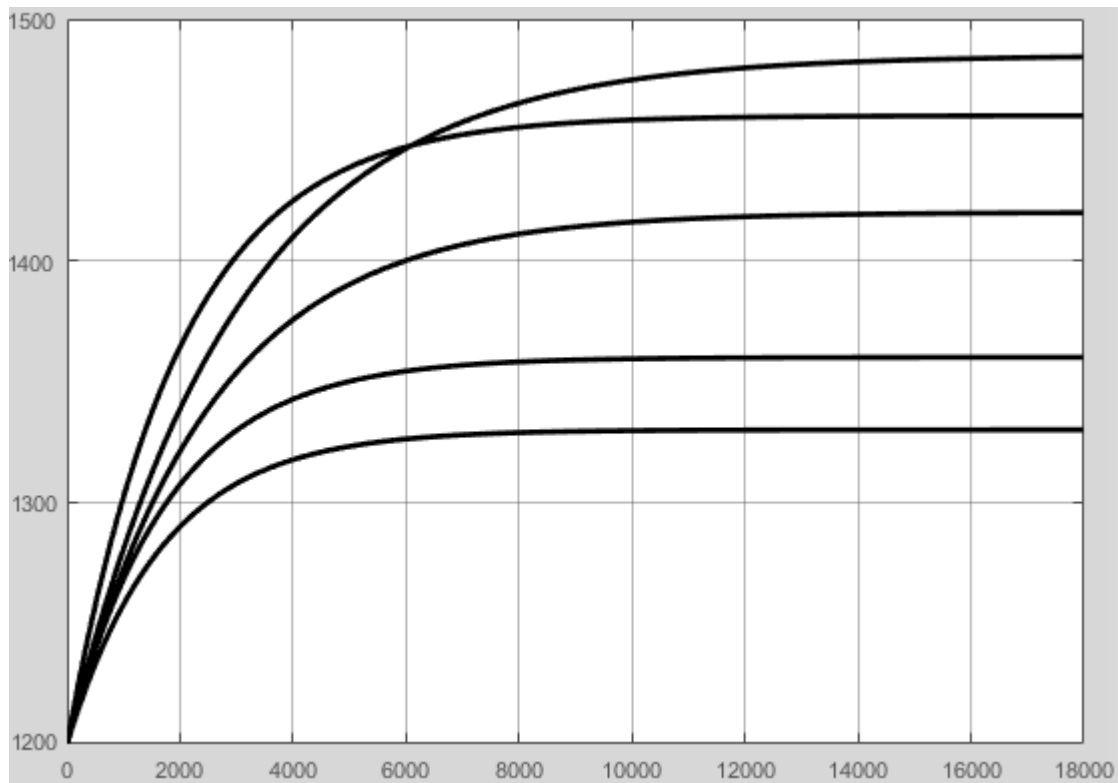


Рисунок 2.10 Приклад кривих зміни температури скломаси при зміні X_{out} від 0.1 (верхня крива) до 0.5 (нижня крива) в другому перерізі.

На рис. 2.10 представлено приклад процесу прогрівання скломаси по глибині у конкретному перерізі скломаси. Чим вищий шар скломаси, тим прогрівання скломаси іде швидше (краща швидкодія процесу нагрівання скломаси).

Особливістю розробленої моделі по відношенню до попередніх розробок є те, що врахована окремо теплопередача між скломасою та кладкою дна, на відміну від попередніх досліджень, де враховувалась кладка бічних стінок печі.

2.7. Висновки до розділу 2

1. Розроблена математична модель зовнішнього теплообміну на основі рівнянь ефективного випромінювання скломаси та кладки, що враховує окрім власного, відбиваючого та результуючого випромінення тепловий потік для скломаси та кладки, що забезпечить дослідження температурних полів скловарної печі
2. Розроблена математична модель динаміки нагрівання скломаси в варильній зоні печі, що описується тривимірним рівнянням теплопровідності та враховує початкові, граничні умови, всі конструкційні особливості об'єкта.
3. Дослідження процесу нагрівання скломаси показало, що прогрівання в певній точці по глибині шару скломаси, можливе лише до певного значення температури, яке у свою чергу, менше ніж максимальне значення температури прогрівання в точці вище по координаті.
4. За результатами моделювання для балансу результуючого та ефективного випромінення поверхонь скломаси, кладки, газового простору та системи рівнянь теплових потоків, розроблена загальна структурна модель скловарної печі, в якій було враховано всі взаємозв'язки між складовими в об'єкті керування.
5. Виведено передатні функції за каналами «тепловий потік скломаси – вихідна температура скломаси» та «тепловий потік кладки – температура кладки в характерних точках»
6. Врахування в загальній моделі скловарної печі окремо кладки бокових стінок, а окремо кладки дна дало можливість більш досконально дослідити процес теплообміну між скломасою та кладкою. Результати даного дослідження будуть використані при синтезі системи керування тепловим режимом скловарної печі.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

3.1. Дослідження адекватності математичної моделі процесу нагрівання скломаси

Для проведення подальших досліджень системи керування процесу виготовлення скломаси з використання математичної моделі скловарної печі можливе при умові адекватності моделі реальному об'єкту в усіх режимах роботи, що досліджуються. В розділі 2 була розроблена математична модель об'єкту керування, що складається з моделі скломаси (динаміки процесу нагрівання скломаси), кладки та газового простору. Перевірку адекватності виконаємо, виходячи з даних виробництва, що отримані за показами термопар різних рівнів. Всі дані з термопар отримувалися за допомогою *SCADA*-систем та зберігалися на ПК у відповідних базах даних. Внаслідок високої собівартості продукту горіння (природного газу) практично не можливо робити активні дослідження на реальному об'єкті [2, 3], тому використовують лише данні вимірів (показів термопар), що отримані з виробництва.

Для дослідження адекватності математичної моделі, що розглядається, необхідно враховувати, що скловаріння є нелінійним процесом, підданим впливу зовнішніх керованих та некерованих збурень. При виборі критерію адекватності математичної моделі доцільно використати статистичний підхід, для прийняття гіпотези адекватності математичної моделі об'єкту керування максимальне відхилення розрахункової величини від експериментальної не повинно перевищувати 5% [14, 103, 104].

Експериментальні (реальні) дані, як було зазначено вище, отримуються з роботи *SCADA*-системи, зображення якої приведено на рис. 3.1

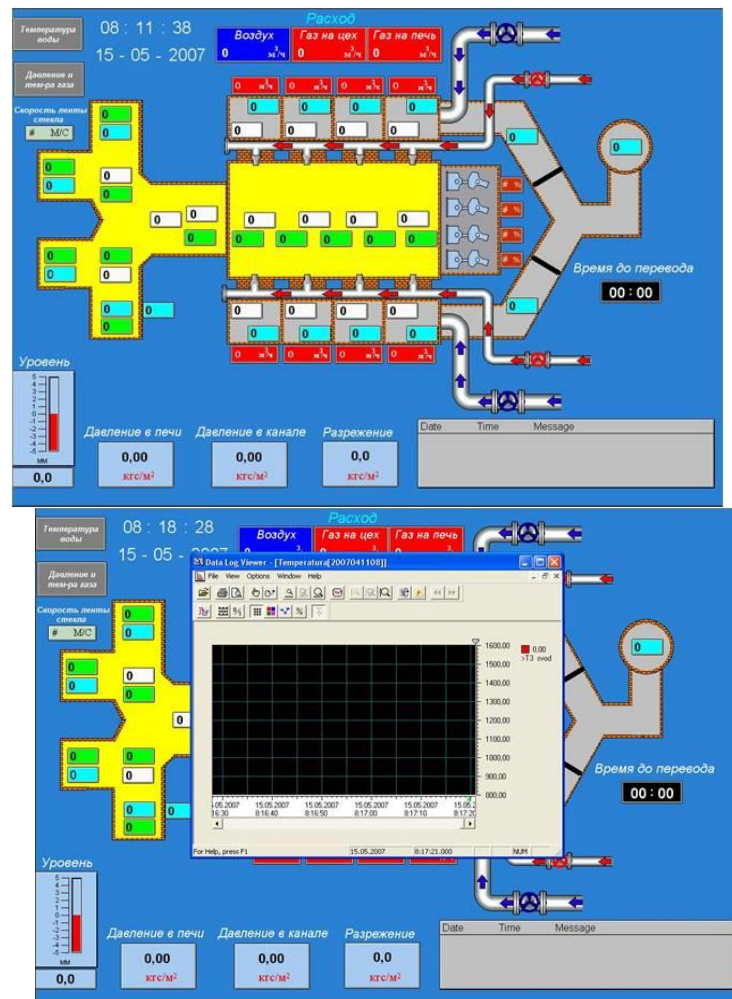


Рисунок 3.1 Зображення монітору оператора SCADA-системи керування роботою скловарної печі

До зон (точок) виміру температури відносяться : склепіння ($T_{\text{скл1}}$, $T_{\text{скл2}}$), дно ($T_{\text{дно1}}$, $T_{\text{дно2}}$), пірометр ($T_{\text{пір}}$), насадка ($T_{\text{нас.п}}$, $T_{\text{нас.л}}$) [72, 78]. Запис в базу даних відбувається кожні 4 години. Також в базі присутні показники витрати пального на кожен добу [14].

Тип (марка) скла, для якого наводяться дані, носить назву *Flint* – безколірне скло з малим коефіцієнтом переломлення.

Таблиця 3.1 Показники термопар згідно зазначених зон

Час заміру	Температура склепіння, °C		Покази пірометра	Температура дна, °C	Температура насадок, °C	
	Ліва	Права			Ліва	Права
6.00	1367	1348	1495	1216	1225	1212
10.00	1390	1351	1449	1217	1228	1214
14.00	1368	1352	1498	1220	1227	1221

18.00	1372	1355	1501	1223	1236	1222
22.00	1375	1358	1506	1229	1231	1221
2.00	1375	1358	1503	1232	1248	1218
6.00	1377	1362	1511	1234	1253	1215
10.00	1379	1362	1508	1234	1240	1228
14.00	1376	1362	1493	1218	1253	1219
18.00	1377	1364	1510	1204	1244	1232
22.00	1379	1365	1509	1201	1250	1230
2.00	1380	1367	1509	1196	1257	1231
6.00	1381	1368	1515	1195	1264	1228
10.00	1384	1371	1521	1195	1252	1242
14.00	1385	1373	1518	1194	1254	1244
18.00	1384	1372	1517	1195	1267	1242
22.00	1387	1373	1518	1194	1259	1247
2.00	1384	1373	1514	1194	1266	1244
6.00	1387	1373	1519	1192	1259	1251
10.00	1383	1372	1514	1193	1270	1243
14.00	1378	1369	1512	1188	1268	1241
18.00	1380	1369	1510	1187	1255	1250
22.00	1378	1367	1511	1186	1256	1248
2.00	1375	1365	1506	1183	1265	1239
6.00	1377	1366	1510	1183	1256	1247
10.00	1377	1367	1513	1180	1266	1247
14.00	1377	1367	1509	1179	1268	1250
18.00	1377	1367	1509	1178	1269	1239
22.00	1377	1368	1508	1179	1261	1246
2.00	1377	1369	1510	1181	1257	1249
6.00	1377	1368	1511	1182	1259	1247

10.00	1377	1369	1514	1182	1235	1264
14.00	1380	1371	1513	1181	1235	1270
18.00	1380	1373	1517	1183	1235	1256
22.00	1380	1373	1513	1185	1237	1271
2.00	1380	1374	1517	1185	1237	1257
6.00	1380	1374	1512	1187	1241	1264
10.00	1382	1377	1520	1187	1239	1268
14.00	1380	1377	1519	1184	1238	1259
18.00	1381	1378	1521	1183	1236	1273
22.00	1380	1378	1520	1184	1237	1258
2.00	1380	1378	1523	1185	1238	1274

За табличними даними були побудовані графічні залежності по 42 точкам. 7 днів зняття показів по 6 вимірів за добу (кожні чотири години). За моделлю були отримані результати, що відповідають експериментальним точкам виміру температури [14].

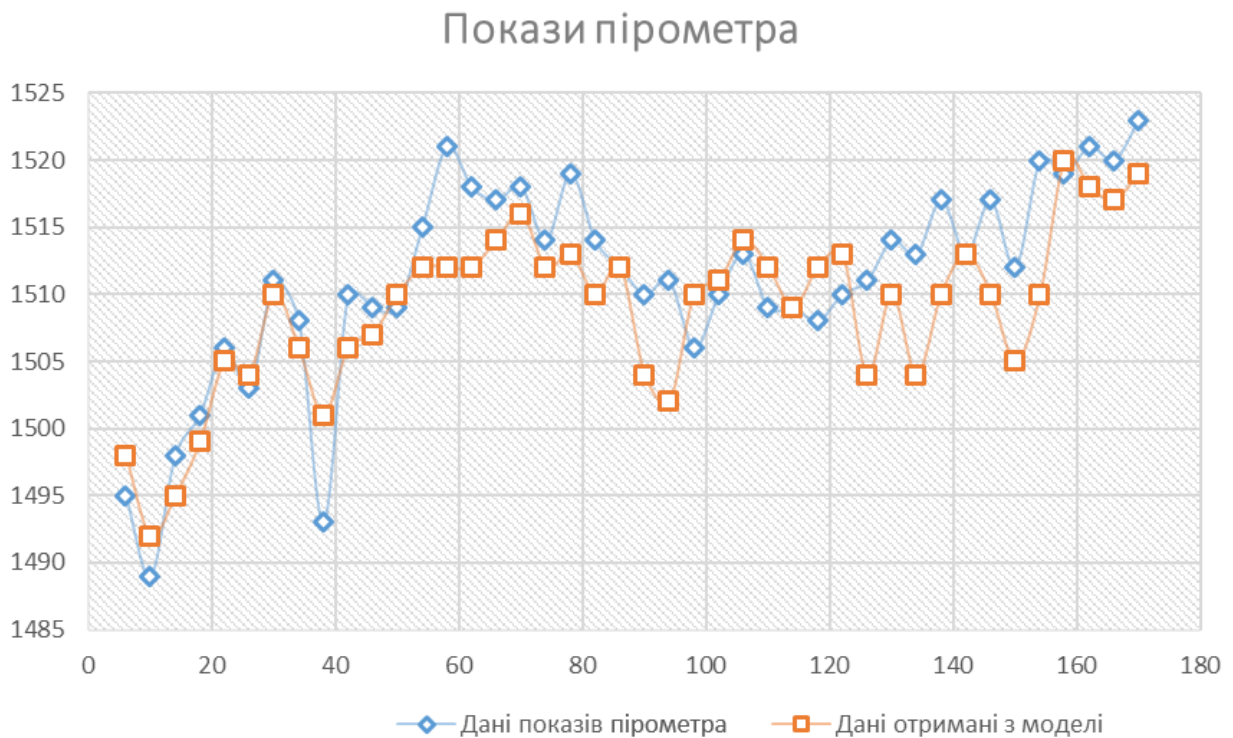


Рисунок 3.2 Значення температури у точці «Покази пірометра»

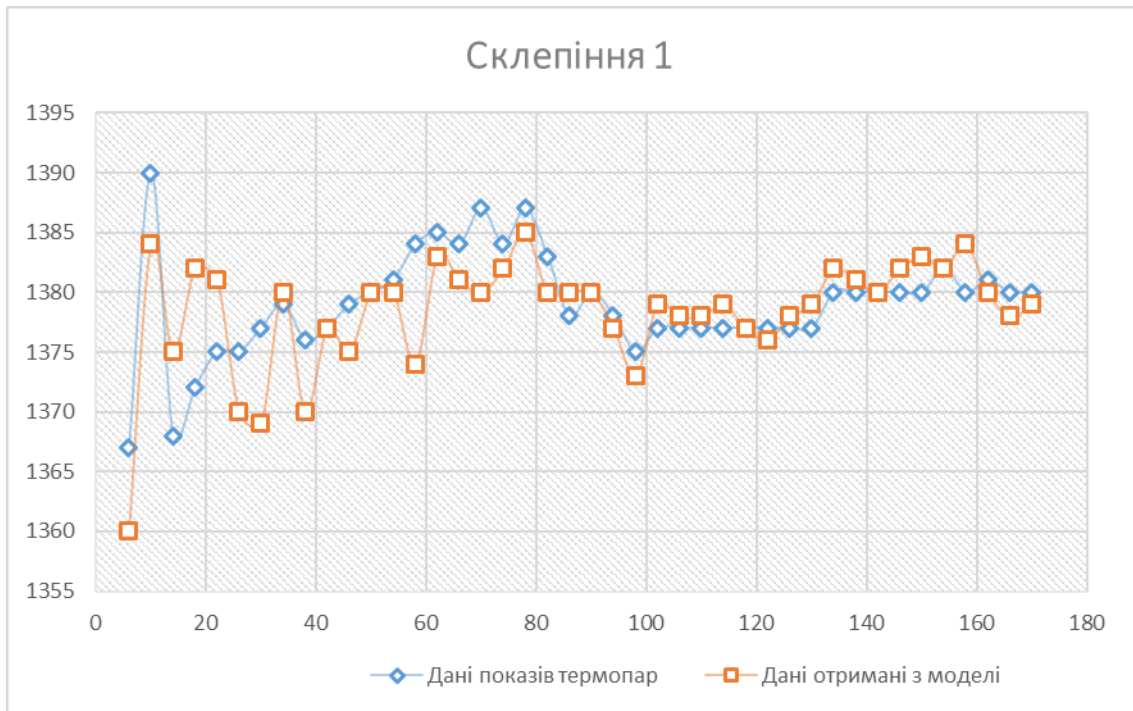


Рисунок 3.3 Значення температури у точці «Склепіння 1»

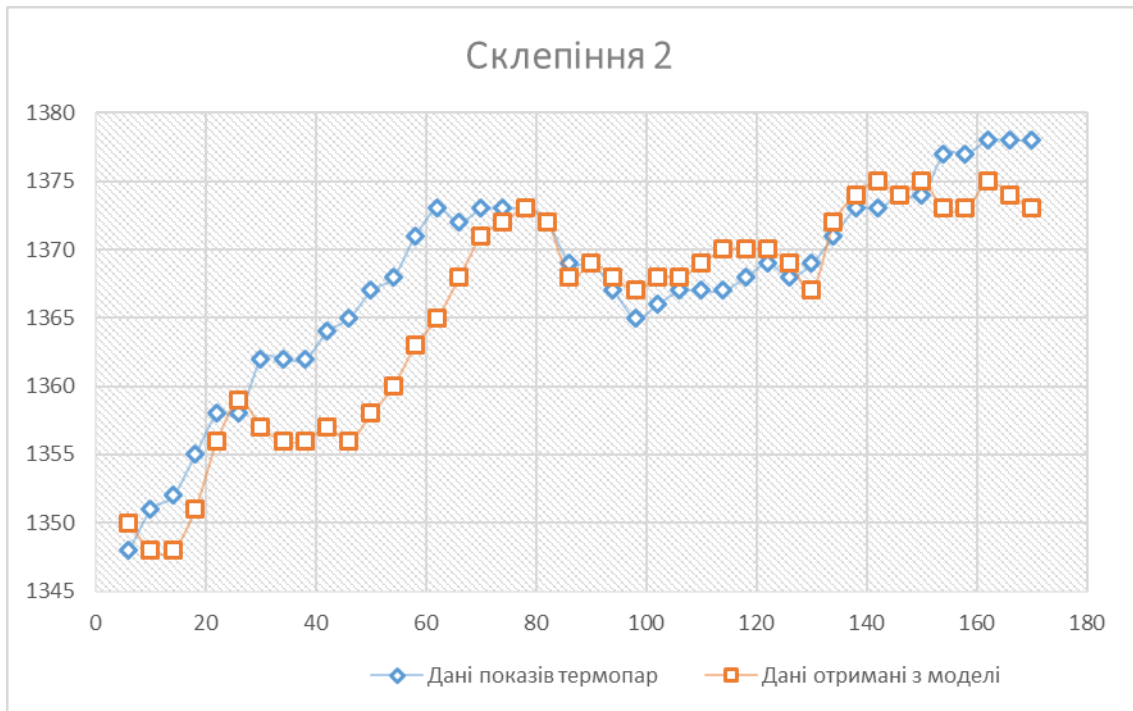


Рисунок 3.4 Значення температури у точці «Склепіння 2»

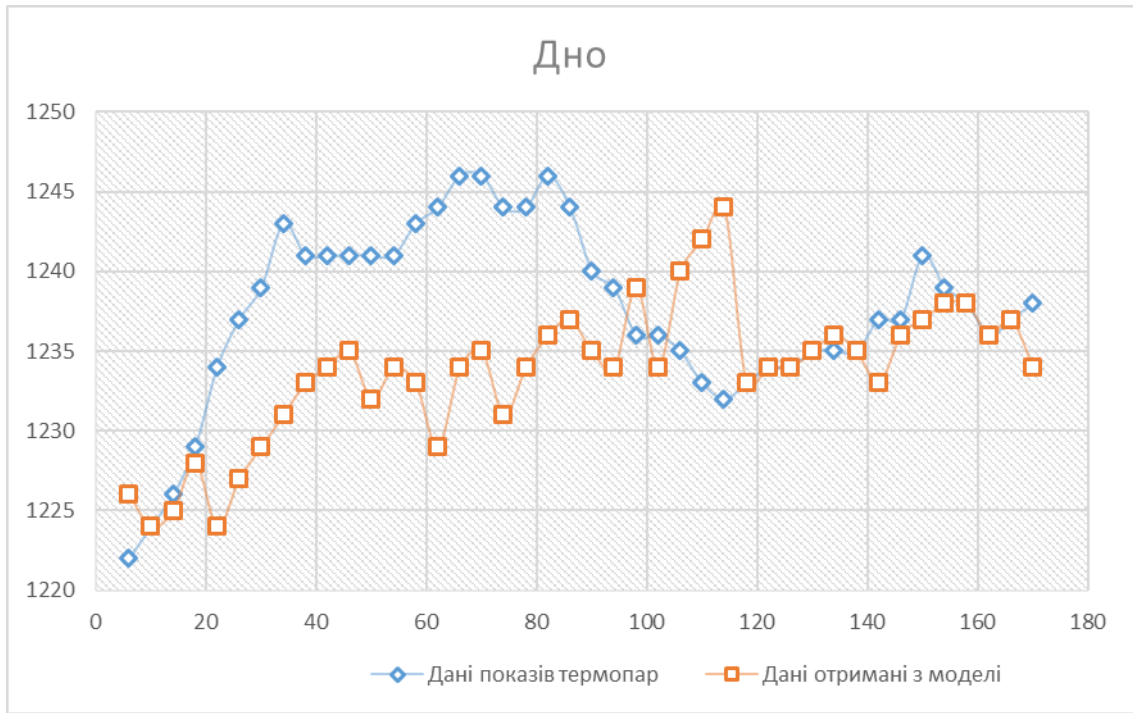


Рисунок 3.5 Значення температури у точці «Дно»

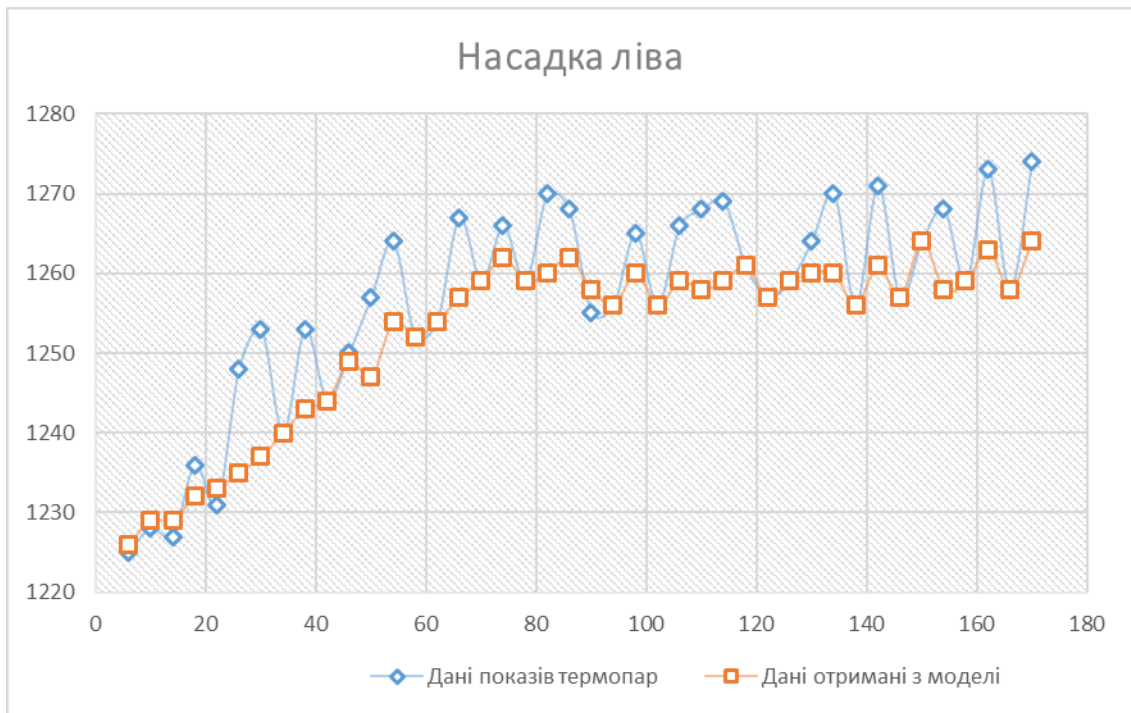


Рисунок 3.6 Значення температури у точці «Насадка ліва»

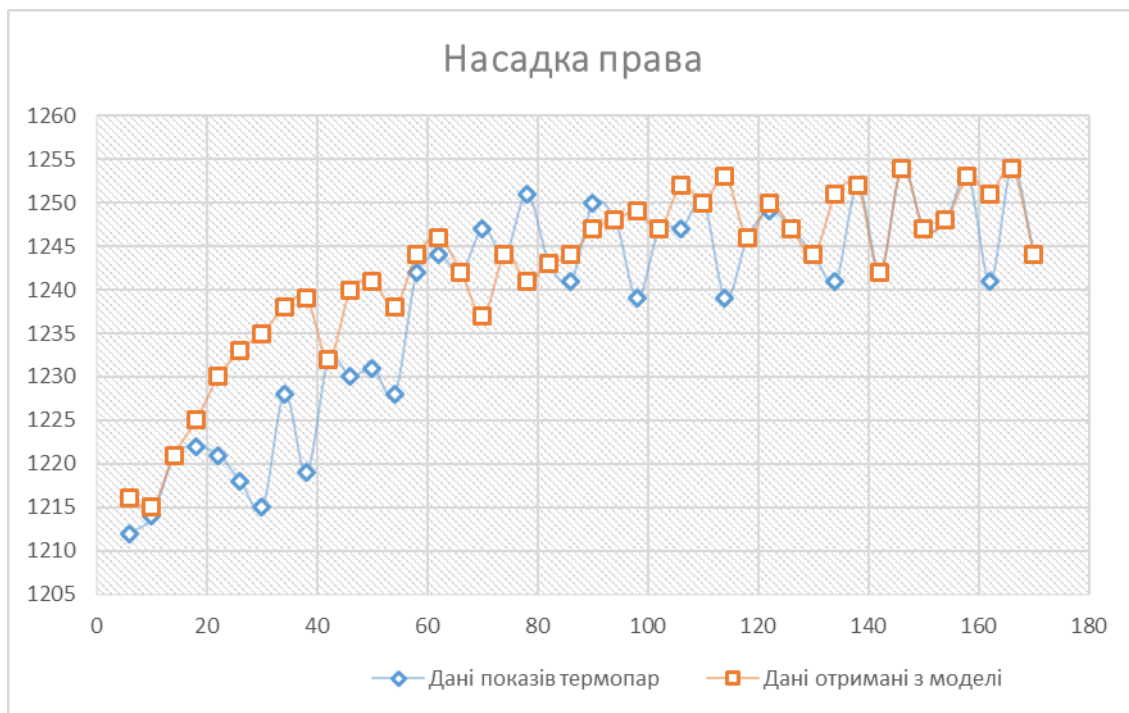


Рисунок 3.7 Значення температури у точці «Насадка права»

В задачах перевірки адекватності моделі реальному об'єкту використовують поняття критерію адекватності, що являє собою відхилення експериментальних показників конкретного вимірюваного параметра об'єкта управління від показників отриманих з математичної моделі об'єкту. Для перевірки адекватності математичної моделі застосуємо два основні статистичні методи [14, 102-104]:

1. Перевірка гіпотез про близькість математичного сподівання кожної k -ої компоненти моделі та реальної системи.
2. Перевірка гіпотез про однорідність двох дисперсій.

Для розгляду першого методу необхідно розрахувати математичні сподівання моделі (m_k^m) та експериментальних даних (m_k^{ek}) [14].

$$H_0: m_k^m = m_k^{ek},$$

$$H_1: m_k^m \neq m_k^{ek}$$

При умові, що H_0 буде прийнятна, то відповідно модель для k -ої компоненти буде прийнята за адекватну. Необхідно провести N_s дослідів та отримати відгуків $(y_{k,n})^m, n=(1, N_m)$ на моделі та експериментальних даних $(y_{k,n})^{ek}, n=(1, N_{ek})$. Ставиться задача рівної об'єму вибірок – $N_m = N_{ek}$. Відповідно N_m можна отримати значно

більше ніж N_{ek} , таким чином, об'єм вибірок моделі підбираємо відповідно до отриманих з реального об'єкта [14].

За отриманими вибірками розраховують числові характеристики оцінки математичного сподівання:

$$M_k^{ek} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{ek}} y_{k,n}^{ek}}{N_{ek}}, \quad M_k^m = \frac{\sum_{n=1}^{N_m} y_{k,n}^m}{N_m}$$

та оцінку дисперсії:

$$S_k^{2,ek} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{ek}} (y_{k,n}^{ek} - M_k^{ek})^2}{N_{ek} - 1}, \quad S_k^{2,m} = \frac{\sum_{n=1}^{N_m} (y_{k,n}^m - M_k^m)^2}{N_m - 1}$$

За критерій перевірки гіпотези приймаємо критерій Стюдента [14]:

$$t = \frac{(M_k^{ek} - M_k^m)}{\sqrt{\left(\frac{1}{N_m} + \frac{1}{N_{ek}}\right) \left(\frac{(N_m - 1)S_k^{2,m} + (N_{ek} - 1)S_k^{2,ek}}{N}\right)}}, \text{ де } N = N_m + N_{ek} - 2,$$

якщо $t < t_{кр}$ (критичне значення критерія Стюдента, є табличною величиною), то гіпотезу приймають H_0 , в іншому випадку – H_1 .

В другому методі передбачено перевірку гіпотези про однорідність двох дисперсій генеральних сукупностей відгуків моделі та реальних даних

$$H_0: \sigma_k^{2,m} = \sigma_k^{2,ek},$$

$$H_1: \sigma_k^{2,m} > \sigma_k^{2,ek}$$

Для перевірки гіпотези використовують критерій Фішера F [14]. Якщо $F < F_{крит}$, то дисперсії вважають однорідними, а модель адекватною.

$$F=S_k^{\bar{6}}/ S_k^M$$

Основною умовою є те, що $F>1$, $S_k^{\bar{6}}$, S_k^M – більша та менша з двох випадкових дисперсії [14].

За результатами експериментальних та розрахованих за моделлю значень, були розраховані математичні сподівання, дисперсії, критерії Стюдента та Фішера. Всі розрахунки зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 Результати перевірки адекватності моделі

	Температура склепіння, °С		Покази пірометра	Температура дна, °С	Температура насадок, °С	
	1	2			Ліва	Права
Математичне сподівання (модель)	1378,4	1365,64	1508,88	1198,79	1252,52	1242,21
Дисперсія (модель)	22,198	65,991	38,059	166,612	119,914	94,465
Математичне сподівання (об'єкт)	1379,1	1367,7	1511,1	1195,43	1256,6	1238,74
Дисперсія (об'єкт)	19,9	53,634	58,088	286,641	161,662	149,466
Критерій Стюдента	0,642	1,213	1,4635	1,022	1,572	1,442
Критерій Фішера	1,115	1,231	1,526	0,581	1,348	1,582

Рівень значущості $\alpha=0.05$ [104], кількість дослідів $n=42$ – об'єм вибірки, що відповідає тижню вимірів (кожні 4 години, 6 разів за добу). Для даних значень критичне значення критерія Стюдента та Фішера дорівнюють відповідно: $t_{kr}=1,99$, $F_{kr}=2,018$ [14].

Внаслідок того, що всі розраховані критерії менші за критичні значення, то немає підстави відхилити гіпотезу про адекватність отриманої математичної моделі.

Тому математичну моделі вважаємо такою, що адекватно описує тепловий режим скловарної печі.

3.2. Розрахунок апроксимуючої передатної функції ванни печі за каналом «витрата газу – вихідна температура скломаси»

Отриманий результат в п. 2.3 є узагальнюючою передатною функцією об'єкту керування. Подача газу по пальниках печі представляє собою фіксоване значення [30]. Однак фіксоване, виходячи з потреб виробництва, значення витрати пального призводить до зайвих витрат. В розробленій передатній функції врахована зміна температура по координаті рівня скломаси. Скловарна піч – об'єкт з розподіленими параметрами, результатом моделювання буде трансцендентний характер передатної функції. Не зважаючи на сучасний рівень програмного забезпечення, моделі такого виду потребують апроксимації внаслідок того, що в реальному часі модель не може бути використана в системі керування [98]. Можливе представлення функції залежності у вигляді нескінченних рядів Фур'є, як одного з методів апроксимації, однак також значно ускладнить аналіз та синтез системи керування [101, 105]. Тому для подальшого використання розробленої математичної моделі скловарної печі в реальному часі, необхідно розрахувати апроксимуючу передатну функцію отриманої моделі об'єкту керування, виконавши перехід до зосереджених параметрів, що представляє собою відповідну для аналізу системи керування форму моделі об'єкту [100].

Підставимо передатні функції для скломаси, кладки, газу та числові коефіцієнти в передатну функцію ванни печі (2.14)

$$W_{міч}(p, x) = \frac{W_{ск.шар}(p)(-317,95 + 263,64W_{кл.дна}(p))W_{ск}(p, x)}{W_{ск}(p, x)W_z(p)((1 - 299,67W_{кл}(p)) \cdot (1 + 299,67W_{кл}(p))(1 + 317,95W_{ск}(p)) \cdot (1 - 317,95W_{ск}(p)) - 38449,3W_{ск}(p)W_{кл}(p))W_{ск}(p)}$$

$$\begin{aligned}
W_{печи}(p, x) = & \frac{\overline{T}_{ск}(p, x)}{\overline{T}_z(p)} \cdot \left(-317,95 + 263,64 \frac{\overline{T}_{кл}(p)}{\overline{T}_z(p)} \right) \cdot \left(1 + 299,67 \frac{\text{sh}(\sqrt{T_3 p})}{\lambda_{кл} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_4 p})} \right) \cdot \\
& \frac{\left(\left(1 - 299,67 \frac{\text{sh}(\sqrt{T_3 p})}{\lambda_{кл} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_4 p})} \right) \cdot \left(1 - 317,95 \cdot \frac{\text{sh}(\sqrt{T_1(x) p})}{\lambda_{ск} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_2 p})} \right) \right)}{\left(1 + 317,95 \cdot \frac{\text{sh}(\sqrt{T_1(x) p})}{\lambda_{ск} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_2 p})} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot h - 3 + 3 \cdot \text{sh}(\sqrt{T_1(x) p})}{\lambda_{ск} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_2 p})} \right) \cdot \frac{T_z(p)}{G_z c T_z^4(p)}} \cdot \\
& -38449,3 \cdot \frac{\text{sh}(\sqrt{T_1(x) p})}{\lambda_{ск} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_2 p})} \cdot \frac{\text{sh}(\sqrt{T_3 p})}{\lambda_{кл} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_4 p})} \cdot \frac{\text{sh}(\sqrt{T_1(x) p})}{\lambda_{ск} \cdot \text{sh}(\sqrt{T_2 p})}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Відповідно до п.2.3. для отримання перехідних характеристик необхідно виконати розкладання в ряд Фур'є (метод розділення змінних), для того щоб позбутися гіперболічного синуса (проблема виникла внаслідок несприймання в належному вигляді зазначеної функції програмними пакетами). Отримані результати заносяться до масиву ординат перехідної характеристики. Слід врахувати, що передатна функція ванни печі представляє собою об'єкт з розподіленими параметрами, тому кожному шару відповідає своя передатна функція. Апроксимуюча структура буде загальна для кожного елемента масиву, однак розрахована окремо для кожного з елементів отриманого масиву ординат перехідної характеристики.

Розглянемо отриманий результату моделі печі, як об'єкт із розподіленими параметрами у вигляді матриці по просторовій координаті x , що відповідає за шар скломаси.

$$W_{печи}(p, x) = \begin{pmatrix} W_{печи}(p, x_1) \\ W_{печи}(p, x_2) \\ W_{печи}(p, x_3) \\ \dots \\ W_{печи}(p, x_n) \end{pmatrix},$$

Таким чином, кожний елемент вектору представляє собою модель із зосередженими параметрами, підставивши конкретне значення x , може бути записано наступним чином[105]:

$$W_{neci}(p, x) = \begin{pmatrix} W_{neci_1}(p) \\ W_{neci_2}(p) \\ W_{neci_3}(p) \\ \dots \\ W_{neci_n}(p) \end{pmatrix}$$

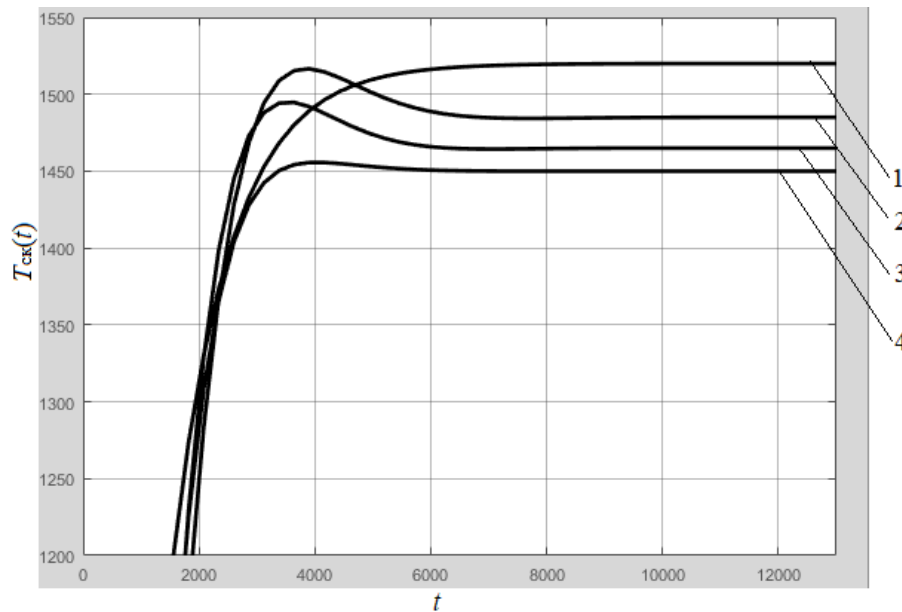


Рисунок 3.8 Перехідна характеристика зміни температури скломаси в третьому перерізі та різних шарах (1 – 0,2м по глибині, 2- 0,4м по глибині. 3 – 0,62м по глибині)

Наведено приклади кривих, кожна з яких характеризує зміну температури у відповідному шарі по глибині та перерізі скломаси, найбільшу температуру має поверхнева температура скломаси.

В задачі спрощення математичних моделей з розподіленими параметрами вибрано метод спрощення розробленої моделі скловарної печі з використанням

чебишевського наближення, як найбільш прийнятний метод для дробово-раціональної структури моделі [97, 105].

Для подальших досліджень передатної функції ванни печі (у вигляді матриці по просторовій координаті) у необхідно виконати наближене перетворення складної трансцендентної функції комплексної змінної (3.1) об'єкта з розподіленими параметрами (ОРП) до зручної для аналізу форми, що подібна об'єкту з зосередженими параметрами (ОЗП) у формі дробово-раціональної апроксимуючої передатної функції. При використанні для обчислень отриману в розділі 2 передатну функцію скловарної печі (2.13), пов'язано з труднощами технічного характеру.

В якості критерія наближення буде прийняте максимальне значення помилки рівномірного наближення [97]

$$J(c) = \max_{\omega \in (0, \infty)} |H(j\omega, c(x)) - W_{печи}(j\omega, x)|,$$

де $W(j\omega, x)$ – амплітудно-фазова характеристика ОРП; $H(j\omega, c(x))$ – апроксимуюча дробово-раціональна передатна функція, задана з точністю до розмірності та величини $c(x)$, у свою чергу $c(x)$ являє собою вектор невідомих коефіцієнтів, що розраховуються відповідно координати глибини скломаси x в точках контролю [97].

Виходячи з того, що поставлена задача найкращого наближення формується для кожного фіксованого значення $x_c = const$ як пошук такого вектору параметрів c , який буде мінімізувати критерій $J(c)$

$$J(c) = \max_{\omega \in (0, \infty)} |H(j\omega, c) - W_{печи}(j\omega, x_c)| \rightarrow \min$$

Використаємо математичний апарат дійсних інтегральних δ -перетворень [97]. Вводячи заміну $j\omega \rightarrow \delta$, амплітудно-фазова характеристика ОРП та апроксимуюча дробово-раціональна передатна функція приймуть вигляд: $W(\delta, x_c)$ та $H(\delta, c)$. Отримані характеристики називають характеристиками уявних частот, δ розглядаємо на проміжку $[\delta_n, \delta_k]$ [97]. Отримаємо задачу мінімізації Чебишева, що

формується як мінімізація помилки наближення $J(c)$ та рівномірного наближення її до нуля на проміжку $[\delta_{\text{п}}, \delta_{\text{к}}]$. Можливість вказаної заміни можлива лише при малому значенні похибки рівномірного наближення, що варіюється за рахунок вектору c [97].

$$J(c) = \max_{\delta \in (\delta_{\text{п}}, \delta_{\text{к}})} |H(\delta, c) - W_{\text{нечі}}(\delta, x_c)| \rightarrow \min$$

Дослідження відбуваються для $q=1, n+1$, в яких будуть значення різниці $H(\delta_q, c_0) - W_{\text{нечі}}(\delta_q, x_c)$ максимальні за модулем, що чергуються за знаком завдяки $(-1)^q$. Пошук c зводимо до розв'язку системи нелінійних рівнянь відносно параметрів пошуку - координат точок екстремуму [97].

$$\frac{\partial}{\partial \delta} (H(\delta_q, c_0) - W_{\text{нечі}}(\delta_q, x_c)) = 0, \quad q \in (1, n+1), \quad \delta \in (\delta_{\text{п}}, \delta_{\text{к}})$$

Рівняння розв'язується відносно розрахованих параметрів c на відповідному проміжку. Після розв'язку системи рівнянь, проводимо обернену заміну $\delta \rightarrow j\omega$ та переходимо до характеристик в зоні уявних частот. Оцінюється ступінь близькості $H(j\omega, c_0)$ та $W_{\text{нечі}}(j\omega, x_c)$, що дасть можливість при фіксованому значенні просторової координати робити наближену заміну моделі об'єктом із зосередженими параметрами з певним набором коефіцієнтів [97].

Виходячи з вище наведеного, в моделі об'єкту керування робимо заміну $p \rightarrow \delta$

$$W_{\text{нечі}}(\delta, x) = \begin{pmatrix} W_{\text{нечі}_1}(\delta) \\ W_{\text{нечі}_2}(\delta) \\ W_{\text{нечі}_3}(\delta) \\ \dots \\ W_{\text{нечі}_n}(\delta) \end{pmatrix}$$

Апроксимуюча структура чим складніше, тим вища точність наближення апроксимації, виходячи з поставленої задачі та [97], апроксимуюча структура має вигляд:

$$H(\delta, c) = \frac{c_0 + c_1\delta + c_2\delta^2}{\delta(c_3 + c_4\delta + c_5\delta^2)}$$

Апроксимуюча передатна функція після відповідної заміни $\delta \rightarrow p$ буде мати вигляд:

$$H(p, c) = \frac{c_0 + c_1p + c_2p^2}{p \cdot (c_3 + c_4p + c_5p^2)} \quad (3.2)$$

А апроксимуюча перехідна характеристика, що відповідає передатній функції (3.2) буде виглядати [79, 98]:

$$h(c, t) = d_1 + d_2t + d_3e^{-d_4t}ch(d_5t) + d_6e^{-d_4t}sh(d_5t)$$

де $d_1 = c_1 - c_0c_6$; $d_2 = c_0$; $d_3 = c_0c_6 - c_1$; $d_4 = c_4/2c_5$; $d_5 = \sqrt{c_4^2 - 4c_5}/2c_5$;

$$d_6 = (c_0c_4^2 - c_1c_4 + 2c_2 - c_0c_5)/\sqrt{c_4^2 - 4c_5}$$

Чебишевське наближення буде виглядати

$$J(c) = \max_{\delta \in (\delta_n, \delta_k)} \left| \frac{c_0 + c_1\delta + c_2\delta^2}{\delta(c_3 + c_4\delta + c_5\delta^2)} - W_{nei}(\delta, x_c) \right| \rightarrow \min$$

Розв'язок поставленої задачі зведений до розв'язку системи нелінійних диференційних рівнянь, що відбувається за допомогою $J(c_0)$ відносно значення c_0 , положення екстремальних точок δ розраховується виходячи з розрахованого значення c_0 .

Перехідні характеристики апроксимованої моделі об'єкту керування будуть виглядати наступним чином

$$T_{ск}(t,x)=T_{ск0}+Gh(c,t)$$

Використовуючи початкові значення температур скломаси, кладки, газу, коефіцієнти κ , κ_1 , κ_2 , отримані в параграфі 2.3 та безрозмірний коефіцієнт витрати газу $G=G_T/G_{MAX}$, отримаємо коефіцієнти апроксимуючої передатної функції. Слід зазначити, що початкові значення вищезгаданих температур змінюються відносно перерізу скломаси, тобто, як приклад вихідні показники перерізу два будуть початковими при розрахунку коефіцієнтів в перерізі три. Коефіцієнти апроксимуючої передатної функції (3.2) $c_0 - c_5$ утворюють масив $C_{i,j}$, в якому для кожного поперечного перерізу (i -й) буде відповідно власний вектор (j -й набір) числових значень c .

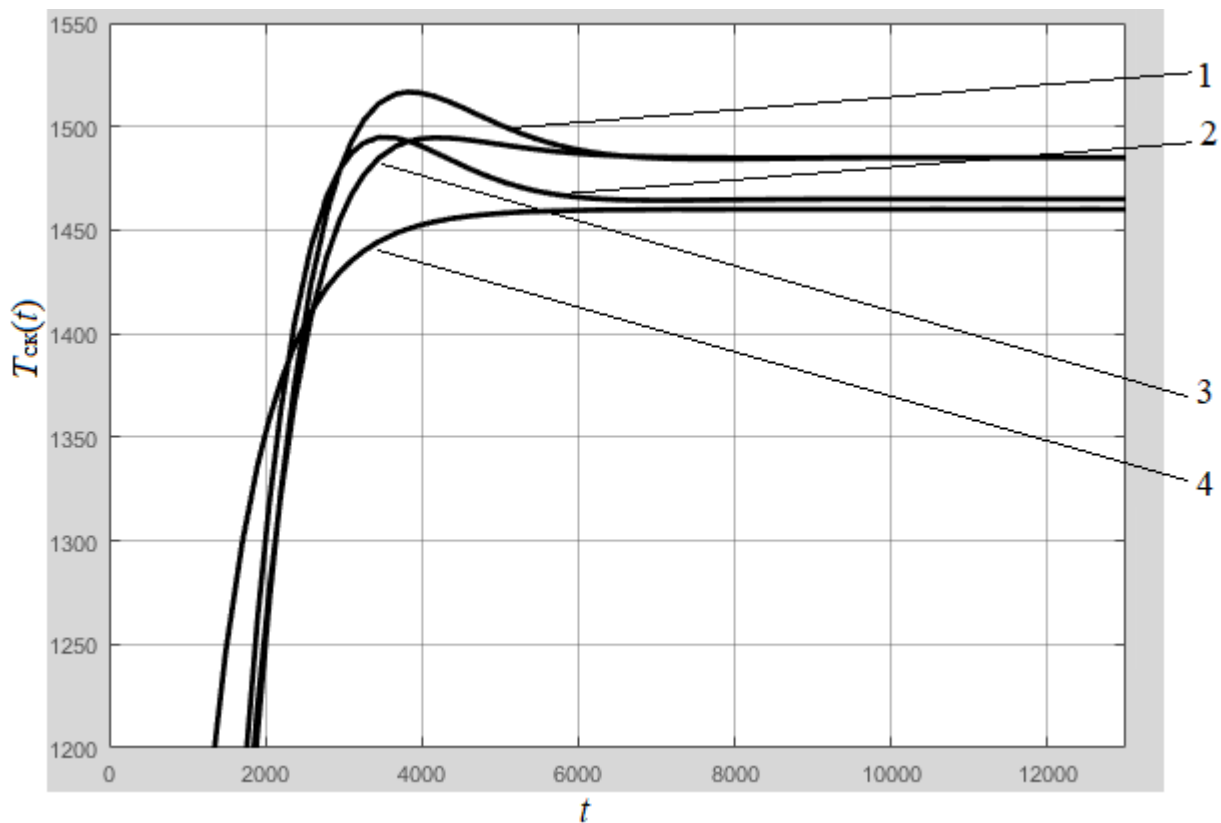


Рисунок 3.9 Порівняльні перехідні характеристики зміни температури скломаси побудовані за допомогою розробленої моделі (1,2) та апроксимованої моделі об'єкту керування (3,4).

Виходячи з наведених результатів на рис.3.9 видно, що перехідні характеристики апроксимованої моделі мають менше коливань у порівнянні з характеристиками отриманими з моделі, яке у свою чергу негативно позначається на якості скломаси. Апроксимовану модель (3.2) використаємо в подальших дослідженнях температурних полів скломаси.

3.3. Дослідження температурних полів скловарної печі

При дослідженні скловарної печі з поперечним поданням полум'я, умовно розділяється зон (поперечні перерізи), що відповідають точкам вимірювання температури скломаси та представлено на рис. 3.10 [58, 62, 72, 75].

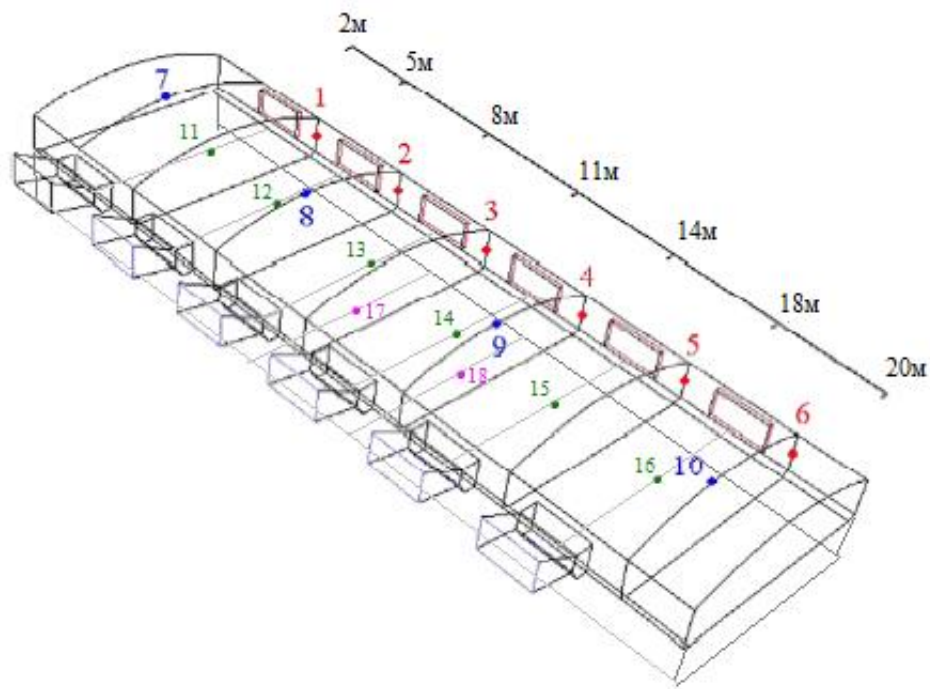


Рисунок 3.10 Точки вимірювання температури скломаси. 1-6 – температури пальників, 7-10 – температури склепіння, 11-16 – температур виміряна пірометром, 17-18 – температура дна

Апроксимована модель скломаси, що розроблена та досліджена в розділі 3, представляє собою узагальнюючу структуру для кожного з поперечних перерізів скломаси. В кожному перерізі апроксимована модель відрізняється тільки значенням коефіцієнтів, на які впливають значення параметрів відповідного перерізу [18].

3.3.1 Температурний розподіл в зонах газового простору

Використовуючи засоби імітаційного моделювання [76, 106], для кожної із зон можна побудувати температурне поле у вигляді температурного розподілу в конкретному перерізі [5]

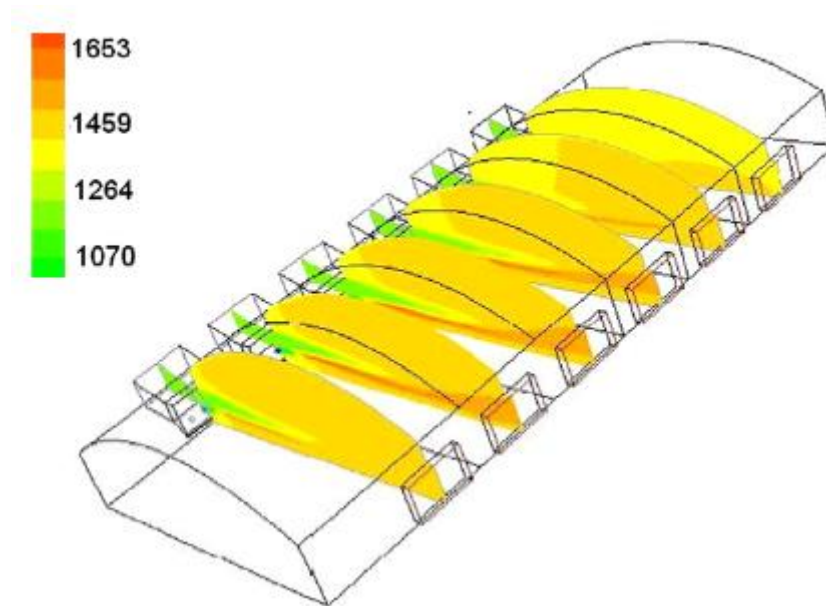


Рисунок 3.11 Температурний розподіл в зонах газового простору

Згідно до зон, на які умовно поділена скловарна піч (відповідає положенню пальника), можна розрахувати значення температури у відповідних перерізах скломаси [5]. Як приклад, представлено зміну температури газового простору при роботі правої групи пальників. На рис.3.11 представлено температурний розподіл процесу вильоту полум'я з пальників 1-го – 6-го, розподіл температури газового простору досліджується між дзеркалом скломаси та склепінням, також представлено розподіл температури газового простору при вході до регенераторів (зелений колір на рис. 3.10) . На якість(рівномірність) нагрів газового простору впливає хімічний склад пального [18, 30, 33]. Температуру газового простору необхідно підтримувати в межах діапазону, що заданий технологічним регламентом, для забезпечення повного прогрівання скломаси відповідної зони печі, однак не більше норми – зайва витрата пального та перегрів кладки склепіння, що може призвести до аварії (тріщини куполу та провалювання кладки склепіння) [27, 34, 36]

Хімічний склад газового простору печі залежить від пального, що використовується в процесі горіння, співвідношення газ-повітря по конкретних зонах печі, а також складу шихти (вище в роботі прийнято, що склад шихти є константою і зміна є некерованим збуренням).

Практично неможливо досягти ідеального перемішування газу та повітря [30], то повного згорання не відбувається та в продуктах горіння можна спостерігати

CO_2 , CO та вільний кисень. В залежності від вмісту CO_2 та O_2 газовий простір може бути відновний (вміст $CO_2=0,3-0,4\%$), нейтральний та окислюючий (вміст $CO_2=0$, $O_2 >2\%$). Хімічний склад газового середовища – важливий параметр процесу роботи печі у зв'язку з тим, що газовий простір взаємодіє зі скломасою. Таким чином, необхідно над скломасою створити відповідний склад газового середовища, що забезпечать відповідні умови процесу варіння (коефіцієнт витрати повітря $p=1-1,2$) [36, 58].

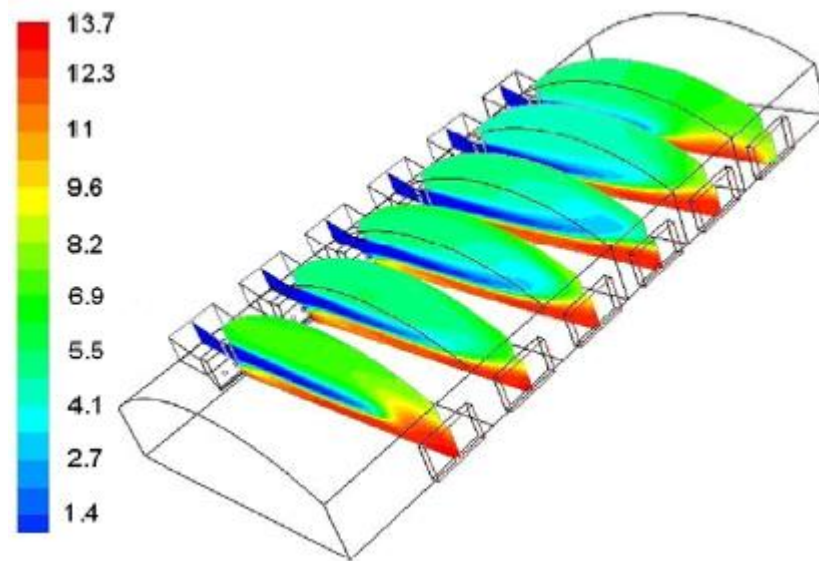


Рисунок 3.12 Процентний вміст вуглекислого газу.

На рис. 3.12 представлено процентний склад вуглекислого газу в газовому просторі над скломасою, де відбувається власне процес горіння. В першому та останньому перерізі температура скломаси найменша час, а відповідно об'єм пального використовується менший та вміст вуглекислого газу найменший. Найбільший вміст вуглекислого газу в четвертій зоні внаслідок того, що температура та витрата газу в цій зоні найбільша. Коли працюють пальники по одному ряду, то перед виходами до протилежних пальників (відповідного за номером) повітря вже не придатне для використання внаслідок відсутності кисню, однак подається в регенератор відповідного пальника та іде на нагрівання газу. Таким чином, відбувається економія пального на нагрівання газу в пальнику.

3.3.2. Температурний розподіл в поперечному та повздовжньому перерізі скловарної печі

При дослідженні температурного розподілу в перерізах скловарної печі доцільно виконувати за допомогою імітаційного моделювання [18, 106]. В імітаційній моделі скловарної печі можливо змінювати (враховувати при моделюванні) технологічні параметри виробництва:

- ємність(об'єм) ванни печі;
- об'ємне співвідношення газ-повітря;
- швидкість плавлення шихти;
- інтенсивність роботи регенераторів;
- оптимізація процесу зміни кольору скла;
- враховувати конструкційні особливості пальників печі.

Для розробленої в попередньому розділі математичної моделі печі з поперечним поданням полум'я та при відповідних геометричних розмірах було досліджено температурне поле в процесі виготовлення скломаси (плавлення шихти).

Результати представлені у вигляді зображення температурного розподілу у фіксований момент часу. Розглянута скловарна піч в 3-х проекціях.

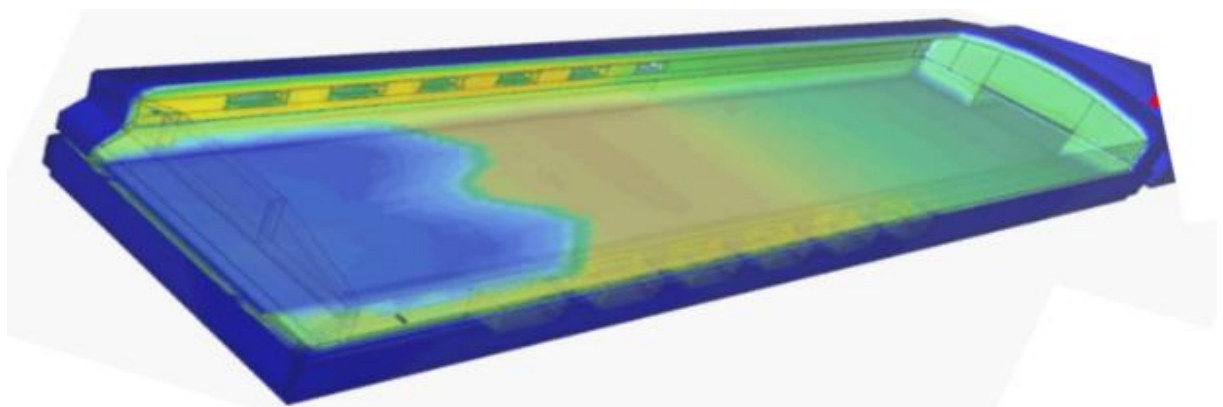


Рисунок 3.13 Скловарна піч – зовнішній вигляд в 3D та розміщення пальників

Суттєвим фактором є однорідність скломаси, за отриманою математичною моделлю можна змодельовати поведінку плавлення шматків шихти до стану однорідності. На рис. 3.14 представлено перехід скломаси з точки завантаження шихти до повного проплавлення та стану повної однорідності скломаси

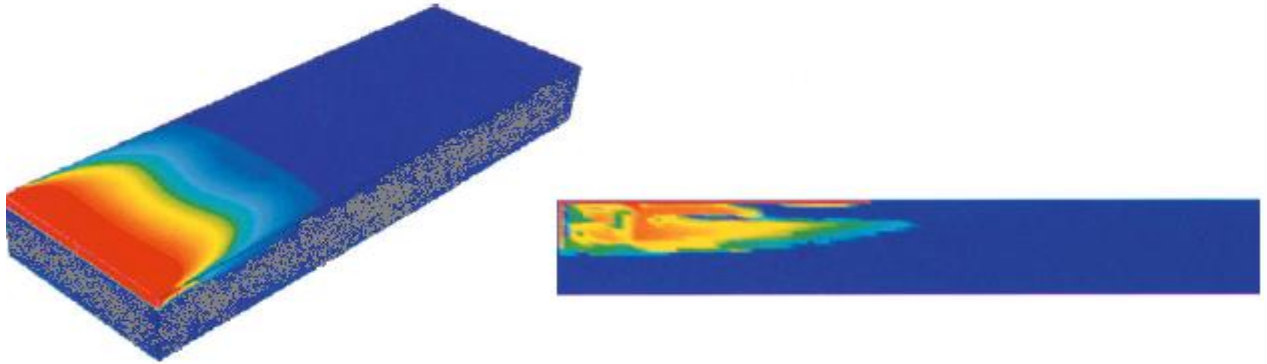


Рисунок 3.14 Представлення переходу до однорідності скломаси.

Повна однорідність – суцільний колір без переходів, з ліва – тільки завантажена шихта.

Всі приведені результати імітаційного моделювання являють собою зображення поведінки температурного розподілу [18].

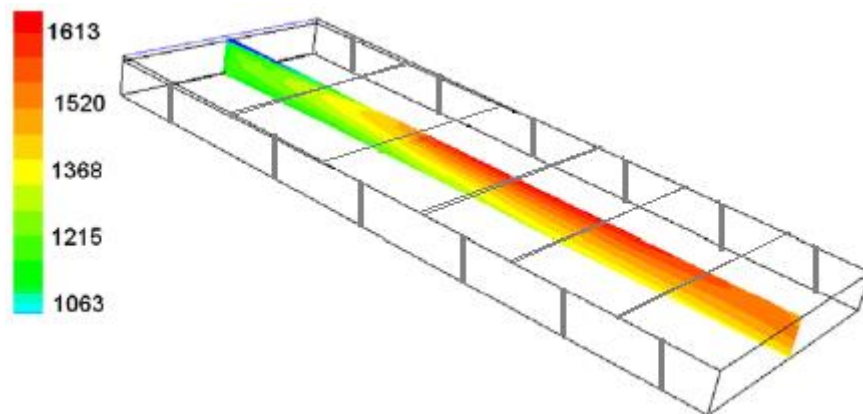


Рисунок 3.15 Температурний розподіл в скломасі повздовжньому перерізі по центру зони скломаси.

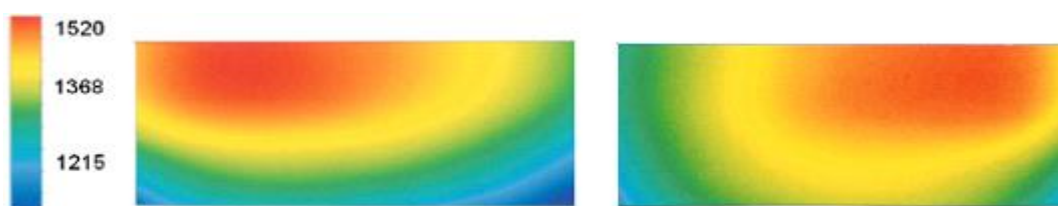


Рисунок 3.16 Поперечний переріз скломаси (в зоні 4).

На рис.3.15 представлено температурний розподіл по зонах печі, а на рис. 3.16 температурне поле в поперечному перерізі скломаси та конкретній зоні.

Розрахунок поведінки температури скломаси можна розглядати в динаміці, на рис. 3.17 по осі ординат відкладений час у хвилинах, всі значення температури розраховувалися для глибини шару $x=0.4...0.5$ м

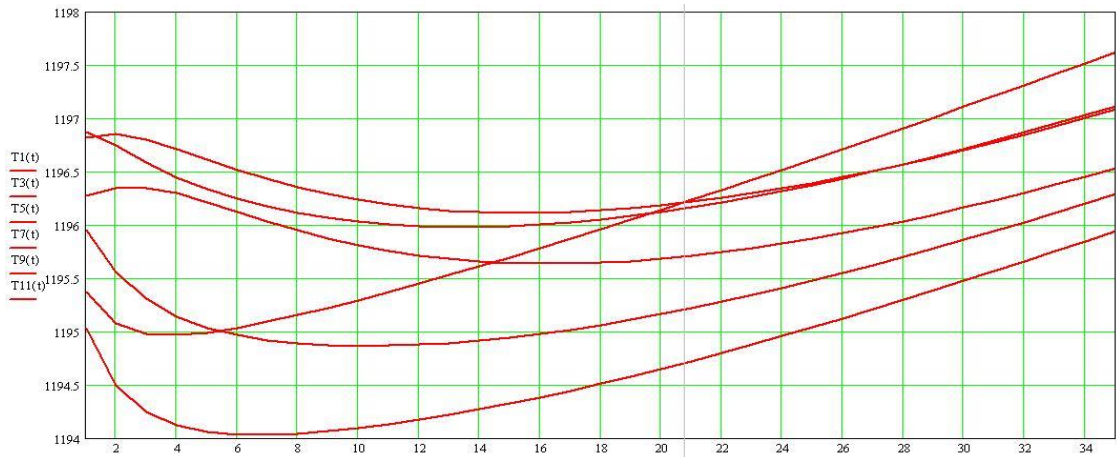


Рисунок 3.17 Приклад зміни температур в різних шарах скломаси (друга зона)

Представлено зміна температури в шарі скломаси від 0,5м(верхня крива) до 0,6м (нижня крива) по центру другого перерізу. На відміну від попередніх побудов, на рис. 3.16 час представлений в хвиликах. Для більш повної картини поведінки температурного поля зручніше розглядати не певні точки в перерізі, а повний поперечний або повздовжній переріз печі в певній зоні [18].

На кожному з представлених рисунків температурних полів присутня шкала температур.

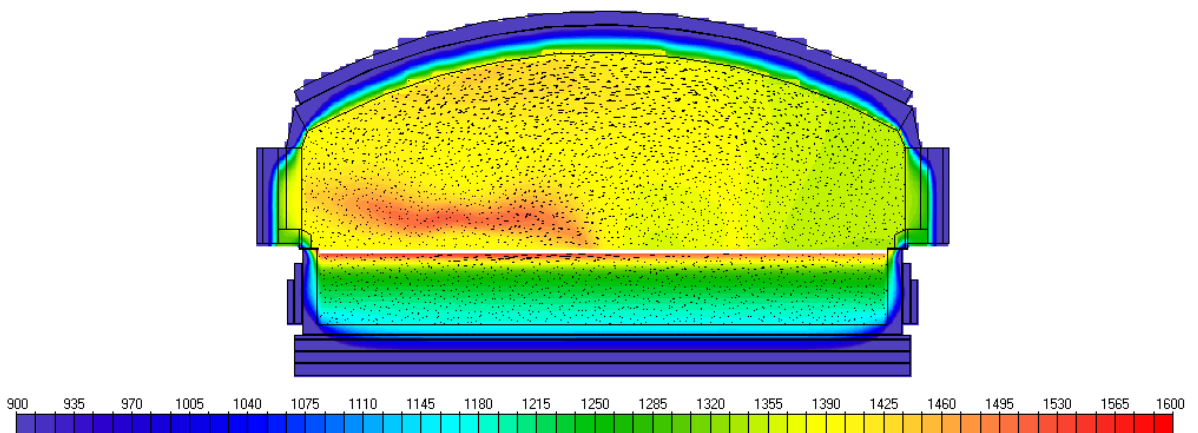


Рисунок 3.18 Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

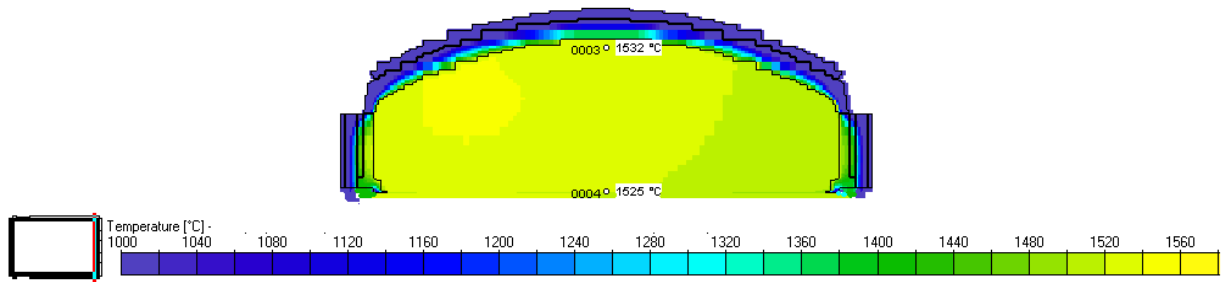


Рисунок 3.19 Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

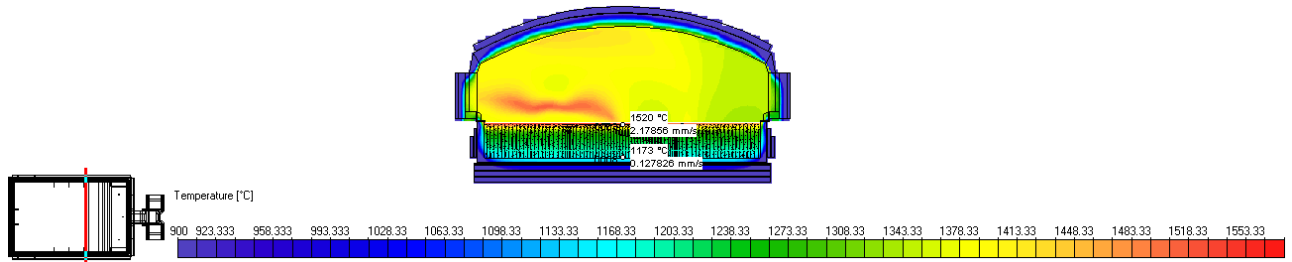


Рисунок 3.20 Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

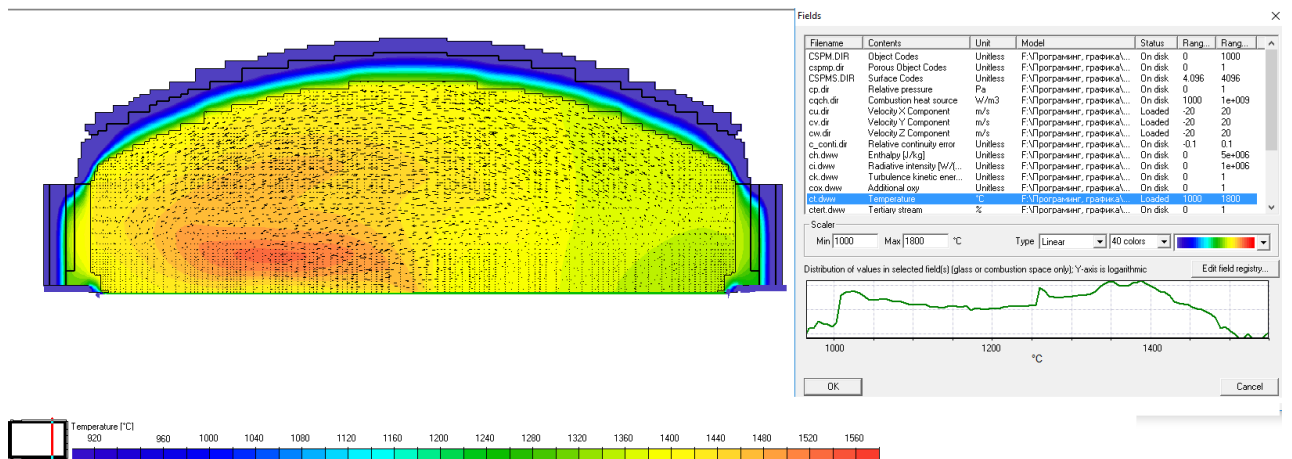


Рисунок 3.21 Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

На рис.3.18-3.20 чорними рисками зображено динаміку зміни температури в газовому просторі та шарах скломаси. Виходячи з положення факелу (червоного кольору над розплавом скломаси), реверсом переключена на ліву групи пальників [18]. При необхідності можна вивести на екран значення температури як представлено на рис.3.19 та 3.20, але в конкретному перерізі внаслідок того, що числове значення виводиться тільки в місці встановлення термопар. На рис.3.19 та 3.21 представлено температурне поле газового простору та склепіння.

Площина перерізу представлена червоною рисою на схематичному зображенню печі рис. 3.19-3.21. На рис.3.21 представлено додаткове вікно з

графіком зміни температури скломаси. Прогрів (температурний розподіл) в скломасі представлено на рисунках 3.18 та 3.20 – в даному випадку, виходячи з показань температурного поля, температура скломаси на глибині 0,1 м від верхнього рівня скломаси нижче на 5-6% від даних технологічного регламенту. Для цього необхідно змінити (збільшити) витрати пального на пальниках 2-ї та 3-ї пари.

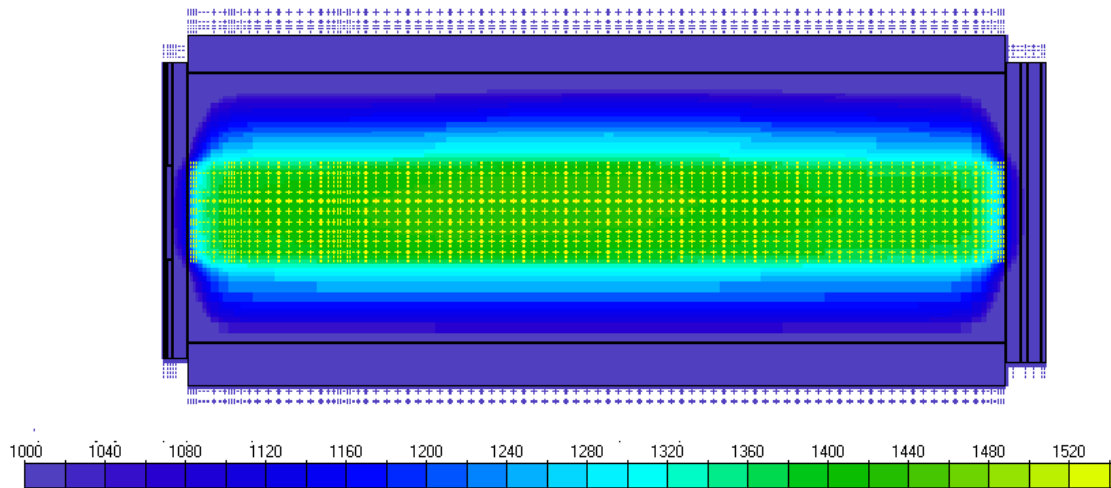


Рисунок 3.22 Температурне поле склепіння

На виробництві мали місце випадки, коли перегрівання кладки склепіння призводило до обвалення кладки. Для уникнення даних проблем температуру склепіння вимірюють за допомогою великої кількості датчиків температури, що встановлені на рівних проміжках вздовж центральної осі для забезпечення максимального дослідження температурного поля на поверхні кладки склепіння [34, 40]. Контакт кладки склепіння та газового простору відповідають граничні умови 2-го роду, розглянуте в п.2.5. Рис. 3.22 представляє собою температурне поле кладки склепіння, прогрівання іде в допустимих межах та представлено, що кладка прогріта рівномірно від температури 1000°C по краях склепіння та 1380°C в центральній зоні. Данні показання температури входять в допустимі технологічним регламентом межі [18, 34, 40].

На рис. 3.23 та 3.24 представлено температурне поле поперечного перерізу скловарної печі, однак на відміну від рис.3.19 та 3.21 тільки скломаса та кладка бокових поверхонь та дна.

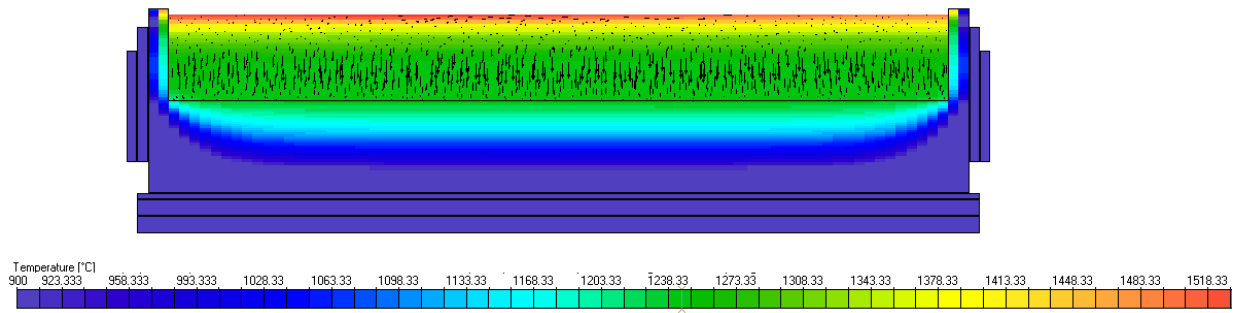


Рисунок 3.23 Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

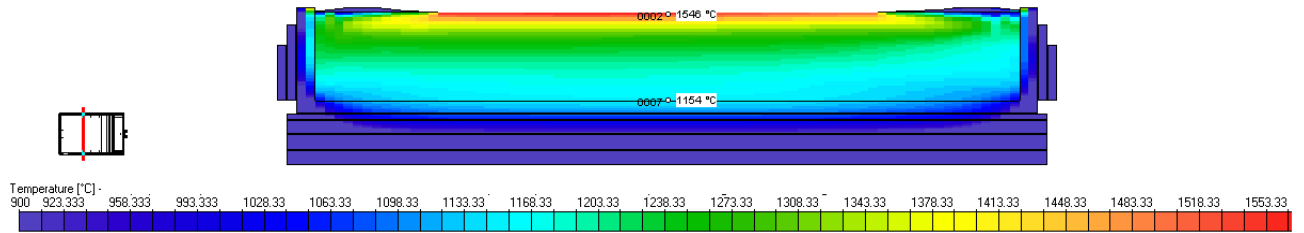


Рисунок 3.24 Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

Завантаження шихти відбувається через канал, що межує з газовим простором печі, тому на рисунках температура в каналі завантаження наближається до температури газового простору [18].

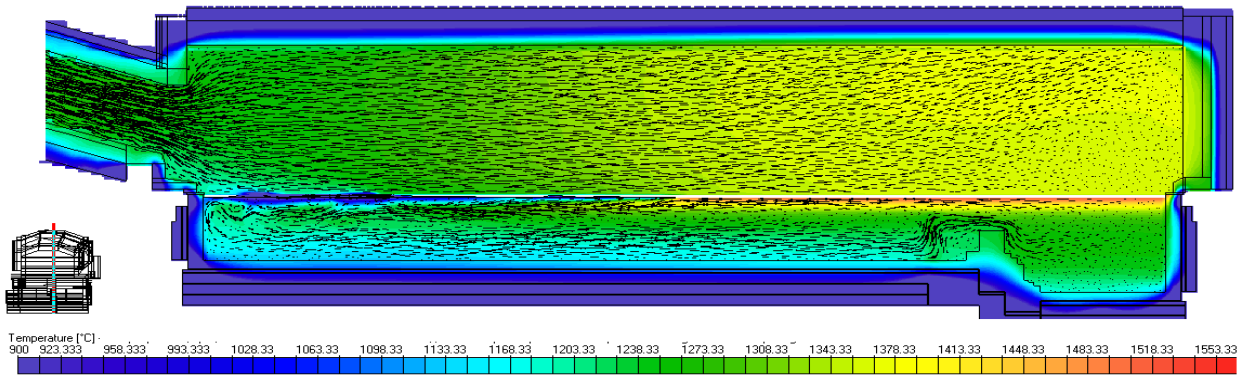


Рисунок 3.25 Температурний розподіл в повздовжньому перерізі скловарної печі разом з каналом завантаження

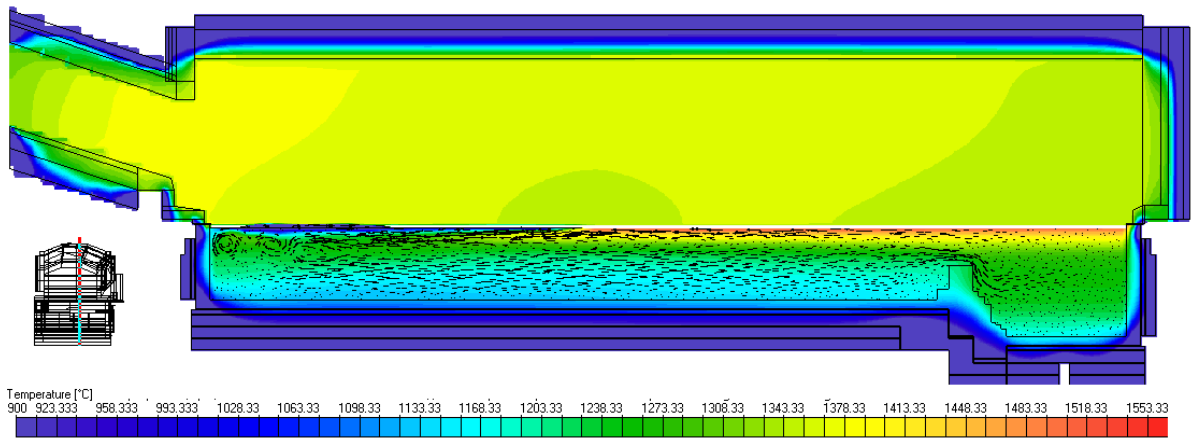


Рисунок 3.26 Температурний розподіл в повздовжньому перерізі скловарної печі разом з каналом завантаження

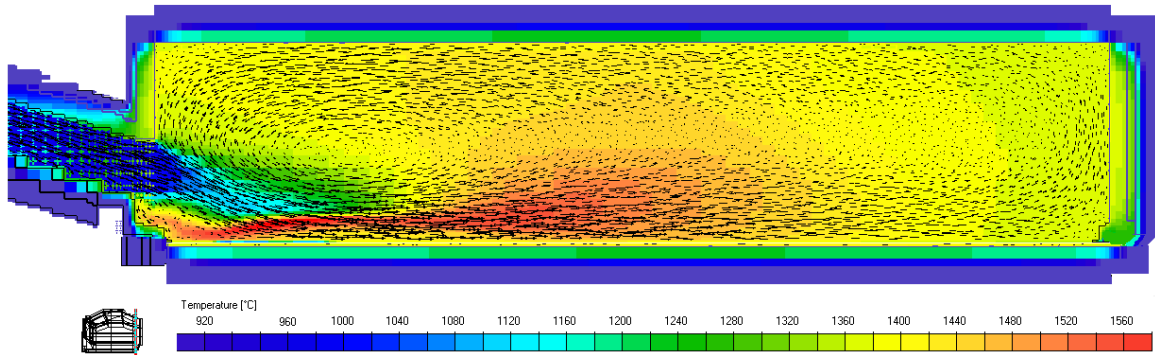


Рисунок 3.27 Температурний розподіл в повздовжньому перерізі скловарної печі разом з каналом завантаження та роботою пальника

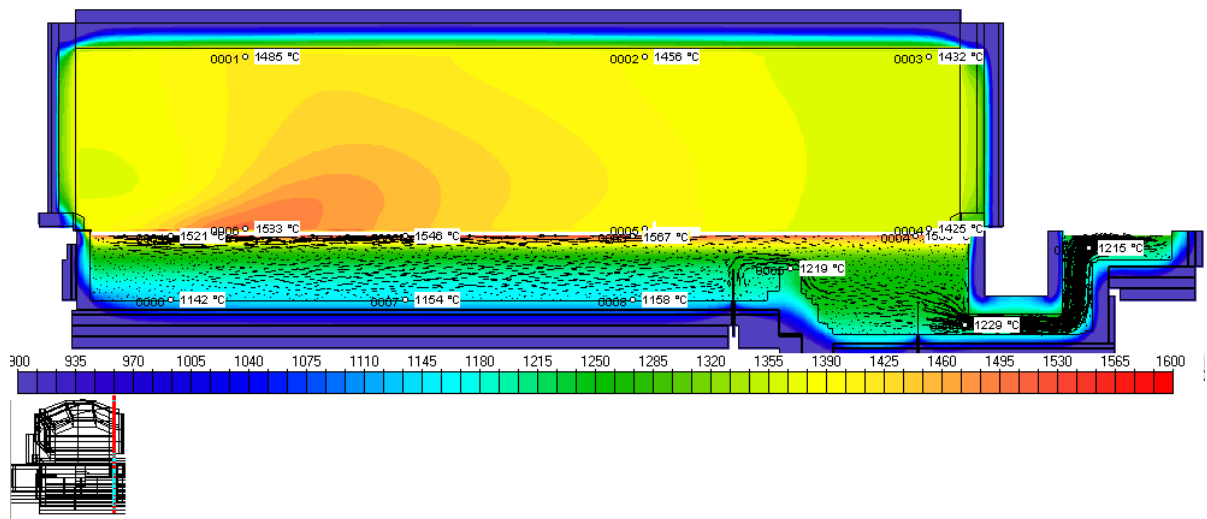


Рисунок 3.28 Температурний розподілі в повздовжньому перерізі скловарної печі разом з роботою пальника та каналом виходу

На рис.3.28 площина перерізу не охопила канал завантаження, але охопила канал виходу з ванни печі до зони студження.

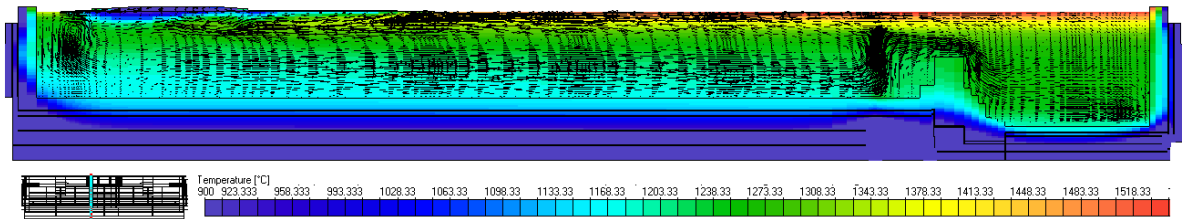


Рисунок 3.29 Температурний розподіл в повздовжньому перерізі скловарної печі тільки скломаса та кладка (дна)

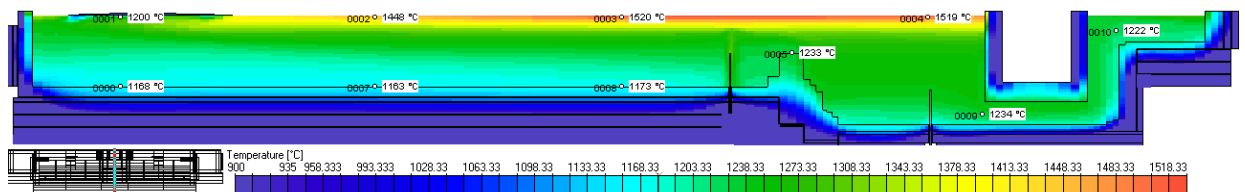


Рисунок 3.30 Температурний розподіл в повздовжньому перерізі скловарної печі, в площину перерізу потрапив канал переходу в зону студження

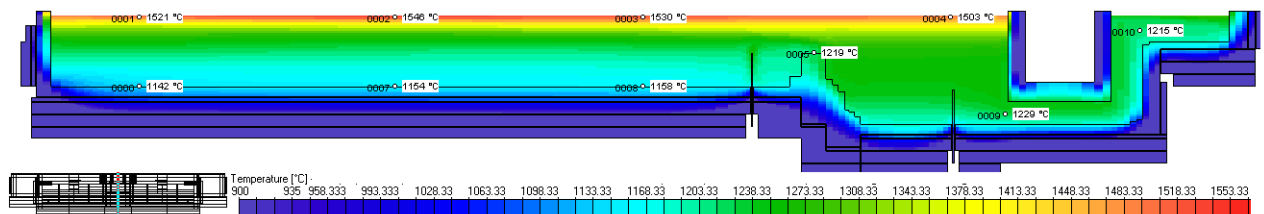


Рисунок 3.31 Температурний розподіл в повздовжньому перерізі скловарної печі, в площину перерізу потрапив канал переходу в зону студження

Температурні поля, що наведені на рис.3.25-3.31, представлені в повздовжньому перерізі скловарної печі, але в різних точках по координаті ширини печі (y). Так рис.3.25-3.27 представлені з каналом завантаження шихти, рис.3.27-3.28 побудовані в момент роботи пальника. На рис.3.25-3.28 представлено кладка склепіння, дна та торцева (бічна) поверхня; на 3.28, 3.30, 3.31 в переріз увійшли канали переходу в зону студження (вивантаження) [18].

Розрахований температурний розподіл рис. 3.25, 3.26, 3.29, 3.30 показав, що прогрівання поверхні скломаси 1-ї та 2-ї зони не однорідне внаслідок процесу завантаження нової партії шихти. Однорідність температурного розподілу поверхні

скломаси, представленої на рис. 3.28, 3.31 досягається за рахунок збільшення витрати пального на перших двох групах пальників та перерві між завантаженням шихти, що дало можливість змодельовати повноцінне прогрівання поверхні скломаси [18].

Динаміка та напрям зміни температури були змодельовані і представлені на рис. 3.29 – чорні риси, що знаходяться над зображенням температурного поля.

3.3.3. Температурний розподіл температури полум'я пальника печі

Для температурного поля пальника дуже важливо однорідність та повне покриття «своєї» площі (мається на увазі, що кожний пальник вильотом полум'я повинен так покрити частину поверхні скломаси, щоб якщо розглянути покриття всіх пальників, то вся загальна площа скломаси повинна знаходитися в зоні роботи пальників) [18, 29, 30, 32]. В основу покладена формула (2.8).

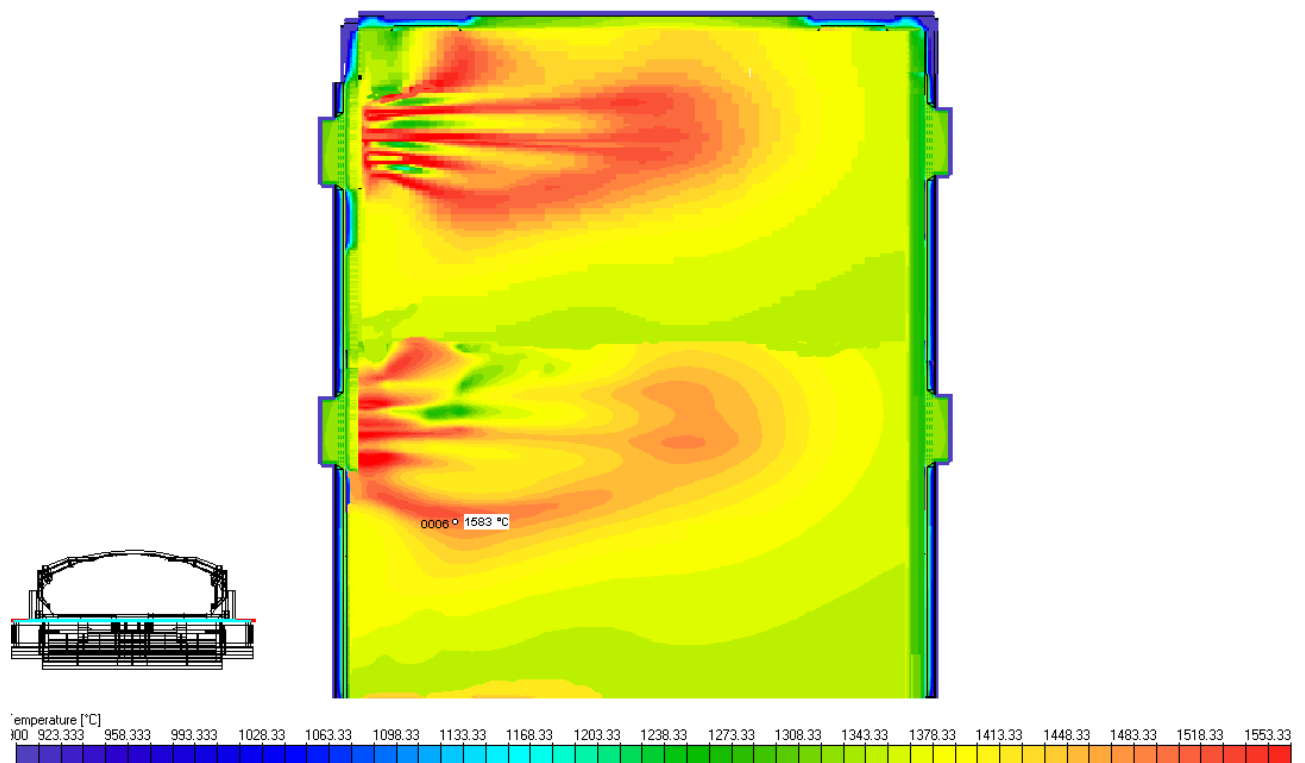


Рисунок 3.32 Температурний розподіл виходу полум'я з пальника печі

Представлено на рис.3.32 вихід полум'я двох перших лівих пальників, вигляд «з гори». Повністю видно розподіл температурного поля газового пальника. Тепловий потік з пальника, як і необхідно за технологічним регламентом, перекидає дві третини вперед від вильоту полум'я з пальника, температура найбільша в першому пальнику, та розмір покритого поля більший необхідного внаслідок збільшеної витрати пального на 5% [18]. Другий пальник недогріває виділену йому площину (верхня частина другого факела пальника на рис. 3.32) тому, що значення витрати встановлено на 12% нижче за необхідне. Зменшення витрати пального було можливо виконати після того як перший пальник покрив більше відведеного простору, а також виконати збалансування витрати – збільшення на одному, можна призвести до зменшення витрати на наступному. Однак в даному випадку не можливо зменшити на стільки витрату, внаслідок того, що відбувається недогрів виділеної пальнику зони прогріву.

3.3.4. Температурне поле поверхневого шару скломаси

Поверхневий шар скломаси (дзеркало скломаси) отримує тепло від пальника та прогріває всю товщу скломаси. На рис. 3.33 схематично представлено процес нагрів поверхневого шару при ввімкненому на реверсі лівої групи пальників. Найнижча температура в зоні завантаження, найвища – після третього пальника до п'ятого (в зоні кавельпункту – найбільшій температурі) [18].

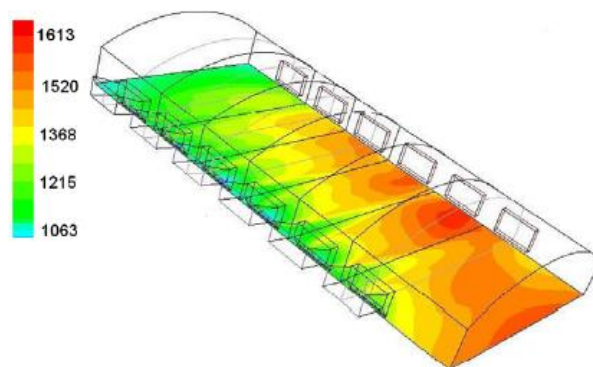


Рисунок 3.33 Температурний розподіл в скломасі по поверхні зображено температуру шихти, що завантажена в розігріту скломасу

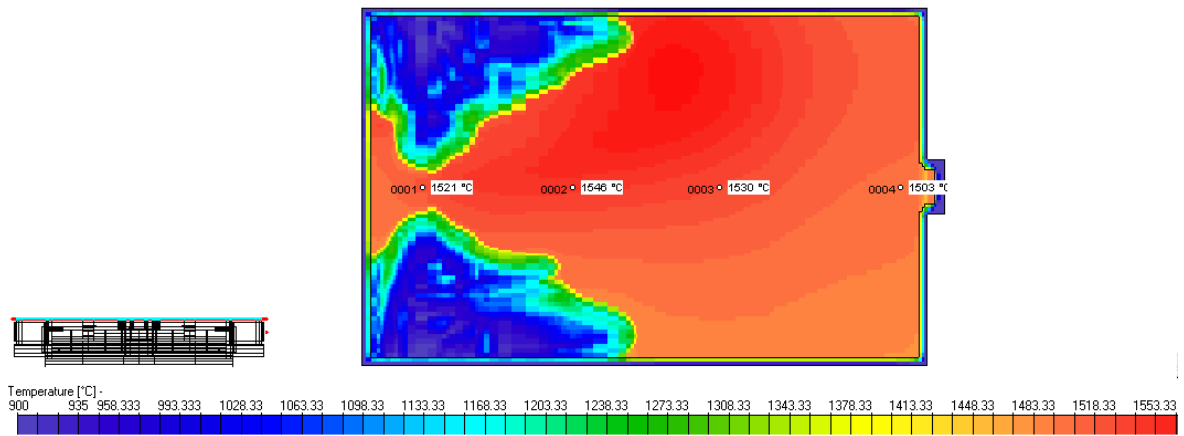


Рисунок 3.34 Температурне поле поверхнього шару скломаси, темним кольором представлена шихта, що завантажується.

Програмний блок, що використовується на сучасному виробництві, представляє собою реалізацію класичної системи керування скловарною піччю без можливості змінювати алгоритм керування. На виробництві керування роботою печі відбуваються по встановлених точках виміру (точках встановлення термопар): значення температури скломаси та газового простору. В розділі 1 поставлено задачу оптимізувати витрату пального по пальниках печі. Дослідження, в попередніх параграфах, проводилися виключно з розрахованою апроксимованою моделлю скловарної печі засобами імітаційного моделювання. Результати досліджень представлено на зображеннях відповідного перерізу температурного розподілу.

3.4. Дослідження впливу збурень на об'єкт

В п. 1.3 були приведені можливі збурення в скловарній печі. Зазначено, що вони поділяються на керовані та некеровані. До керованих належать температура, тиск та вологість газу та повітря на вході до пальників, а до некерованих – склад шихти та швидкість руху скломаси.

Некеровані збурення, фактично не вимірювані тільки, якщо розглядати систему керування тепловим режимом печі. На виробництві присутня власна система керування, що відповідає за підготовку шихти, склобою та завантаженню в

вану печі. В данній роботі синтез вище зазначеної системи не приводиться, тому збурення, в якості якого виступає склад шихти, яка поступає до варильної зони печі та швидкість завантаження відноситься до некерованих збурень.

Період завантаження шихти $\Delta t_{пр}$, лежить в межах від низької швидкості (перегрів скломаси, зайва витрата пального) до високої швидкості (недогрів скломаси, брак готової продукції): $\Delta t_{пр_min} < \Delta t_{пр} < \Delta t_{пр_max}$ [28, 53, 92].

До браку відносяться видимі на склі елементи, що за технологічним регламентом не можуть знаходитися на готовому продукті. До них відносяться: бульбашки, шлір, складка. Приклади браку представлені на рис. 3.35

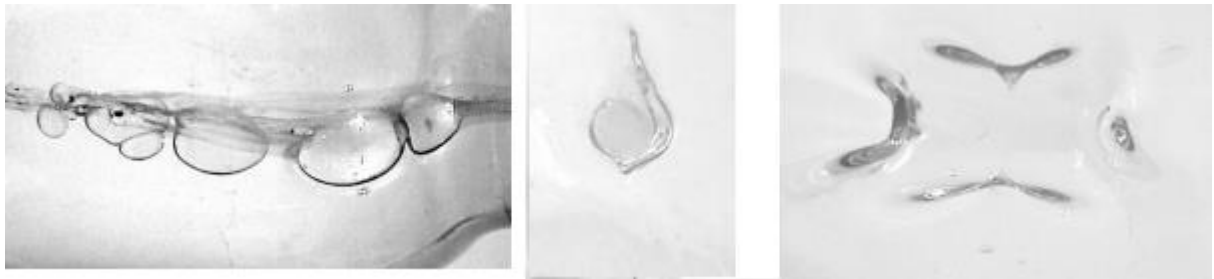


Рисунок 3.35 Варіанти браку в листових та тарних скловиробах. Зліва на право – бульбашки, шлір, складка

В розділі 1 зазначено, що збурення являє собою зміну складу шихти. Змодельоване температурне поле скломаси, як результат впливу зміни складу шихти завантаженої до печі.

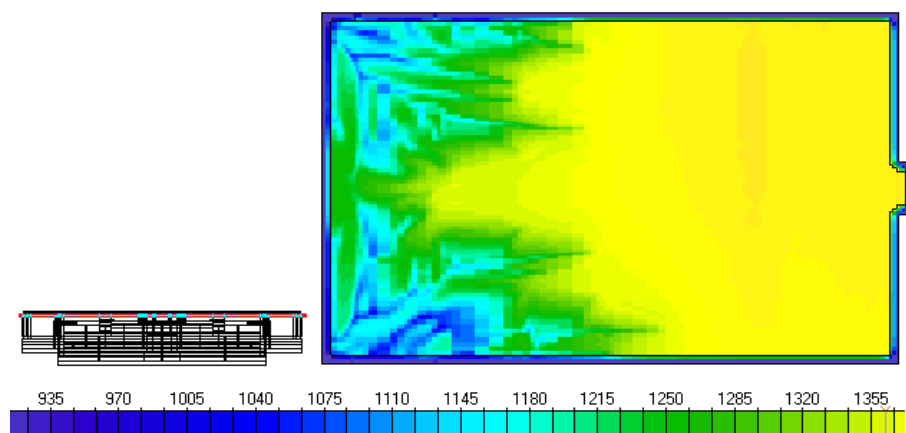


Рисунок 3.36 Температурне поле поверхневого шару скломаси, темним кольором представлена шита, що завантажуюється.

Порівнюючи рис.3.34 з рис. 3.36 представлено температурне поле скломаси, але не можливо досягти відповідної температури прогрівання при умові, що витрата пального не змінюється. Відповідно не буде досягатися температура скломаси задана технологічним регламентом.

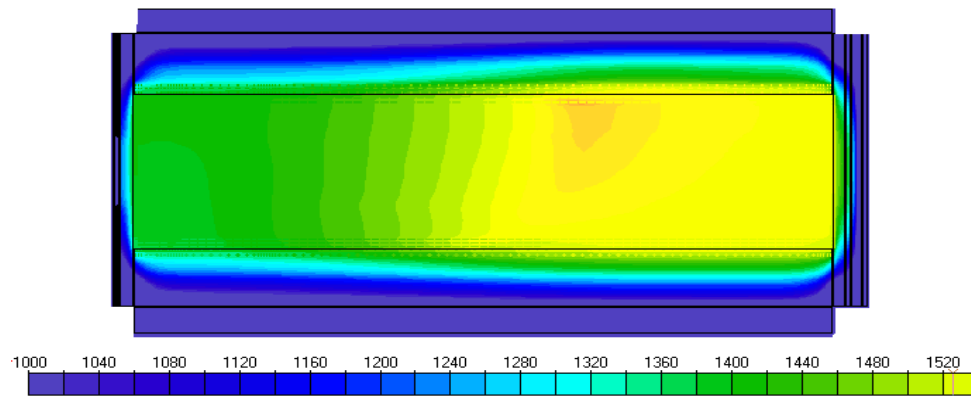


Рисунок 3.37 Температурне поле склепіння

Представлено температурне поле на рис.3.37 представлено при низькій швидкості завантаження внаслідок чого відбувається зайва витрата пального (по всіх пальниках, а не по певній парі), перегрівання скломаси та кладки, в даному випадку склепіння. Перегрівання кладки склепіння може привести до провалу у варильну зону ванни печі всієї конструкції. Такі випадки мали місце на виробництві.

Недоліком існуючої системи керування є те, що відбувається зайва витрата пального, яка викликана подачею газу одразу по всіх пальниках та відсутня оптимальна подача газу по кожній з пари пальників. Системи керування тепловим режимом скловарної печі, що розробляються в роботі, повинні реагувати на всі вище приведені варіанти збурюючих дій та підтримувати тепловий режим роботи скловарної печі на заданому технологічному регламенті рівні.

Система керування, яка закладена в основу програмного блоку, за своєю структурою не може бути змінена, що є основним недоліком даного етапу досліджень. Для реалізації поставлених в роботі задач досліджень, по оптимізації витрати газу по пальниках, необхідно розробити структуру систем керування тепловим режимом роботи печі. Буде проведено аналіз роботи декількох систем керування для виявлення тієї, яка краще задовольнить поставленим вимогам виробництва та поставленим в роботі задачам. Також система керування повинна

підтримувати стабільність роботи при дії збурень. Досліджуються система із загальним ПД-регулятором, адаптивна система та система з нечітким регулятором, що інваріантні для зміни коефіцієнта передачі об'єкта управління. Необхідність використання адаптивної системи викликана багатокomпонентністю технологічного процесу (апріорні дані про параметри об'єкту керування важко отримати). Неадаптивні методи керування передбачають використання великої кількості апріорних даних, в свою чергу, адаптивний метод керування забезпечує високу якість керування при відсутності апріорної інформації про параметри об'єкту керування [117, 118].

3.5. Висновки до розділу 3

1. Проведено дослідження адекватності розробленої математичної моделі на основі статистичних критеріїв Ст'юдента та Фішера; результати дослідження дозволяють вважати розроблену математичну модель адекватною реальному процесу скловаріння.
2. Обґрунтовано необхідність розробки та дослідження апроксимуючої математичної моделі скловарної печі, що дасть можливість використовувати їх у системі керування реального часу. На основі аналізу існуючих методів апроксимації для математичних моделей та систем з розподіленими параметрами вибрано метод спрощення розробленої моделі скловарної печі – метод з використанням чебишевського наближення.
3. Розрахована апроксимуюча модель скловарної печі, коефіцієнти якої залежать від глибини шару скломаси та враховують акумулюючу здатність кладки печі. Дослідження якості апроксимації продемонстрували достатню точність отриманих результатів.
4. Використовуючи розраховану апроксимуючу математичну модель скловарної печі та за допомогою засобів імітаційного моделювання, проведено дослідження температурних полів у різних перерізах скловарної печі, які показали багато недоліків у існуючій системі керування.
5. Проведено дослідження результатів дії збурення на об'єкт керування, виявлено недоліки в роботі існуючої системи та поставлено основні задачі для розробки системи керування роботою скловарної печі.

РОЗДІЛ 4. КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Система керування технологічним процесом виготовлення скломаси у варильній зоні скловарної печі призначена для підтримки теплового режиму роботи на заданому технологічним регламентом значенні. Відхилення від регламентних значень температурного режиму призводить до браку готової продукції в окремих та частинних випадках виходу апарату з ладу в цілому. Основна задача, що висувається на виробництві до систем керування – компенсація дії збурення. Поставлена задача реалізується шляхом використання адаптивної системи керування, яка буде компенсувати вплив від можливих збурюючих дій. В розділі 1 наведено, що до некерованих збурень відноситься склад шихти та швидкість подачі до ванни печі (за дане питання відповідає інша система керування в загальному процесі виробництва скла). Тобто, система керування тепловим режимом скловарної печі не впливає на якість підготовленої шихти, в свою чергу задачею адаптивної системи керування, яка розробляється в роботі, є компенсація наслідків від дії збурення шляхом оптимального коригування подачі пального по пальниках печі [80, 84, 86].

Скловарна піч, що розглядається в роботі, відноситься до ванних, регенеративних печей з поперечним поданням полум'я. Перевагою печі з поперечним поданням полум'я в тому, що для кожної пари пальників можна задати своє співвідношення газоповітряної суміші, таким чином підтримувати необхідну температуру в кожній зоні ванни печі, регулювати швидкість та напрям конвективних потоків скломаси [42, 72, 75]. Система керування перемикає газові потоки в парах пальників таким чином, щоб одна працювала на горіння палива, а друга на нагрівання насадки. Через фіксований проміжок часу відбувається перемикання газових потоків (реверс). Це дає можливість оптимізувати витрати пального по пальниках печі [69, 92]. На виробництві системи керування реалізовані у вигляді двоконтурних (каскадних) АСР (автоматизована система регулювання). Вдосконалення існуючої АСР спрямовано на мінімізацію витрати пального по пальниках печі з незмінними показниками ефективності виробництва.

Під час вирішення поставленої задачі – оптимального використання газу, необхідно також врахувати керування температурою пального, що подається на горіння та витратою повітря (формування співвідношення газоповітряної суміші). Технологічні особливості АСР по подачі пального залежать від геометричних розмірів, конструкційних особливостей печі – способу подачі полум'я на горіння, кількості пальників та регенерації тепла [72, 107, 108].

Системи розрізняються за типом регулювання: позиційне (по кожній зоні окремо) та по пальниках (вибір пальника з пари – реверс), а також за режимом переключення факела – по температурі (за показами термопар), по температурі регенератора та можливі варіанти за заданим часовим критерієм – не залежно від значення показів термопар відбувається реверс полум'я пальників [86]. Автоматичний цикл переводу відбувається з можливістю програмування пауз для продувки окремо кожної зі сторін печі (відповідно ліва та права).

В сучасній технології керування процесом скловаріння здійснюється з використанням *SCADA*-систем [8], однак *SCADA*-система у свою чергу представляє собою лише програмний засіб для спрощення задачі контролю та керування. До складу системи керування входять три інформаційно-керувальні блоки – програмований мікроконтролер, панель оператора (контроль перебігу процесу), інформаційна система (контроль вимірювальних величин). Перший блок відноситься до нижнього рівня системи автоматики (датчики, виконавчі механізми, мікроконтролер), другий і третій – до верхнього рівня системи автоматики (експертна система, автоматизоване робоче місце оператора). Програмований мікроконтролер – містить в собі ряд локальних регуляторів (контурів керування), зібрані в єдиному блоці, разом з пиччю підключені по принципу двоконтурних АСР [107-110].

4.1. Вибір та дослідження критерію оптимальності

Для системи керування тепловим режимом печі основним визначальним параметром виступає мінімізація витрати пального. Одним із способів отримання необхідних результатів є досягання оптимального температурного режиму роботи скловарної печі, що відповідає за прогрівання скломаси, яка, виходячи з результатів досліджень п.3.3, являє собою неоднорідну структуру (приведено на рис. 3.32-3.33). Виходячи з особливостей процесу плавлення шихти, до критерію оптимальності висувається ряд вимог: оперативність, економічність, адекватність [31, 35].

Під оперативністю критерія оптимальності розуміють швидкість реакції на подачу газу по пальниках та керування реверсом факелу, при зміні значення показників вимірювання температури температурного поля скломаси [67]. Як негативні наслідки затримки в роботі регулятора керування подачі газу на пальник (збільшення/зменшення) чи затримка передачі сигналу на реверс пальників буде неякісне прогрівання та розплавлення шихти, що у свою чергу веде до неоднорідності скломаси.

Головною задачею системи керування тепловим режимом печі є мінімізація витрати пального. Для отримання необхідних результатів потрібно досягти оптимального температурного режиму роботи скловарної печі. У цьому випадку критерій оптимальності системи керування доцільно сформулювати з відхилень поточних значень температури скломаси від заданих. Згідно з показами технологів (експертів) виробництва відхилення не повинно перевищувати 5% (загальне, по всіх точках перехідного процесу).

Основним завданням для кожного підприємства, виробництва, компанії тощо – є покращення техніко-економічних показників. У скловарному виробництві до техніко-економічних показників відносяться зниження витрати пального при незмінних показниках якості вихідної продукції. Виробництво скломаси дуже енерговитратне, як вже згадувалось неодноразово в попередніх розділах. Затрати на пальне в декілька разів перевищують решту загальних затрат на виробництво, тобто

витрати на шихту, склобій, логістику. Таким чином, основним показником якості керування буде виступати оптимальний об'єм витрати газу по пальниках, в подальшому це критерій оптимальності.

Вимоги до критерію оптимальності будуть формуватися по відношенню до кількості виготовленого продукту (скломаси) за проміжок часу:

- частка браку $I1$ = кількість браку / кількість скломаси всього;

із зазначеного вище до браку відносимо барботаж, тобто наявність в скломасі бульбашок та шлірів, а в результаті в готовому склі представлено на рис 3.34

- витрата газу по пальникам $I2$ = об'єм газу по пальникам / кількість скломаси всього.

Виходячи з висновків попередніх досліджень (розділ 1) основним параметром керування виступає витрата газу, а збуренням виступає період завантаження (швидкість) шихти та склобою до печі $\Delta t_{\text{тр}}$ [5-6, 30-32]. Однак, в роботі розглядається виключно словарна піч, а робота завантажувачів відносять до загального виробництва скла, таким чином швидкість та період роботи завантажувача буде віднесено до збурення.

Варіювання витрати газу забезпечує термічну однорідність виробничого потоку та температурне поле печі з відповідними властивостями [34, 40, 46]. Таким чином показники 18 датчиків температури (рис. 3.9) залежать від витрати газу по пальниках U , де U представляє собою вектор витрати газу по кожному з пальників печі.

Задача оптимально керування визначена наступним чином: при заданій продуктивності печі та складу шихти знайти вектор витрати газу U , при якому досягається мінімум критерія керування J . Розуміти слід, що при мінімально-допустимому значенні критерію керування, витрати пального необхідно підтримувати такими при яких тепловий режим печі зберігається на заданому технологічному регламенті рівні.

$$J(T_i(t), u_i) = \sum_{i=1}^L \left(k_1 (T_i^*(t) - T_i(t))^2 + k_2 u_{i-1}^2 \right),$$

u – являє собою вектор витрати газу по пальниках та виступає в ролі набору керувань, що мінімізують критерій J , k_1 , k_2 – вагові коефіцієнти, T^* – температура скломаси, що виміряна за показниками термопар у відповідних точках їх встановлення, T – заданні значення температури скломаси технологічним регламентом у відповідних точках виміру, L – кількість вимірів температури.

Температури скломаси в точках виміру повинні відповідати вимогам: $T_{i_min} < T_i < T_{i_max}$ ($i=1..18$), при значенні T_i менше T_{i_min} , буде відбуватися недогрівання та брак готової продукції (зниження об'ємів вихідного продукту), при значенні T_i більше за T_{i_max} перегрів (зайва витрата пального).

Тепло, що виділяється при згоранні палива, формує деякий розподіл температур газового простору в поперечних перерізах та по довжині печі (рис. 3.10-3.11). Робота пальників є взаємозв'язаною. Також температура відпрацьованого газу впливає на кількість тепла, що підігріває повітря в регенераторі та складає до 26,5% від загальної кількості необхідного для підігрівання тепла [30, 47], зменшується протягом інтервалу часу між переведеннями (реверсом) напрямку полум'я внаслідок охолодження насадок регенератора. Тепловий режим газового простору печі представимо рівнянням в векторно-матричній формі [6, 26, 34]:

$$T = A \cdot u + B \cdot f$$

де $T = \{T_1, T_2 \dots T_n, T_{n+1}\}^T$ – вектор температур скломаси (T_i – температура в точці вимірювання i -го пальника, T_{n+1} – температура в зоні студки), $u = \{u_1, u_2 \dots u_n, u_{n+1}\}^T$ – вектор витрати палива по пальниках, керуюча дія, $f = \{f_1, f_2 \dots f_n, f_{n+1}\}^T$ – вектор температури насадок регенераторів, може перетворитися в некероване збурення, якщо не контролювати витрату вихідних газів $F_{\text{вих.газ}}$ (нагріває насадку при відводі – представлені в параграфі 1.3), як параметр, що відповідає за нагрів повітря на вході до пальників, A, B – матричні коефіцієнти за каналами керування, дана формула враховує можливе збурення, що вносяться зміною температури підігрітого в регенераторах повітря.

На основі попередніх розділів в яких наведено дослідження та моделювання фізичних процесів, що відбуваються при варінні скла, в даному параграфі розраховується оптимальний критерій керування – підтримання технологічного регламенту роботи печі, при мінімально допустимій загальній витраті палива. Вектор температур скломаси T^* являє собою уставку для верхнього рівня системи керування [6, 38]. Цей вектор, внаслідок можливої зміни умов варіння скломаси, повинен періодично підлягати уточненню – температура скломаси (необхідна зміна), змінюючи витрату палива.

В кінці i -го інтервалу часу, між переведеннями напрямку полум'я, відбуваються наступні дії:

- за вектором температур $T_i(\tau)$, розраховують оцінку вектору температур скломаси в печі $\hat{T}_i(\tau)$, $0 \leq \tau < t_i$, де τ – поточний час, відрахований від початку інтервалу часу між переведеннями напрямків полум'я, t_i – величина інтервалу часу між переведенням напрямків полум'я;

- знаходить середню температуру скломаси печі $\left\{ \hat{T}_i(\tau) \right\}$ в i -му інтервалі часу між переведеннями напрямку полум'я

- розраховує похибку регулювання $\Delta = \left\{ \hat{T}_i(\tau) \right\} - T^*$.

Враховуючи похибку регулювання Δ , вектор значень температури регенератору f та вектор T^* , підбираємо, на $(i+1)$ -й інтервал часу, переведення напрямку полум'я на основі:

$$\left\{ \hat{T}_{i+1}(\tau, u_{i+1}) \right\} = T^* - \Delta,$$

де $\hat{T}_{i+1}(\tau, u_{i+1})$ – розрахований прогноз вектору температур скломаси в печі на $(i+1)$ -й інтервал часу між переведеннями напрямку полум'я (розрахований за моделлю).

Вектор керування u_{i+1} розглядається в якості уставки на витрати палива по пальниках печі. До кінця $(i+1)$ -го інтервалу часу між переведеннями напрямків полум'я повторюються перераховані для i -го інтервалу дії. В алгоритмі адаптації буде відбуватися підстроювання параметра регулятора (збільшення/зменшення), що дозволить більш точно розраховувати вектор керуючих дій u і досягати того, щоб виконувалось співвідношення:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \{T_i(t)\} - T^* \right| > \varepsilon \right\} = 0, \quad \varepsilon > 0, \quad (4.1)$$

де t – час, P – ймовірність випадкової події (кількісна міра можливості реалізації простору подій), ε – певне додатне число. Таким чином перед безпосередньо розрахунком критерію керування, приведено врахування похибки регулювання.

В розробленій системі керування використана розроблена та апроксимована (розділ 2, 3) математична модель скловарної печі, що, відображає зміну температур у відповідних точках скломаси. В системі передбачено формування послідовності вхідних керуючих дій u_i . Задача адаптивного керування передбачає необхідність задоволення визначеного, заданого раніше, розподілу температур в об'ємі скломаси [31, 46]. Раніше наведений критерій керування, що відповідає функціоналу $J(T_i(t), u_i)$, прийме вигляд:

$$J_i = \sum_{\tau=1}^L \left(k_1 \left(T_i^*(\tau) - T_i(\tau) \right)^2 + k_2 u_{i-1}^2(\tau) \right),$$

де τ – поточний час (момент часу).

Таким чином отриманий критерій мінімізує суму квадратів різниць між векторами температур скломаси $T_i^*(\tau)$ та $T_i(\tau)$, а також визначає набір вектору керувань $u_i(\tau)$ та використовується при постановці задачі керування тепловим режимом скловарної печі.

Запропонований критерій керування має переваги над аналогами [84, 110, 114], що виражені в наступному: враховано умови процесу виготовлення скломаси; значення критерію являє собою розширення варіантів дії $u(t)$; враховано величину відхилення температури скломаси; сформовано гнучку систему дій в процесі прийняття рішень.

Реалізація знаходження набору вектору керувань відбувається з використанням генетичного алгоритму (розв'язок задач оптимізації та моделювання шляхом послідовного підбору, комбінування та варіації шуканих параметрів) [120].

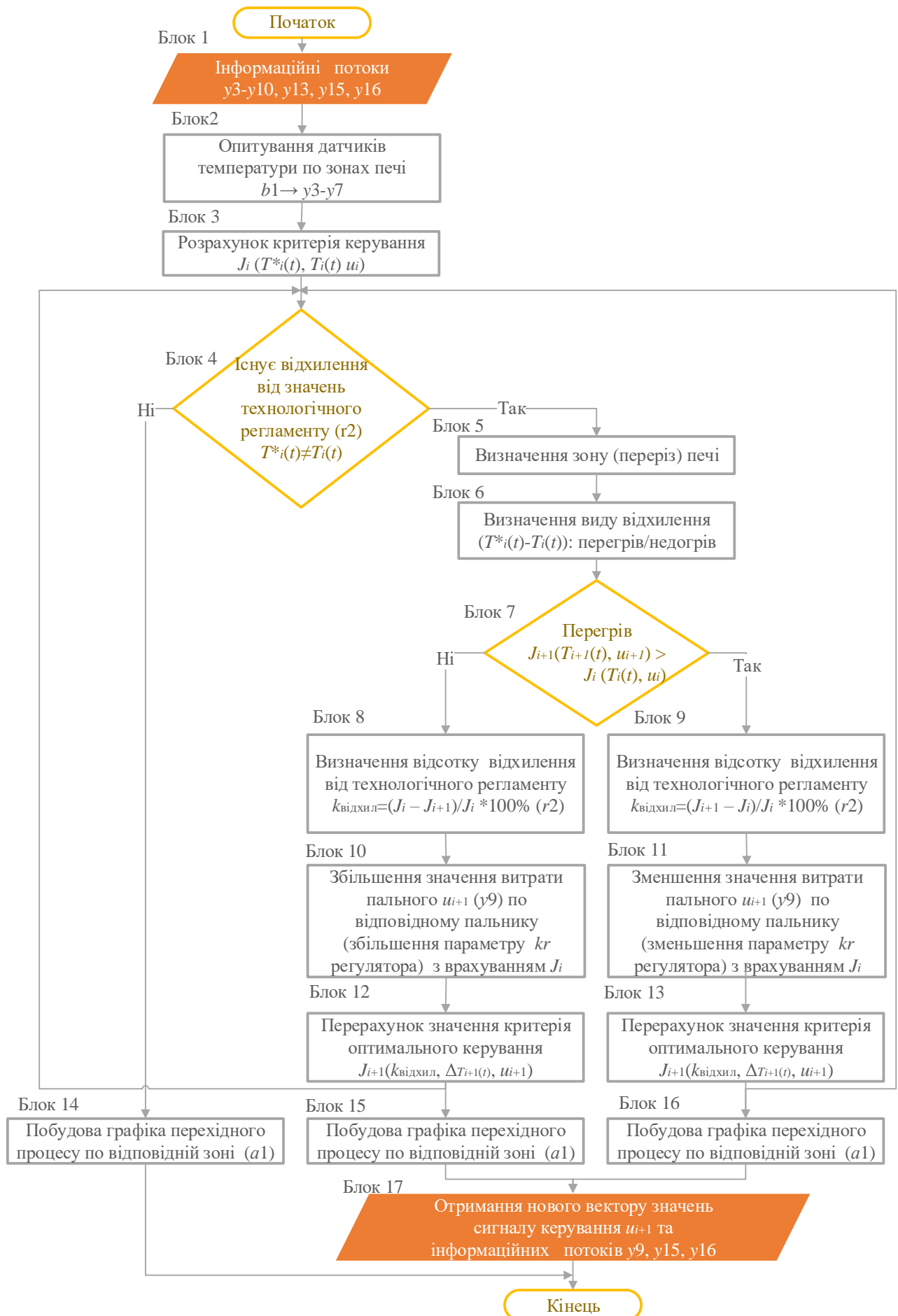


Рисунок 4.1. Структурна схема алгоритму керування

4.2. Система програмного керування процесом варіння скломаси

4.2.1 Дослідження каскадної системи керування скловарною піччю

При синтезі адаптивної та нечіткої системи керування доцільно спиратись на результати роботи існуючої системи, щоб мати можливість співставити результати та виявити переваги розроблених в роботі систем керування. Основною задачею системи керування є підтримка заданого значення технологічних параметрів скловарної печі, що визначені даними технологічного регламенту.

На виробництві використовують каскадну систему керування скловарною піччю. Регулятори контуру стабілізації та контуру корекції реалізують ПД-закон регулювання, об'єкт контуру стабілізації представляє собою палиник, а контуру коригування – скломасу.

На основі аналізу попередніх досліджень існуючих систем керування, що використовуються на виробництві [15, 107-110], структура класичної системи керування представлена на рис.4.2. Розроблена та апроксимована в попередніх розділах модель скловарної печі використовується в блоці об'єктів керування.

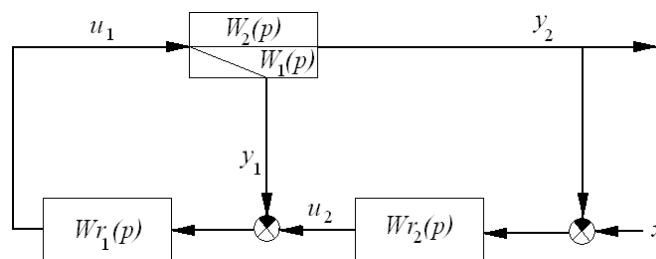


Рисунок 4.2 Структурна схема каскадної АСР скловарної печі

Скловарна піч умовно поділена на 7 зон відповідно до точок вимірювання температури скломаси. Кожна пара пальників у відповідній зоні містить власний регулюючий блок (контур). На рис. 4.2 об'єкт1 – палиник, об'єкт2 – скломаса, регулятор1 – регулятор стабілізуючого контуру, регулятор2 – регулятор коригуючого контуру, X – вхід до системи, $Y1$ – вихід об'єкта 1, $Y2$ – вихід об'єкта 2, $U1$ – керуюча дія в контурі стабілізації, $U2$ – керуюча дія контуру коригування.

Фактично регулятор стабілізуючого контуру $W_{r1}(p)$ реалізує ІІІ-закон керування, що значно спростить процес налаштування даного контуру [15, 98].

Для відбору аналогових сигналів з термопар використовується промислова мережа, що дозволило скоротити витрати часу на монтаж дротів по цеху для передачі сигналу на пульт оператора. Це пов'язано з тим, що віддалені модулі встановлюються поблизу групи датчиків, а підключення до центрального щита управління здійснюється кабелем зі стандартним інтерфейсом і кабелем живлення [15, 72, 82, 84, 111]. Параметри з промислової мережі передаються в цифровому вигляді, це виключає наведення завад на сигнали. В подальших дослідженнях планується поставити задачу заміни принципу передачі сигналу від датчиків до керуючих пристроїв бездротовою системою передачі сигналу.

Для дослідження каскадної АСР необхідно перетворення її до еквівалентної на базі регулятора контуру коригування. Виходом системи керування є вихід об'єкту 2 – температура скломаси, а входом до системи керування (x) – задані умови теплового режиму [15, 104]. Еквівалентна система керування представлена на рис. 4.3.

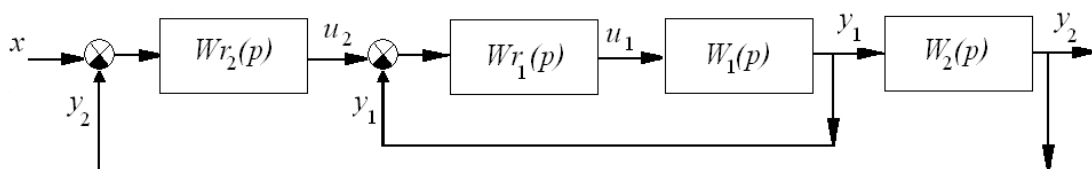


Рисунок 4.3 Еквівалентна структурна схема каскадної АСР скловарної печі

Синтезувати систему керування скловарної печі можливо різними способами, в даному випадку найбільш доцільно використовувати математичний пакет *MathLab* та засоби моделювання *Simulink* [112]. Еквівалентну структурну схему каскадної АСР реалізуємо таким чином, що дозволить синтезувати регулятори обох контурів. Внаслідок того, що математична модель об'єкту керування представляє собою об'єкт з розподіленими параметрами, для задачі синтезу системи керування використано передатну функцію в конкретному перерізі печі (для конкретної пари пальників), параметри передатної функції пальника розраховані згідно параметрів технологічного регламенту [15, 30, 71].

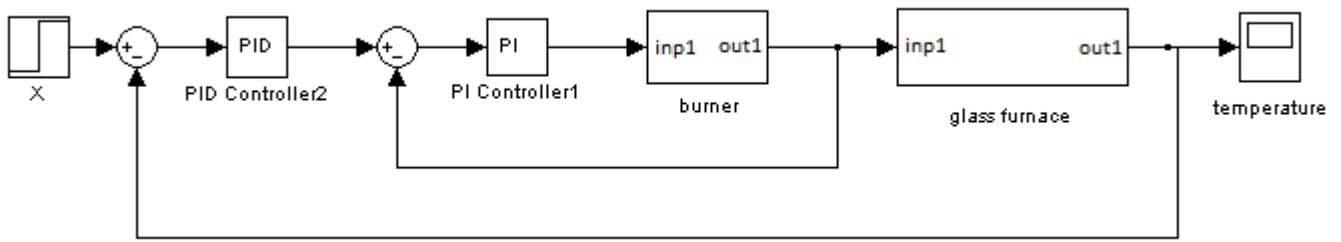


Рисунок 4.4 Реалізація каскадної АСР скловарної печі за допомогою *MathLab* та *Simulink*

На схемі, що зображена на рис.4.4 PI – регулятор контуру стабілізації ($W_{r1}(p)$), а PID – регулятор контуру корекції ($W_{r2}(p)$). Процес синтезу системи будемо виконувати методом перехідного процесу за допомогою ітерацій (коли на кожному кроці розраховується приведена АСР), один з регуляторів умовно відносять до еквівалентного об'єкта [15].

Отримані значення параметрів налаштування регуляторів відповідних контурів наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Результати прикладу синтезу контурів каскадної системи керування роботи скловарної печі

Контур	Kr	Ti	Td
Стабілізації	1,457	4	-
Корекції	0,875	5	1,65

Отримано графіки перехідного процесу за допомогою блоку *Scope* середовища імітаційного моделювання *Simulink*, представлений на рис 4.5.

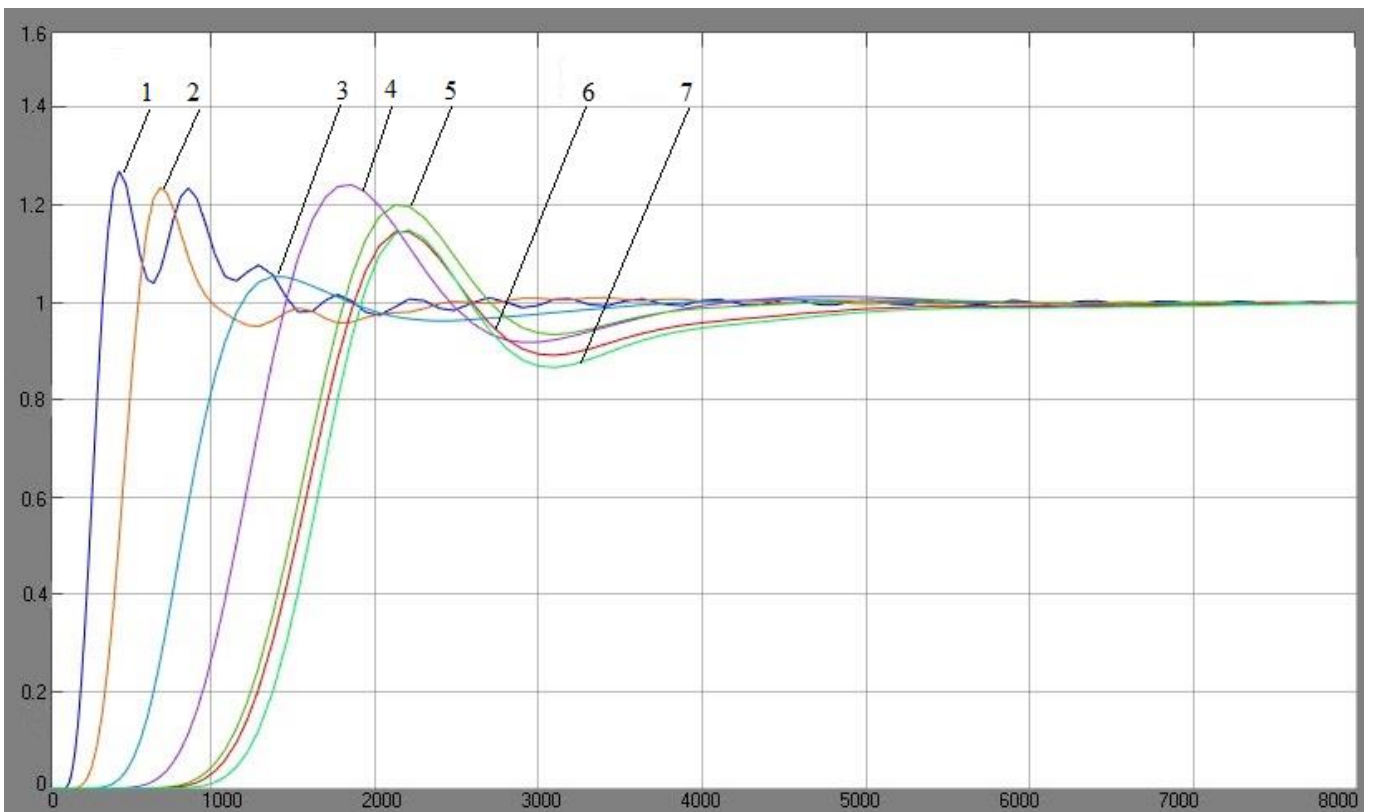
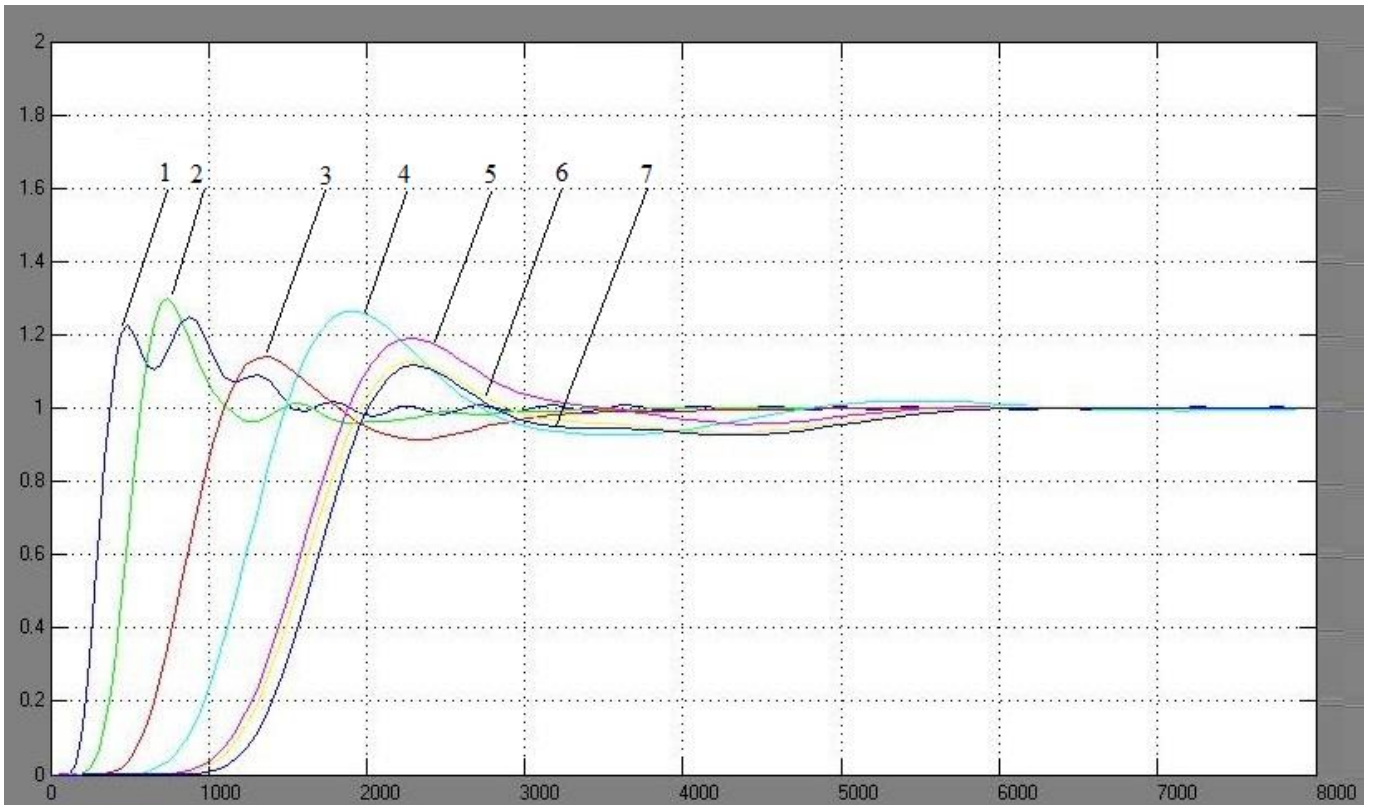


Рисунок 4.5 Перехідні процес АСР скловарної печі за каналом керування по всіх зонах печі (1-7 – відповідно перша-сьома зони)

В попередніх розділах була розроблена модель об'єкту керування, також досліджено засоби спрощення моделі. Отримана модель була використана, як

об'єкт контуру коригування каскадної АСР керування температурним режимом. Отримано приклад перехідного процесу нагрівання скломаси в перерізі печі (для конкретних параметрів моделі та граничних умов, що відповідають даному перерізу – перша зона). З отриманих результатів видно, що відбувається перегулювання та в системі присутні коливання, які негативно впливають на тепловий режим скловарної печі, зміна параметрів якого призводить до браку готової продукції [15].

Отримані результати синтезу системи підходять тільки для конкретного набору коефіцієнтів моделі об'єкту керування, тобто розглянуто відповідний переріз печі та дві пари пальників. Під парою пальників розуміють пальники, що розміщені один навпроти другого. Необхідно врахувати всі варіанти набору коефіцієнтів моделі скловарної печі. Розглянута структура каскадної системи керування скловарною піччю ванного типу – є типовою для процесу виробництва скла [6, 38, 111].

4.2.2. Розроблення блоку керування АСР тепловим режимом скловарної печі

В розділі 1 приведено типову АСР керування тепловим режимом скловарної печі та виявлено її недоліки, що можуть виникнути під час роботи та як вони вплинуть на якість готового продукту (температуру розплаву скломаси). Якість скломаси визначається точністю підтримки набору параметрів на різних етапах технологічного процесу варіння. В попередньому розділі досліджено систему керування температурним полем скловарної печі. Для дослідження системи керування тепловим режимом скловарної печі використовуватимемо методи системного аналізу, що мають більш широкі можливості у порівнянні з іншими методами дослідження [16, 90, 113]. При формуванні алгоритму системи керування для технологічного процесу виготовлення скломаси, використовують критерій керування отриманий в параграфі 4.1 [114]. Для реалізації алгоритму використана

універсальна мова програмування *UML*, що надає максимально широкі можливості для реалізації поставлених в дисертаційній роботі задач.

На теоретично-множинному рівні технологічний процес може бути представлений у вигляді відображень [16, 91, 113] :

$$T_n: A \times B \times Y_{inp} \times R \rightarrow Y_{out}, 1 \leq n \leq N.$$

Таблиця 4.2 Значення елементів блоків

Елемент	Характеристика елемента
a_1	Алгоритм виготовлення скломаси
a_2	Оператор SCADA-системи керування процесом
b_1	Опитування вимірювальних пристроїв в точках виміру
b_2	Вимірювання витрати пального
b_3	Включення в роботу регенераторів
b_4	Реверс полум'я
b_5	Кут повороту димового шиберу
b_6	Аварійна ситуація
b_7	Швидкість завантаження шихти
r_1	Критичне значення параметру тиску
r_2	Показники температурного режиму
r_3	Матеріальний баланс
y_1	Покази датчиків рівня скломаси
y_2	Вихідний добовий об'єм отриманої скломаси
y_3	Температура газу при вильоту з пальника
y_4	Покази термопари склепіння
y_5	Покази температури на поверхні скломаси (пірометр)
y_6	Покази термопари дна
y_7	Температура регенераторів

y_8	Час роботи по кожному з пальників
y_9	Витрата газу по пальникам
y_{10}	Співвідношення газ-повітря
y_{11}	Спостереження за формою факела та покриття дзеркала скломаси
y_{12}	Кут димового шибера
y_{13}	Робота регенераторів
y_{14}	Швидкість роботи завантажувача шихти та склобою
y_{15}	Зміна витрати газу по пальникам
y_{16}	Сигнал реверсу полум'я

де $A=\{a_1\dots a_n\}$ – блок активних елементів системи керування, $B=\{b_1\dots b_n\}$ – блок базових функцій, $R=\{r_1\dots r_n\}$ – блок технологічного регламенту, що накладені на показники системи та відповідає технологічному процесу, $Y=\{y_1\dots y_n\}$ – блок інформаційних потоків в системі [16].

Відображення T_n будуть мати наступний вигляд:

Таблиця 4.3 Значення відображень в залежності від елементів блоків

Відображення T_n	Вхідні				Вихідні
	активні елементи	базові функцій	технологічний регламент	інформаційні потоки	інформаційні потоки
T_1 - показання датчиків вимірювання	a_1	b_1	r_1, r_2, r_3	-	$y_1 - y_{10}$
T_2 - кут повороту димового шибера	a_1	b_5	r_1	-	y_7, y_{12}
T_3 - витрата газ-повітря	a_1	b_2	r_2	$y_3 - y_{10}$	y_{15}
T_4 - робота регенератора	a_1	b_3	r_2	$y_4 - y_{10}$	y_{13}
T_5 - робота завантажувача	a_1	b_7	r_3	$y_1 - y_2$	y_{14}

T_6 - реверс факелу пальника	a_1	b_4	-	$y_4 - y_{10}$	y_{16}
T_7 - візуальний контроль	a_2	-	r_1, r_2, r_3	-	y_{11}
T_8 - дія при аварійній ситуації	a_1, a_2	b_6	r_1, r_2, r_3	$y_1 - y_{11}$	$y_{13} - y_{16}$
T_9 - зміна параметрів тех. процесу	-	-	r_1, r_2, r_3	$y_1 - y_{11}$	y_{16}

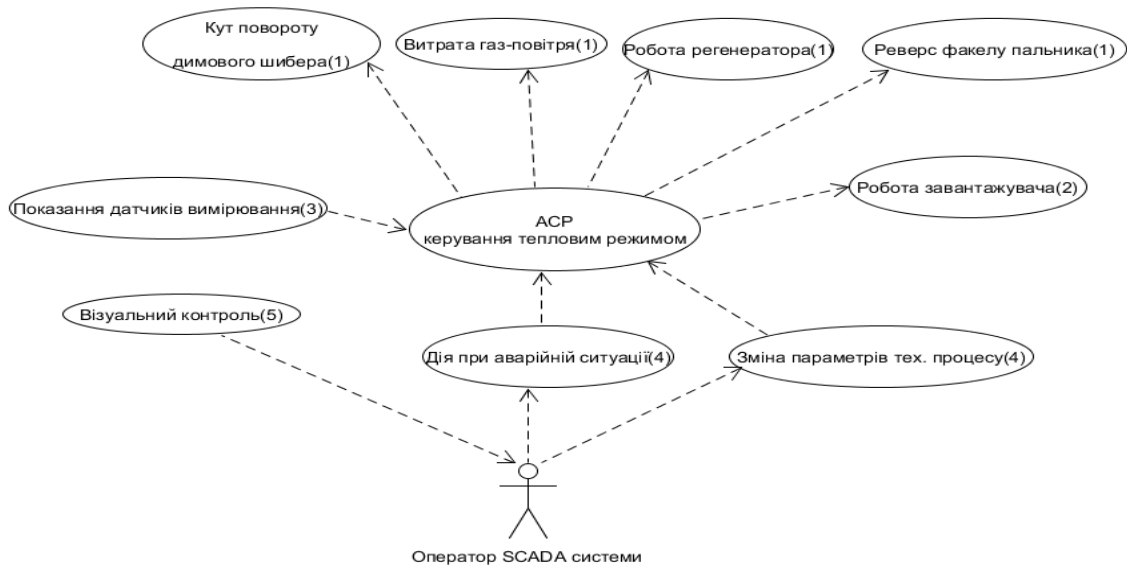


Рисунок 4.6 Створення АСР скловарної печі за допомогою діаграми варіантів (*Use-case diagram*) UML.

На схемі під нумерацією позицій представлені: 1 – керування тепловим режимом печі, 2 – керування матеріальним балансом печі, 3 – передача даних системі керування, 4 – можливі дії оператора, 5 – візуальний контроль оператора. Фактично отримано два рівня керування – АСР теплового режиму та оператор SCADA системи. Виходячи зі схеми рис. 4.6., АСР являє собою нижній рівень керування процесом, а оператор – верхній рівень [16].

Взаємодія між складовими компонентами виконана за допомогою послідовної передачі повідомлень за відповідні інтервали часу. Послідовність повідомлень визначається значимістю даного повідомлення для технологічного процесу та

відповідність дій технологічного регламенту (як приклад – не можна знімати покази вихідної температури, при вимкнених пальниках та завантажувачах).

Системи керування тепловим режимом скловарної печі реалізована за допомогою діаграми класів [16, 115], що дозволяє в графічній формі описати всі складові алгоритму керування та взаємодія між ними в програмних блоках. Під класом буде розглядатися конкретна складова системи керування.

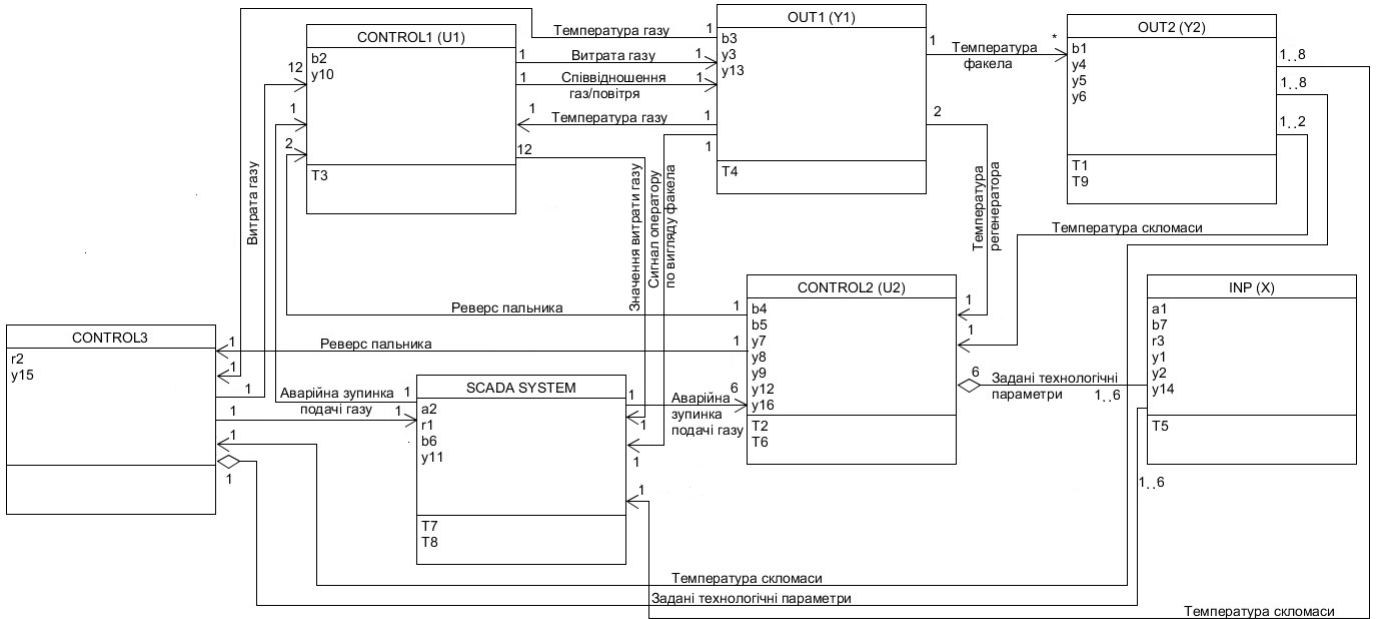


Рисунок 4.7 Створення АСР скловарної печі за допомогою діаграми класів UML.

Процеси, що відбуваються в основному регуляторі (control3 рис. 4.7) представлено на діаграмі стану [16]



Рисунок 4.8 UML діаграми стану процесу керування.

Окрім основної задачі – формування сигналу керування для пальника, основний регулятор взаємодіє з оператором системи керування шляхом передачі результатів SCADA-системі. Також алгоритмом передбачено запис значення температури в модуль пам'яті у вигляді комірки бази даних, що дасть можливість використовувати результати вимірів температури для досліджень об'єкту і системи керування [16].

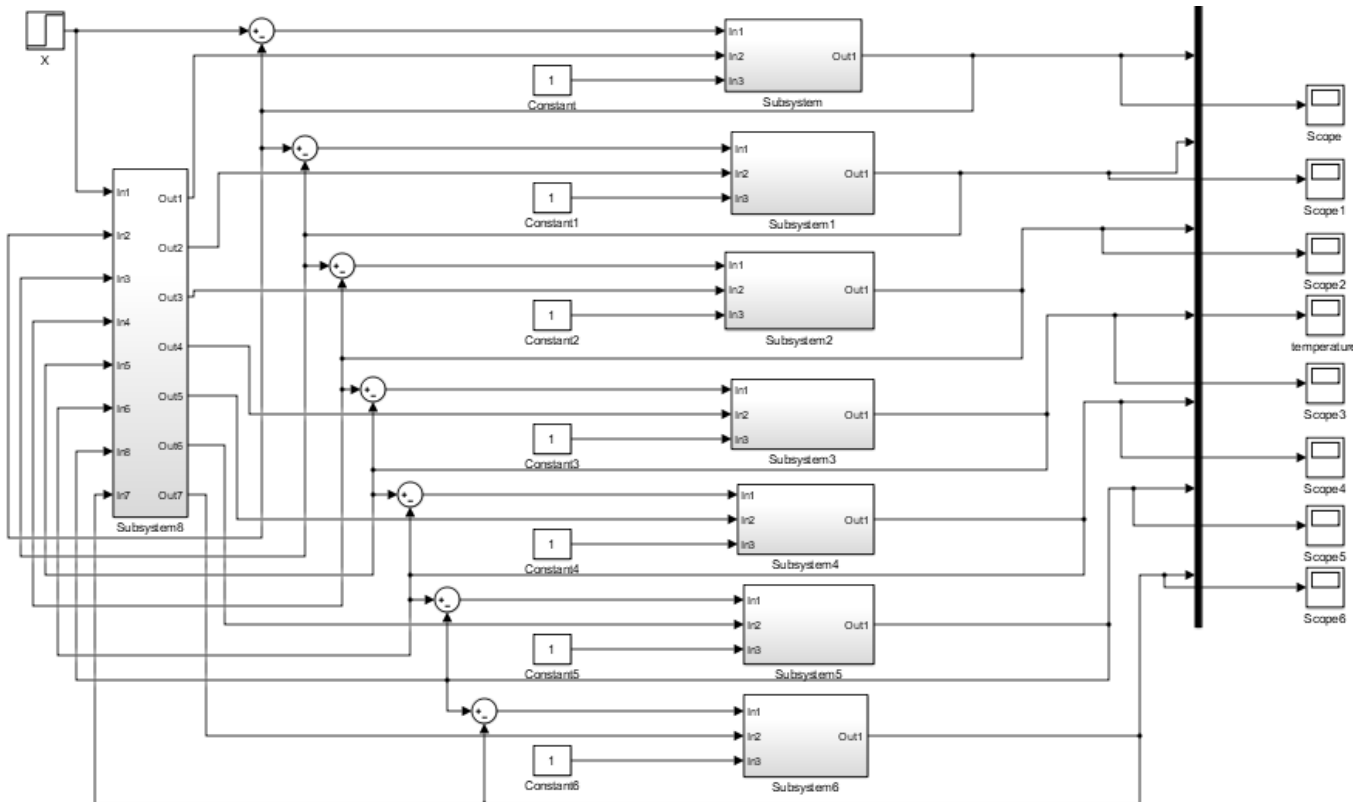


Рисунок 4.9 Реалізація АСР скловарної печі за допомогою *MathLab* та *Simulink*

Математична модель скловарної печі, яка була розроблена в розділі 2 та апроксимована в розділі 3, використана в блоці *Subsystem* – *Subsystem 6* на рис.4. [16, 112] Даний блок представляє собою фрагмент загальної системи керування скловарної печі, є підсистемою, що зменшило кількість одночасно відображених блоків, в своєму складі містить місцевий ПІД-регулятор та математичну модель печі з параметрам які відповідають поточному значенню температури в точці виміру.

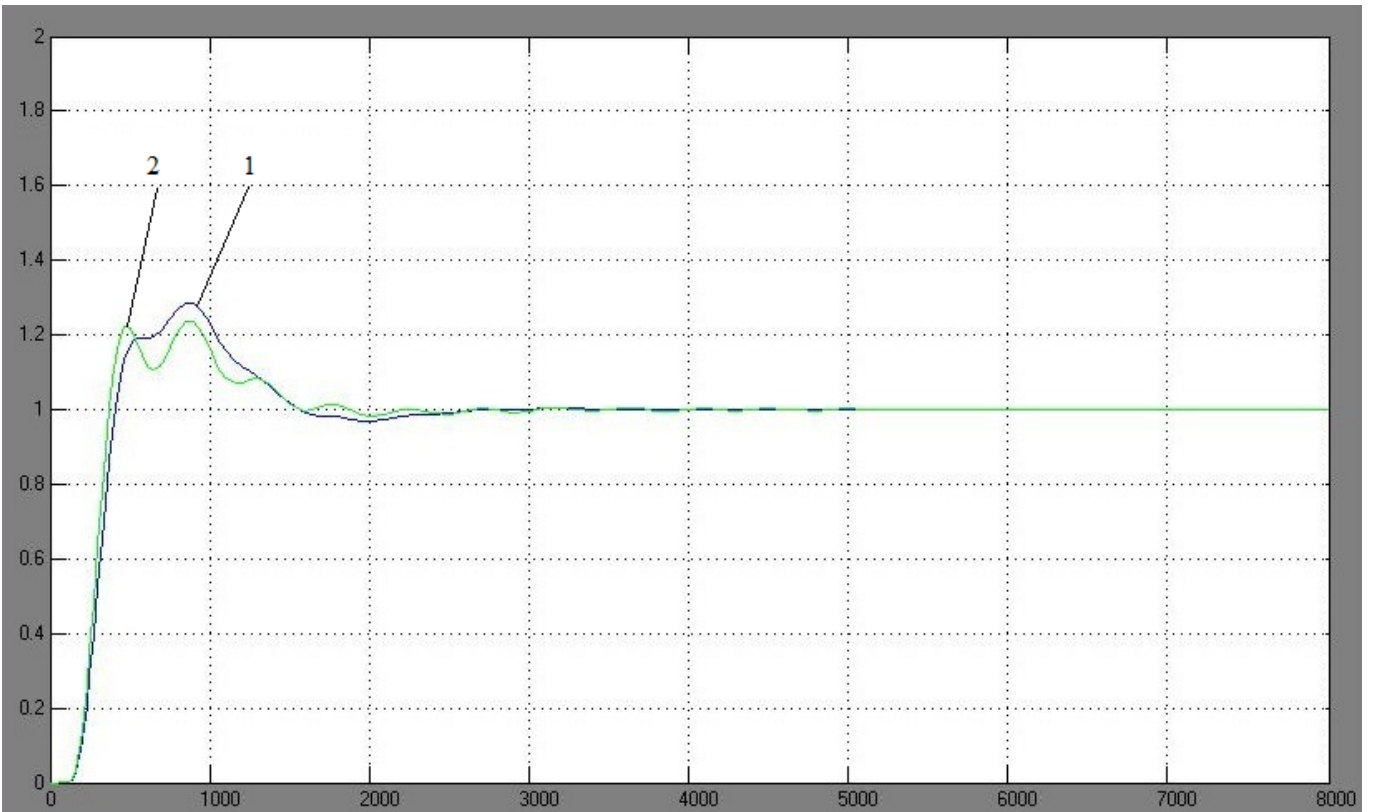


Рисунок 4.10 Перехідні процеси каскадної АСР скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2) – порівняльний графік першої зони

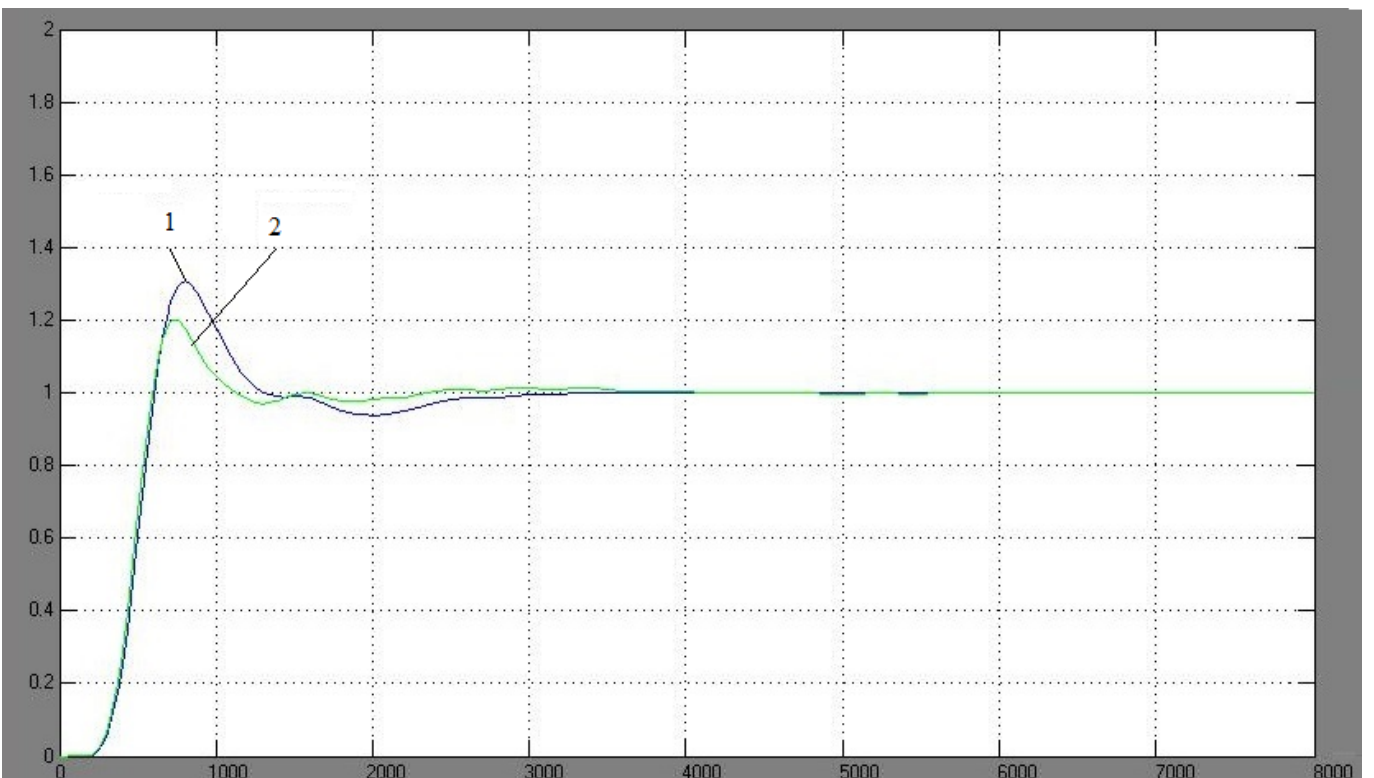


Рисунок 4.11 Перехідні процеси каскадної АСР скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2) – порівняльний графік другої зони

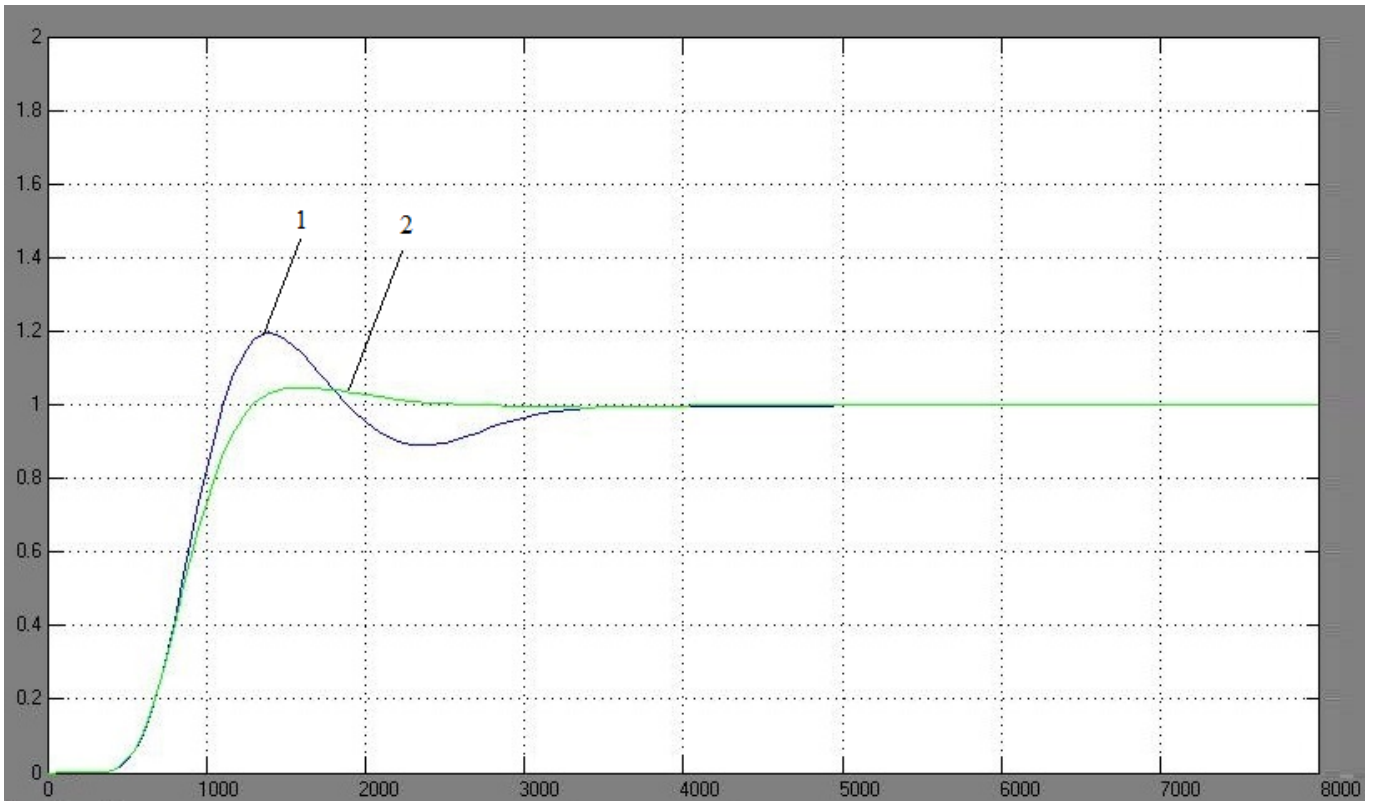


Рисунок 4.12 Перехідні процеси каскадної АСР скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2) – порівняльний графік третьої зони

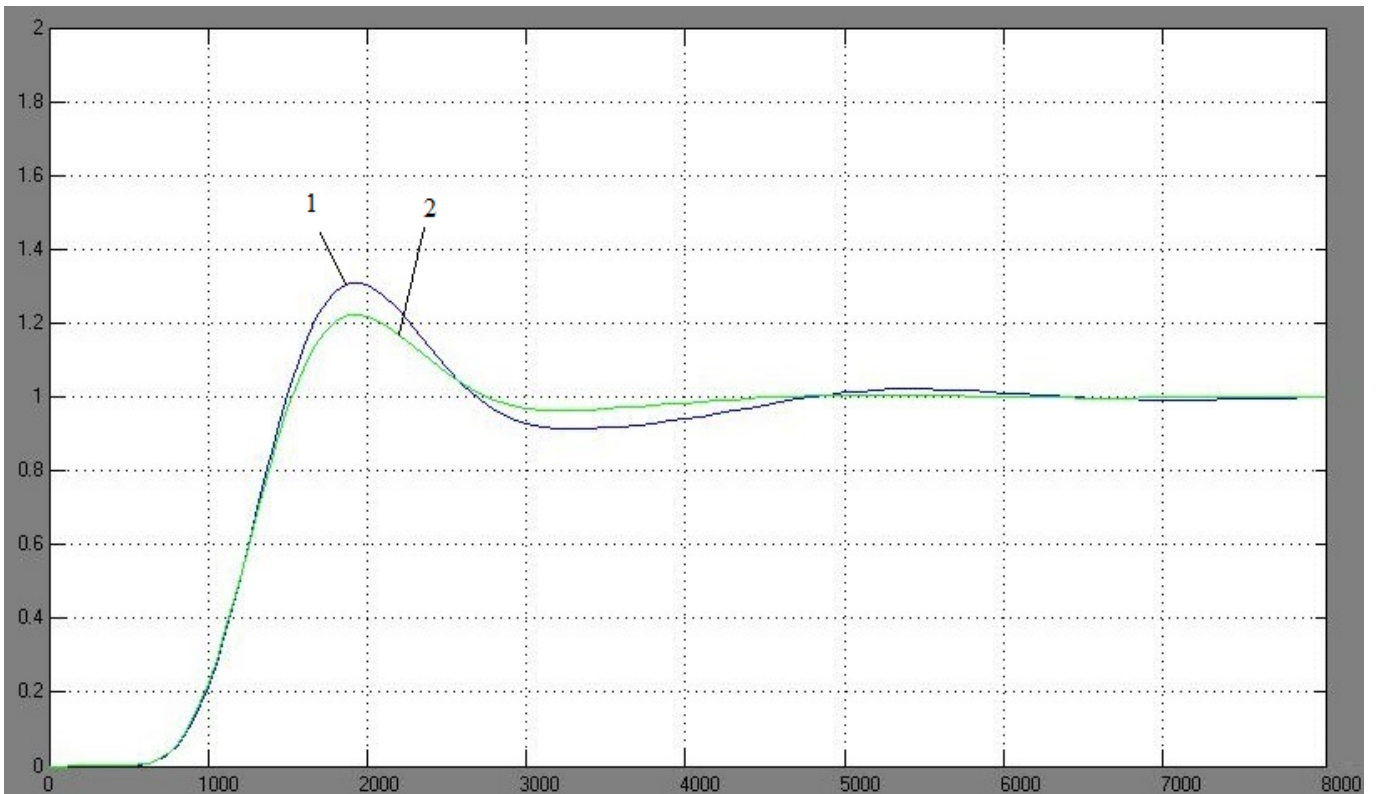


Рисунок 4.13 Перехідні процеси каскадної АСР скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2) – порівняльний графік четвертої зони

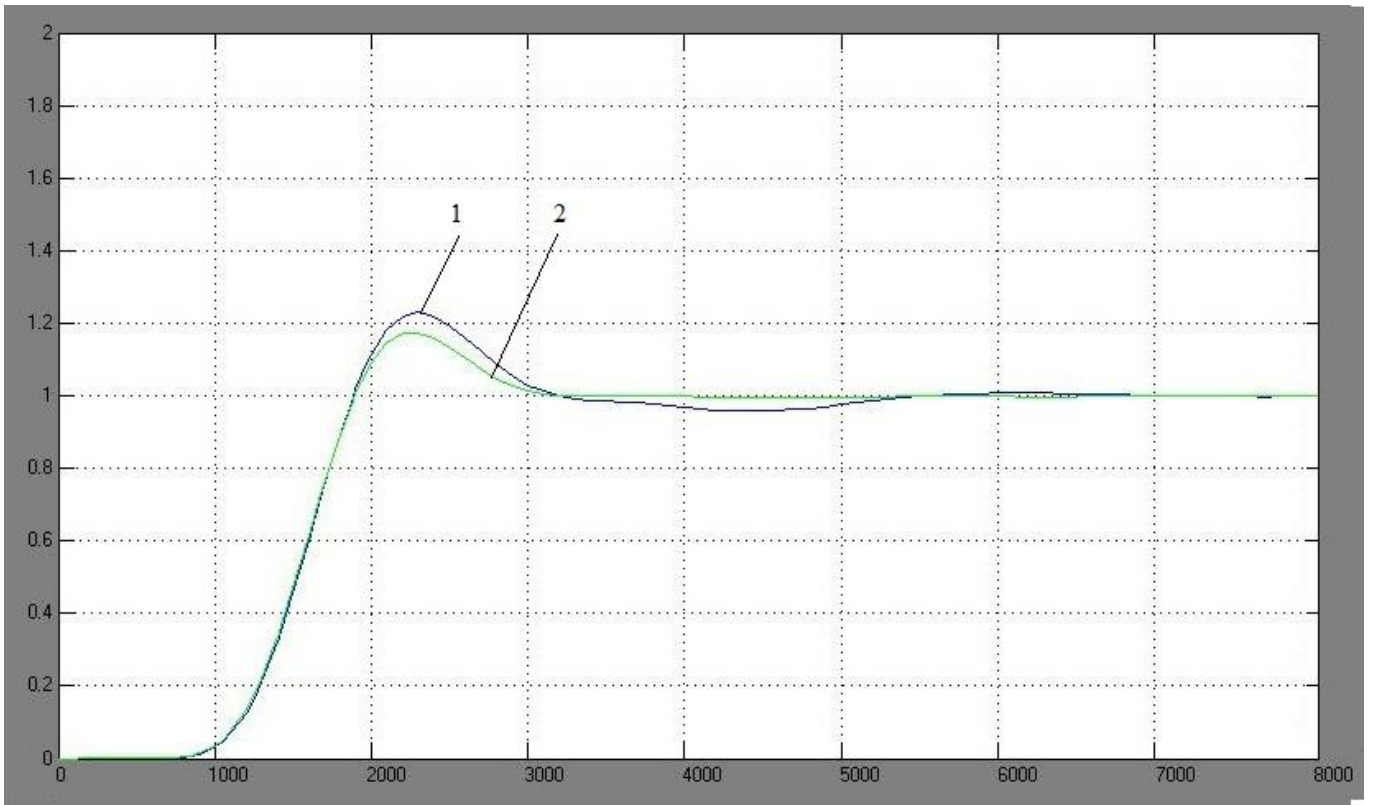


Рисунок 4.14 Перехідні процеси каскадної АСР скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2) – порівняльний графік п'ятої зони

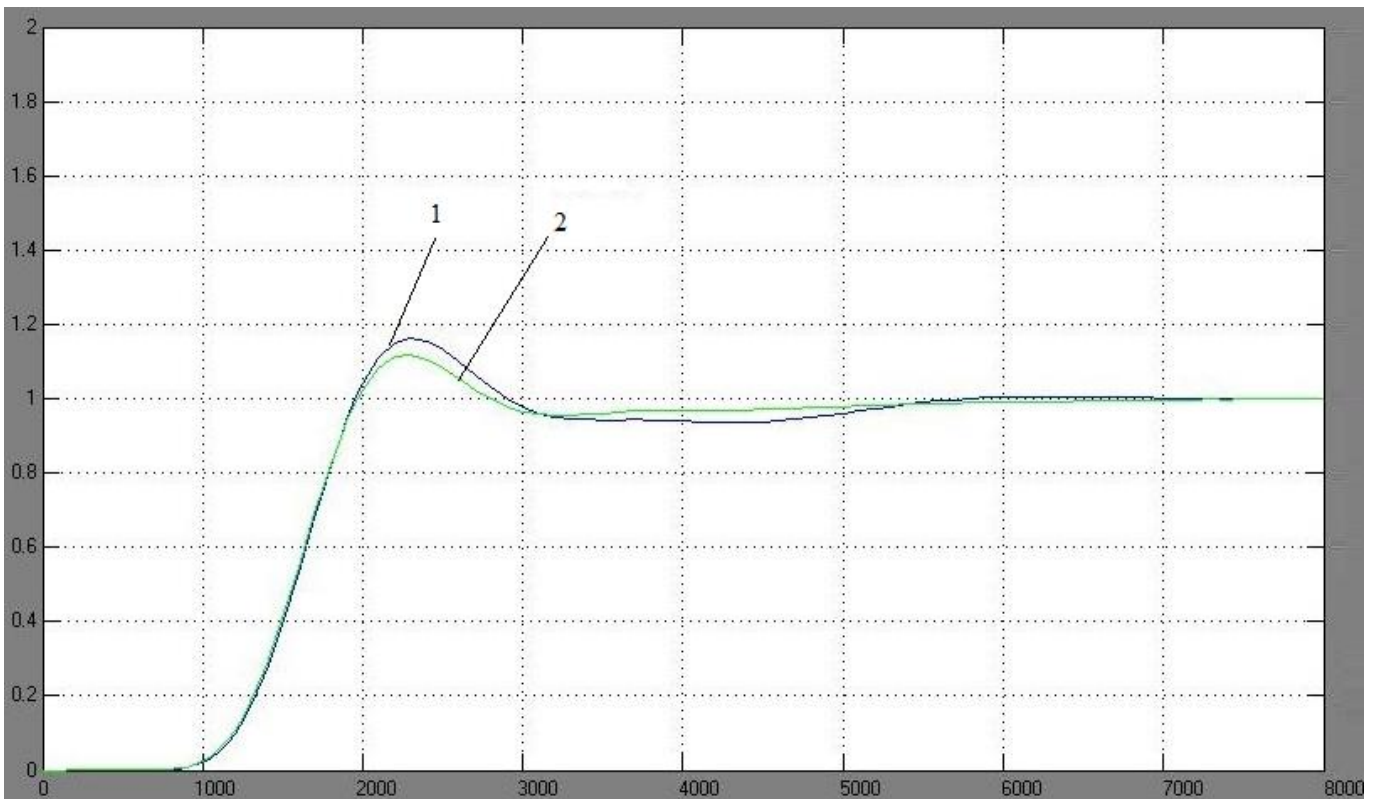


Рисунок 4.15 Перехідні процеси каскадної АСР скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2) – порівняльний графік шостої зони

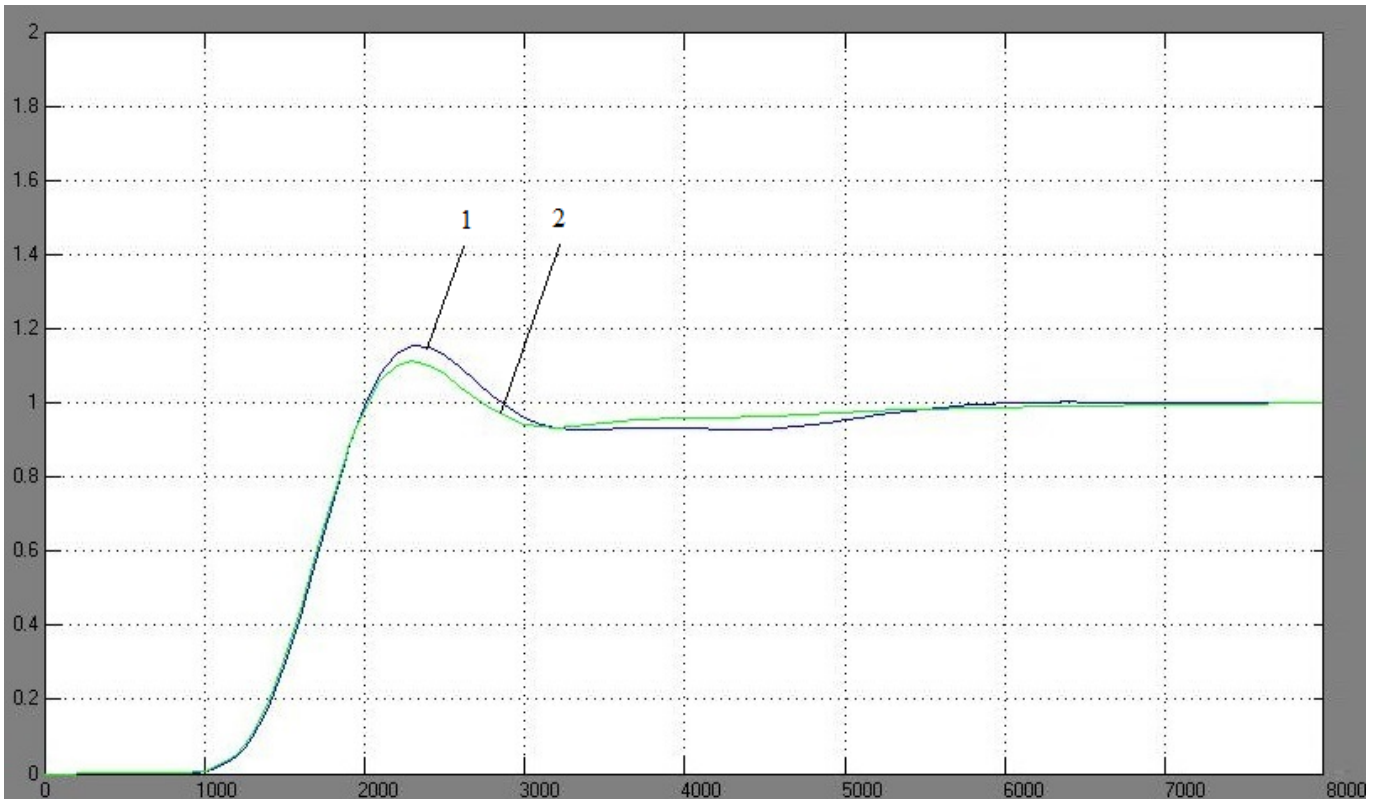


Рисунок 4.16 Перехідні процеси каскадної АСР скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2) – порівняльний графік сьомої зони

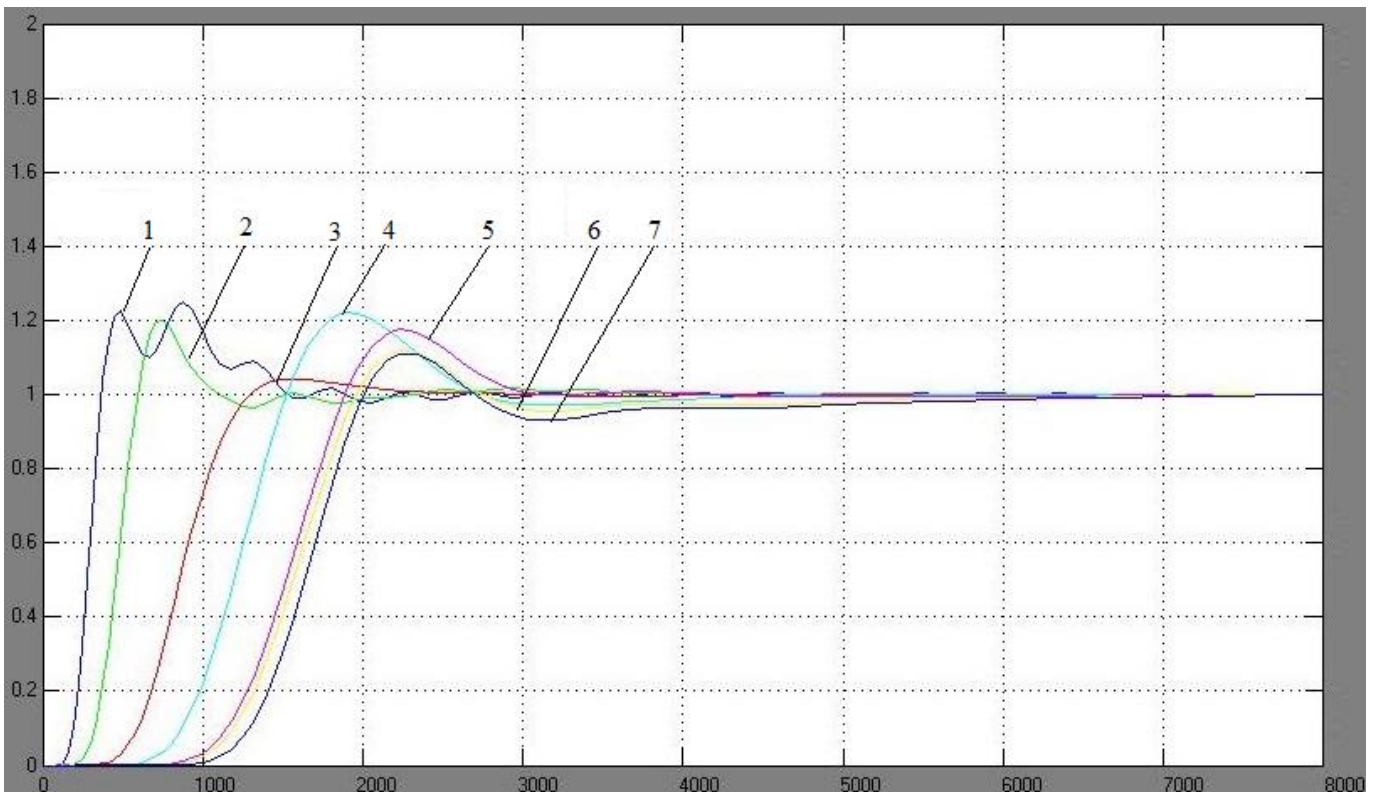


Рисунок 4.17 Перехідні процеси АСР скловарної печі з використанням загального регулятора за каналом керування по всіх зонах (1-7) печі – порівняльний графік.

Виходячи з результатів перехідних процесів по всіх зонах печі, що представлені на рис.4.10-4.16, перегулювання більше в системі з каскадним регулятором. Перерегулювання впливає на витрату пального по кожній з парі пальників - чим більше перегулювання, тим відповідно вище витрата, яку у свою чергу можна зменшити без зміни якості вихідного продукту [107, 110, 111]

4.3. Постановка задачі адаптивного керування

Після розробки системи керування технологічним процесом виробництва скломаси, основною задачею є синтез розробленої системи керування на базі розробленої моделі об'єкту керування (розділ 2 та 3). В моделі були враховані всі геометричні, конструкційні особливості регенеративної скловарної печі з поперечним поданням полум'я та дані технологічного регламенту, перевірено адекватність отриманої моделі. Розроблена в розділі 2 модель печі є універсальною та може бути використана для різних технологічних процесів де використовується піч з поперечним поданням полум'я.

Типова система керування представляє собою каскадну АСР з регуляторами, що реалізують ПІ- та ПІД-закон. Задачею регуляторів було регулювання витрати газу в пальнику, розподілення подачі газу та напрям факелу полум'я по кожному з пальників [24, 25, 70, 85]. В параграфі 4.2 практично всі поставлені в роботі питання керування тепловим режимом виготовлення скломаси (варіння скломаси) були вирішені, однак, після оцінки якості температурних полів, отриманих в розділі 3, було виявлено ряд питань, пов'язаних із зміною температурного поля скломаси після контакту теплового потоку скломаси із тепловим потоком бокових стінок та стінки дна печі, а також неоднорідності температурного поля скломаси.

Результат порівняльної роботи класичної каскадної системи та системи керування з використанням регулятора зовнішнього контуру представлені на 4.10-4.16. Якість роботи системи з використанням регулятора зовнішнього контуру має значні переваги в третій зоні (рис.4.12), але виходячи із результатів інші зони

практично без зміни. Таким чином, для зниження перерегулювання, що являє собою зайву витрату пального, розробляється адаптивна система керування скловарною піччю з оптимальною витратою газу по пальниках [24, 25].

Під час розроблення адаптивної системи керування технологічним процесом виробництва скломаси основна задача – підтримка на заданому рівні температурного режиму роботи печі, при цьому однією із основних проблем задач синтезу є наявність адекватної моделі об'єкту керування, результати роботи якої перевірені за даними виробництва.

Тепловий режим характеризує загальну витрату пального та повітря, їх розподіленням по окремим пальникам та зонам печі. Найбільша витрата тепла використовується в зоні варіння. Автоматична система регулювання розподіляє витрату газу по пальникам та зонам печі. Витрата пального збільшується від першого пальника до кавельпункту, а потім зменшується [24, 107, 108]. Основну увагу при проектуванні адаптивної системи керування слід приділити задачі розподілення пального по пальникам.

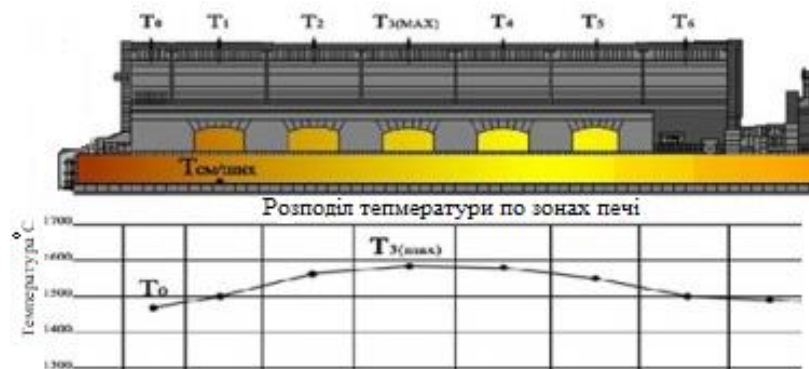


Рисунок 4.18 Температурний розподіл по зонах скловарної печі

Принцип створення системи керування тепловим режимом роботи регенеративної скловарної печі ванного типу приведено в роботі [107]. Піч відноситься до об'єктів з розподіленими параметрами, інерційних, з самовирівнюванням, з можливим збурюючим впливом. Представлено засіб здійснення переводу полум'я пальників [107, 111], однак не приведено засобу керування співвідношення газоповітряної суміші, що подається на процес горіння.

Для вирішення задачі дотримання однорідності температурного поля скломаси, в системі керування використовуємо блок адаптації до зміни значень температури в температурному полі скломаси, викликаного променевими потоками тепла, що виділяється під час горіння палива[116-118].

Основна задача, що висувається до адаптивної системи керування, яка розробляється, є підтримання на заданому рівні теплового режиму скловарної печі, що у свою чергу дає можливість максимально економічно використовувати паливо.

4.4. Розробка блоку адаптації на базі зовнішнього контуру АСК

Блок адаптації для каскадної системи керування скловарною піччю, що приведена на рис. 4.19., буде враховувати значення різниці температур (вихідних температур скломаси та заданого значення) та виробляє вектор переналаштованих параметрів регулятора.

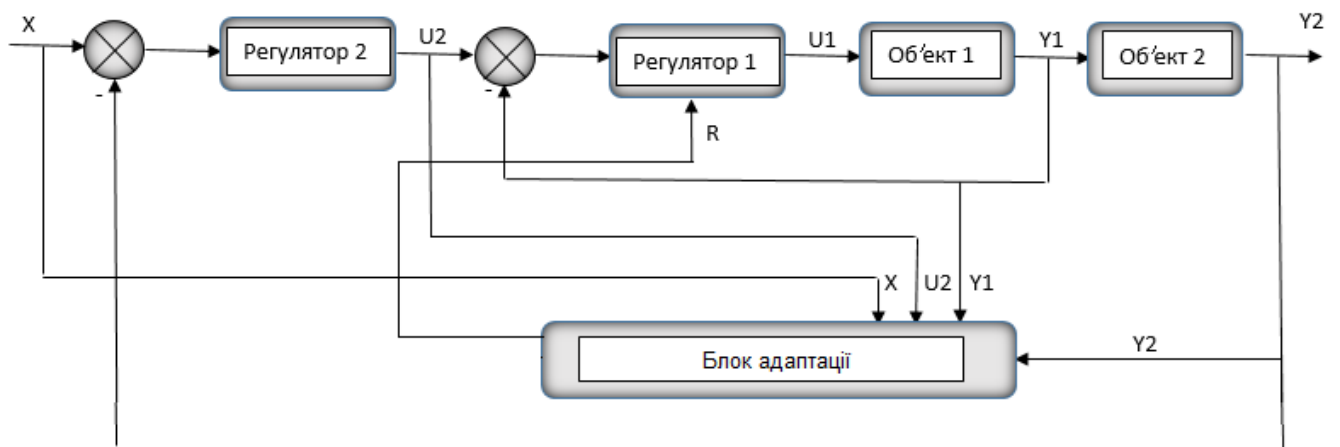


Рисунок 4.19 Структурна схема системи керування скловарною піччю з використанням блоку адаптації.

На схемі X – задане значення температури скломаси на виході з відповідної зони варіння, $Y1$ – температура газу на виході з пальника, $Y2$ – температура скломаси в характерній точці вимірювання, $U1$ – значення витрати газу, $U2$ – температура газу, R – вектор параметрів, що будуть переналаштовані [24, 25].

Якщо використовувати блок адаптації до регулятора зовнішнього контуру, що розглянутий в параграфі 4.2.2. структурна схема системи керування буде виглядати наступним чином

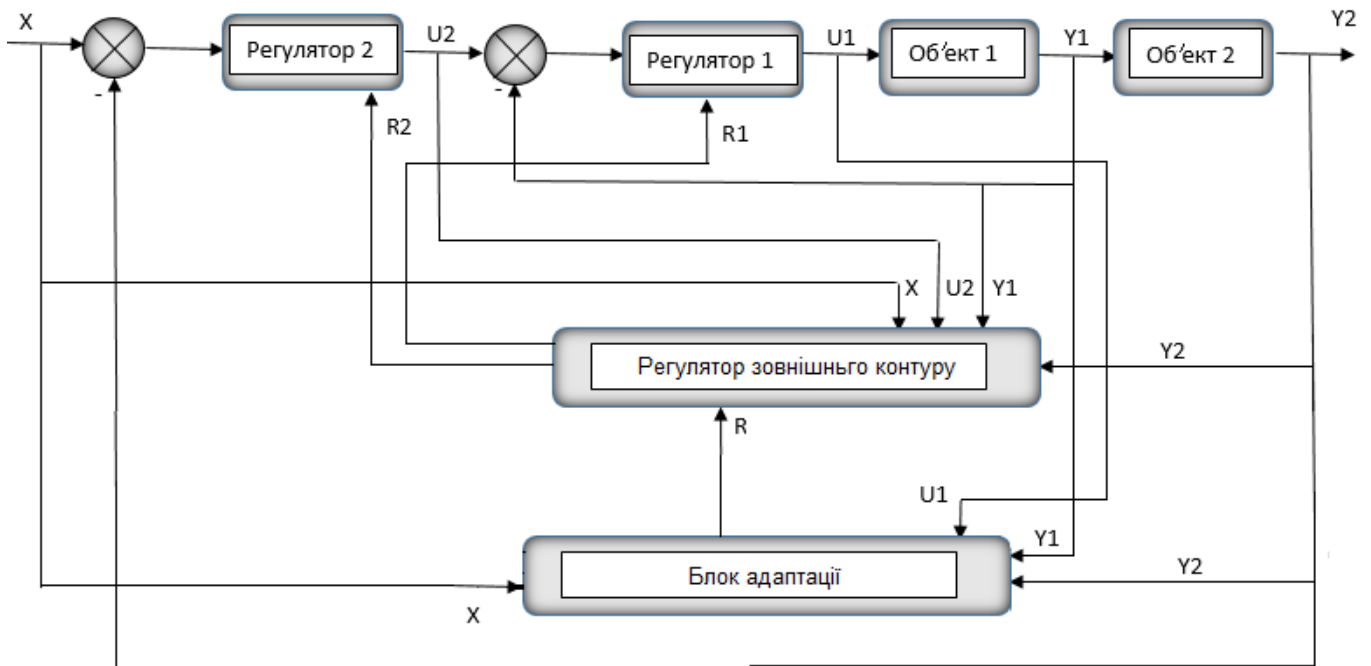


Рисунок 4.20 Структурна схема системи керування скловарною піччю з використанням блоку адаптації для регулятора зовнішнього контуру.

Розроблена та представлена на рис. 4.20 схема системи керування, з блоком адаптації для регулятора зовнішнього контуру, значно складніша за структурою від адаптивної системи керування рис. 4.19, де адаптивний регулятор замінив регулятор зовнішнього контуру. Тут R – регулювання подачі газу по кожній з пари пальників, R_1 – вектор параметрів, що будуть переналаштовані, R_2 – сигнал керування реверсом факела [24, 25].

Запропоновано алгоритм адаптації K_r наступного виду:

$$K_r^{n+1} = \alpha \cdot K_r^n + \beta,$$

де K_r^n – значення загального коефіцієнта підсилення регулятора перед адаптацією, K_r^{n+1} – нове значення загального коефіцієнта підсилення регулятора, n – номер кроку адаптації, α , β – коефіцієнти, що відповідають технологічним особливостям об'єкту, наведені в попередніх розділах.

Принцип розробленого адаптивного алгоритму керування є використання процесу порівняння сигналу $u(t)$ з даними технологічного регламенту виробництва. Блок адаптації реалізує наступний алгоритм:

$$u_i(t) < \varepsilon_i(t),$$

де $\varepsilon_i(t)$ – сигнал неузгодженості, при займані ним відповідного значення, іде зміна Kr за відповідним алгоритмом адаптації. Для вирішення поставленої задачі використовується інструмент програмного середовища *MatLab* – *S*-функція. В алгоритмі використана конструкція *if – else*. Фрагмент програмного коду, що реалізований засобами *MatLab*:

```
function sys = mdlOutputs(t,x,u)
```

```
persistent P;
```

```
if t<0.1
```

```
    P=0.875; sys=P;
```

```
else
```

```
    if u<0.9
```

```
        P=P+0.02; sys =P;
```

```
    else
```

```
        if u<0.95
```

```
            P=P+0.015; sys =P;
```

```
        else
```

```
            if u<1
```

```
                P=P+0.001; sys =P;
```

```
            else
```

```
                if u<1.05
```

```
                    P=P-0.001; sys =P;
```

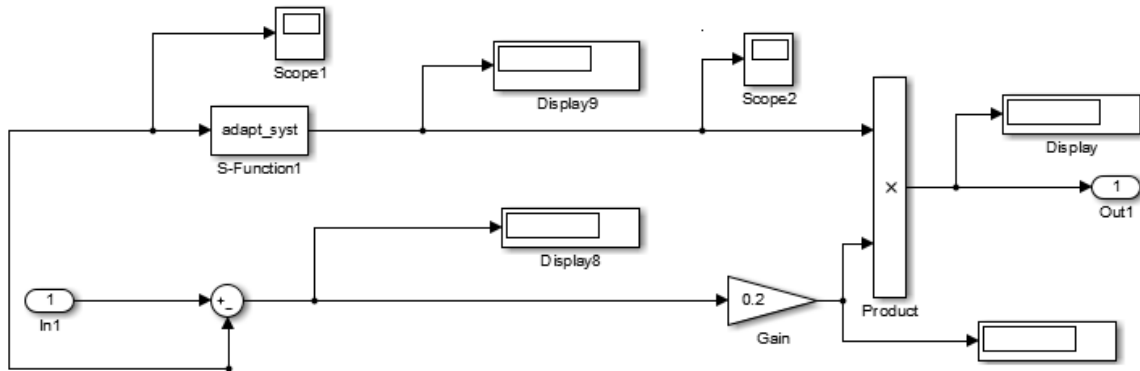


Рисунок 4.21 Фрагмент адаптивної системи керування скловарною піччю з використанням блоку *S*-функції.

На рисунках 4.22-4.28 представлені перехідні процеси по кожній зоні печі та порівняльний графік по всіх зонах печі

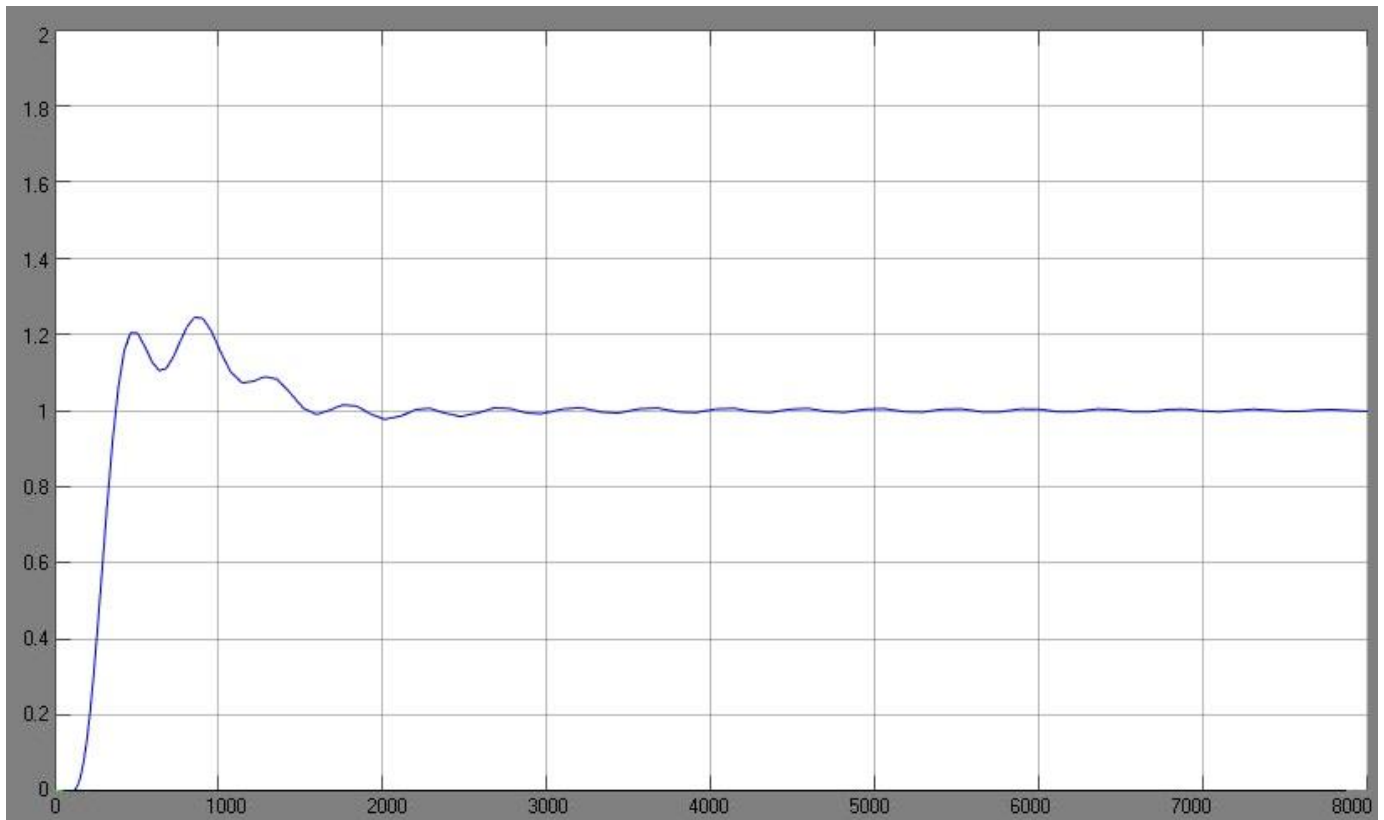


Рисунок 4.22 Перехідний процес адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування першої зони

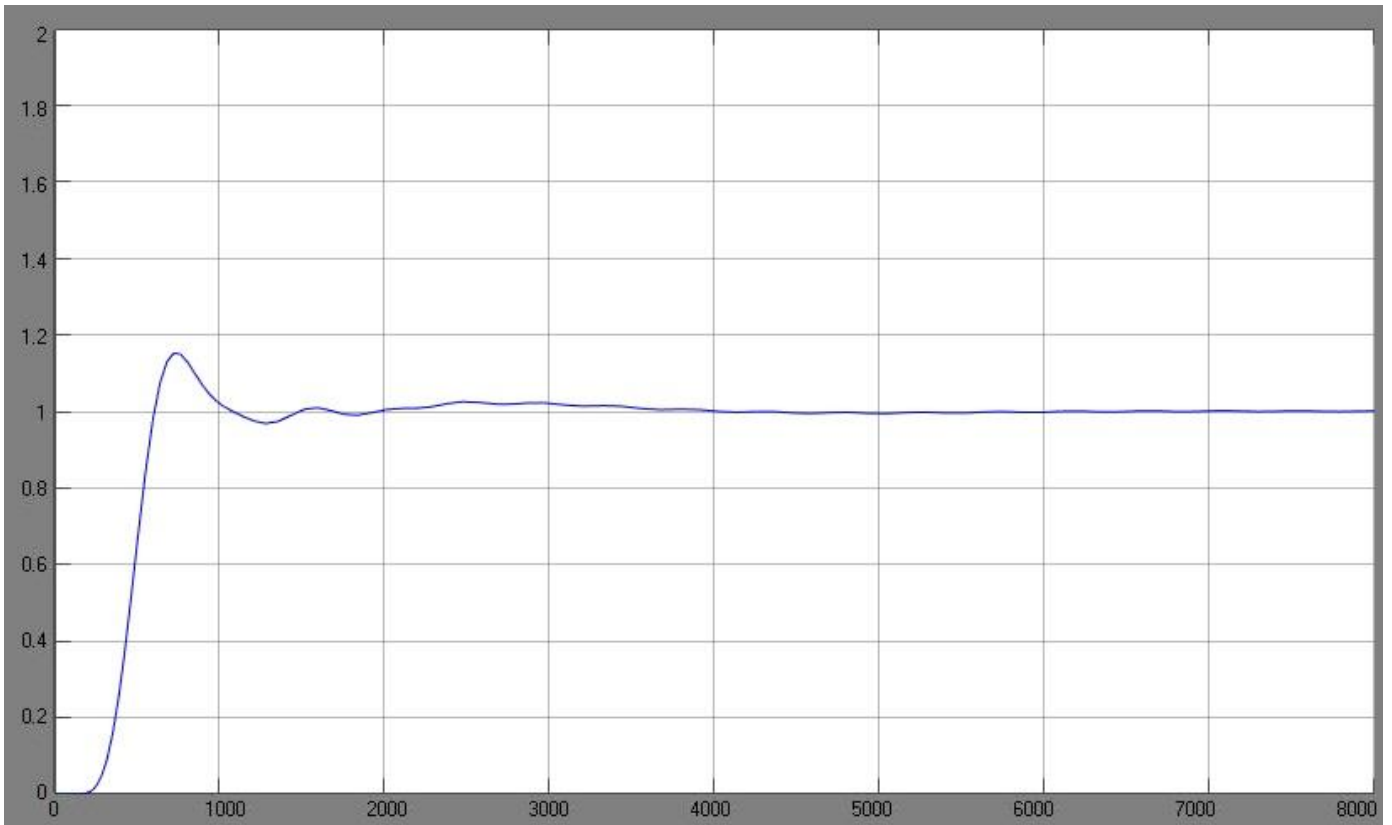


Рисунок 4.23 Перехідний процес адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування другої зони

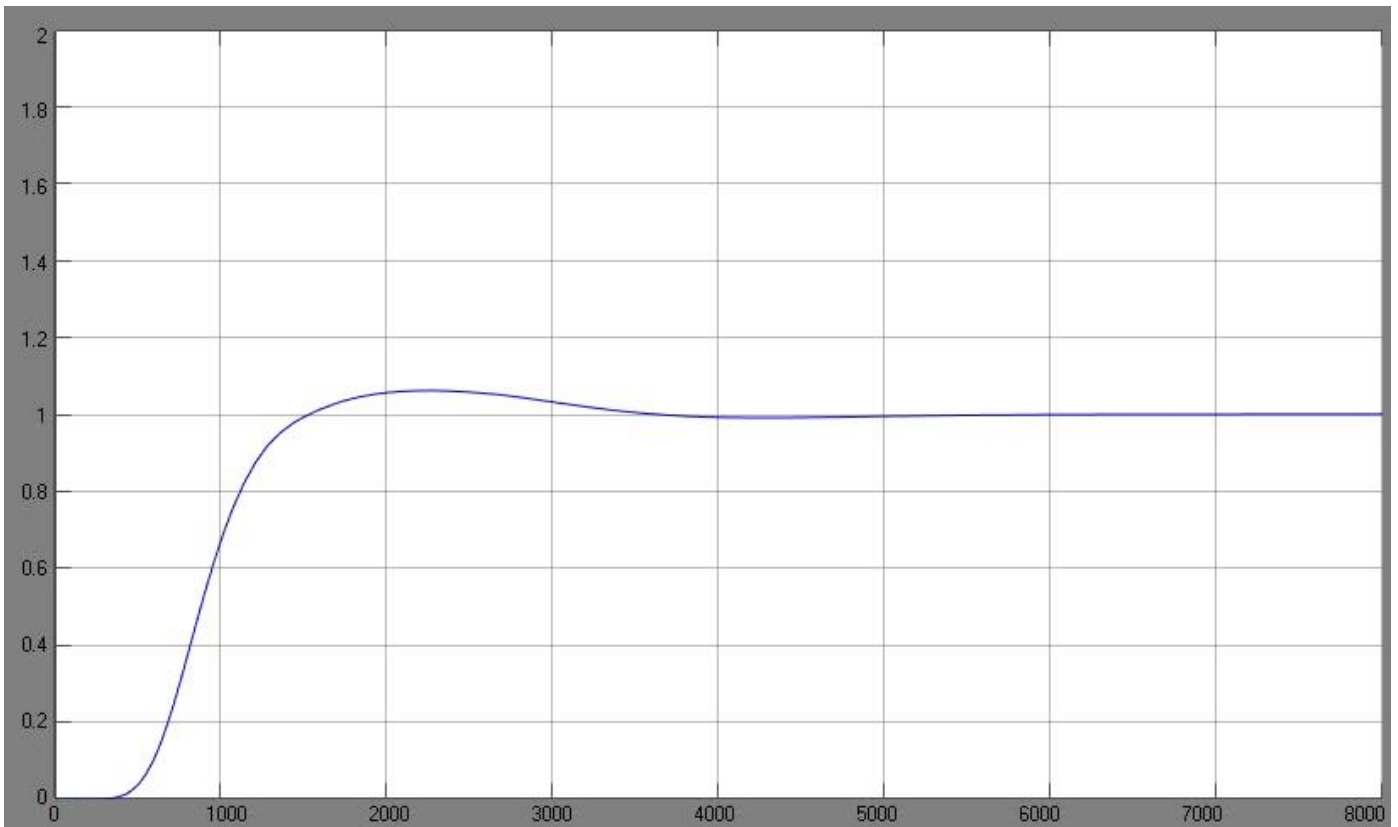


Рисунок 4.24 Перехідний процес адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування третьої зони

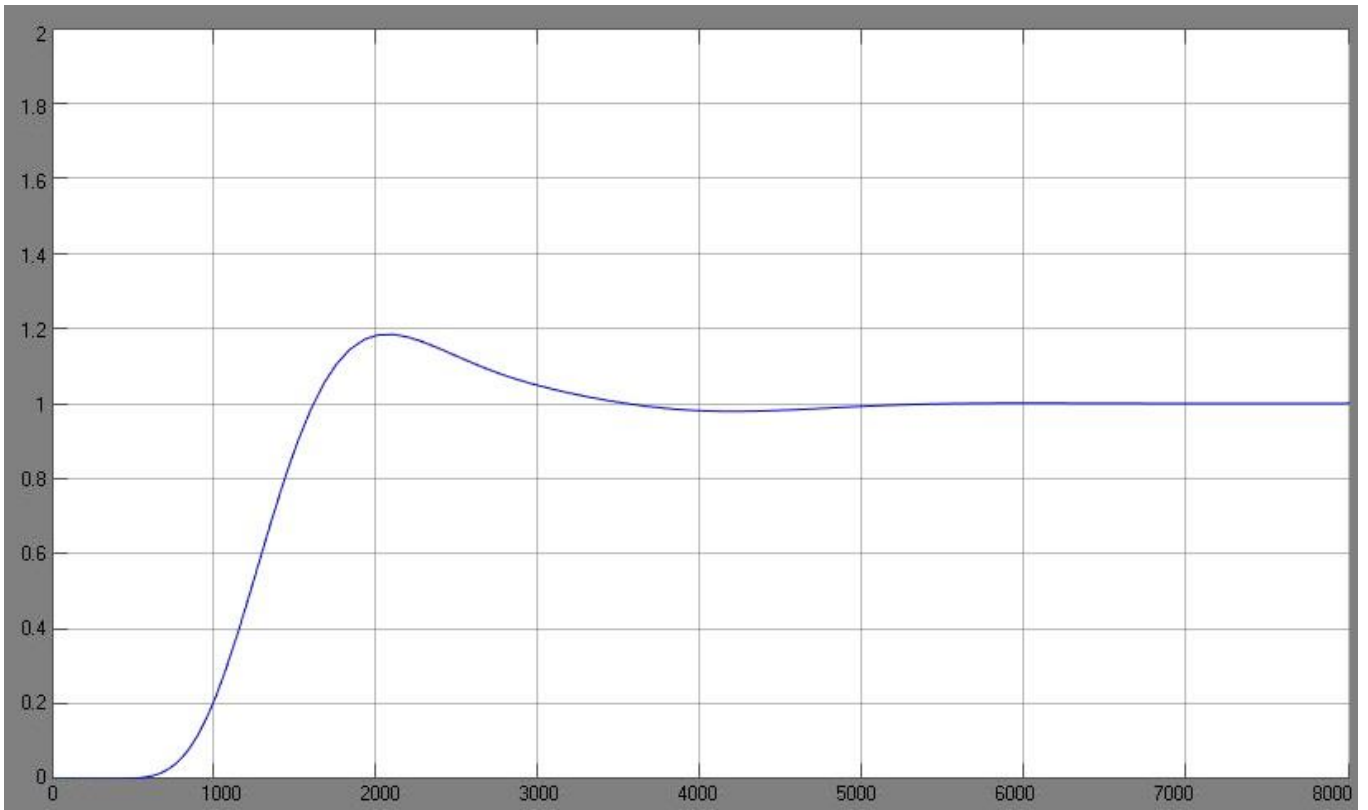


Рисунок 4.25 Перехідний процес адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування четвертої зони

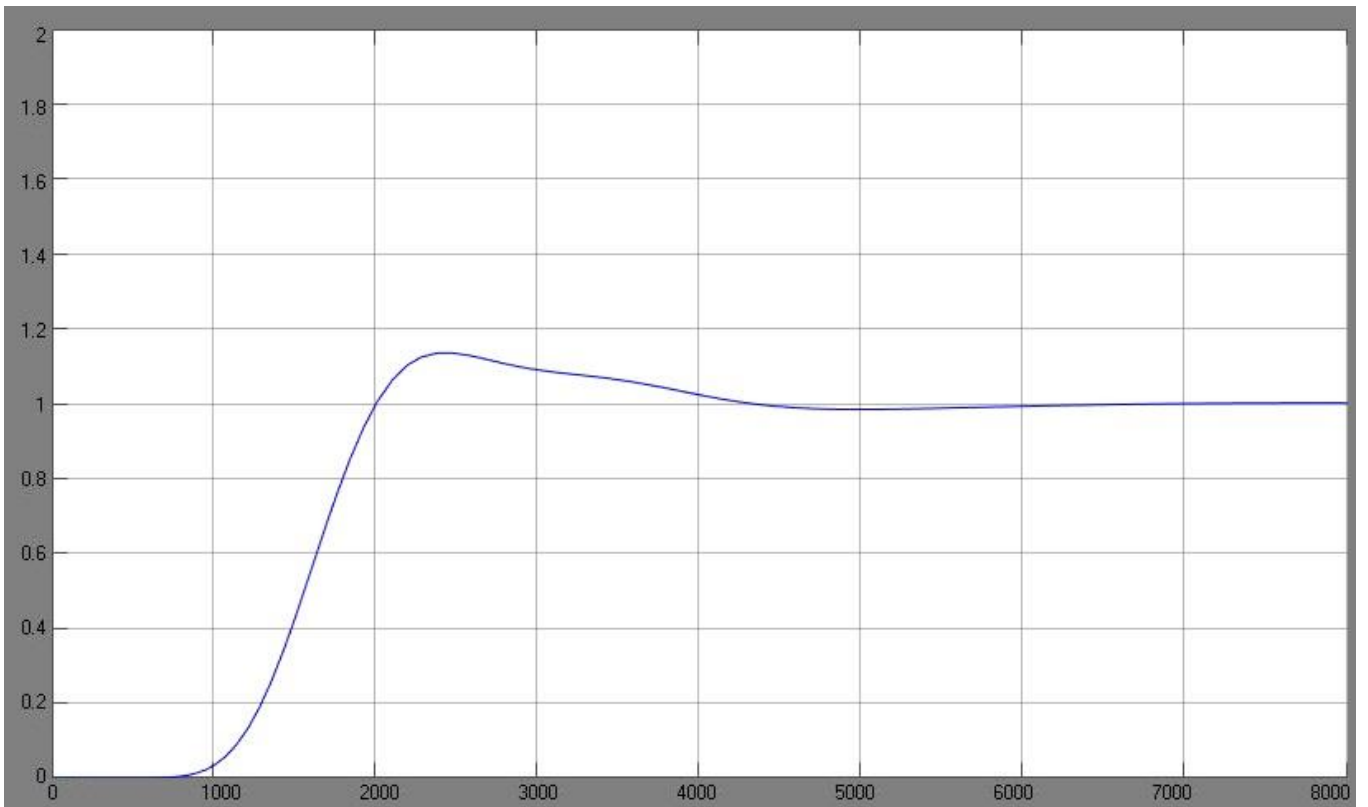


Рисунок 4.26 Перехідний процес адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування п'ятої зони

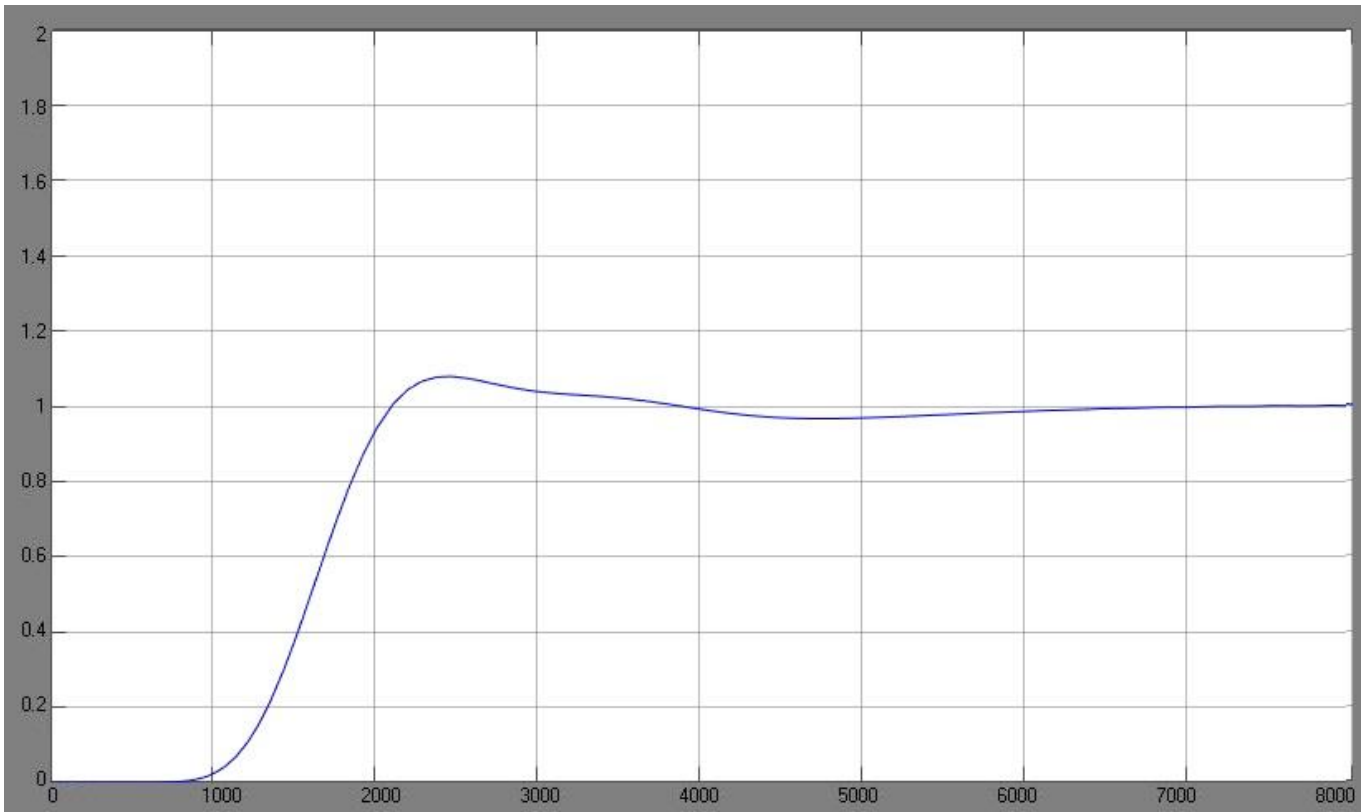


Рисунок 4.27 Перехідний процес адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування шостої зони

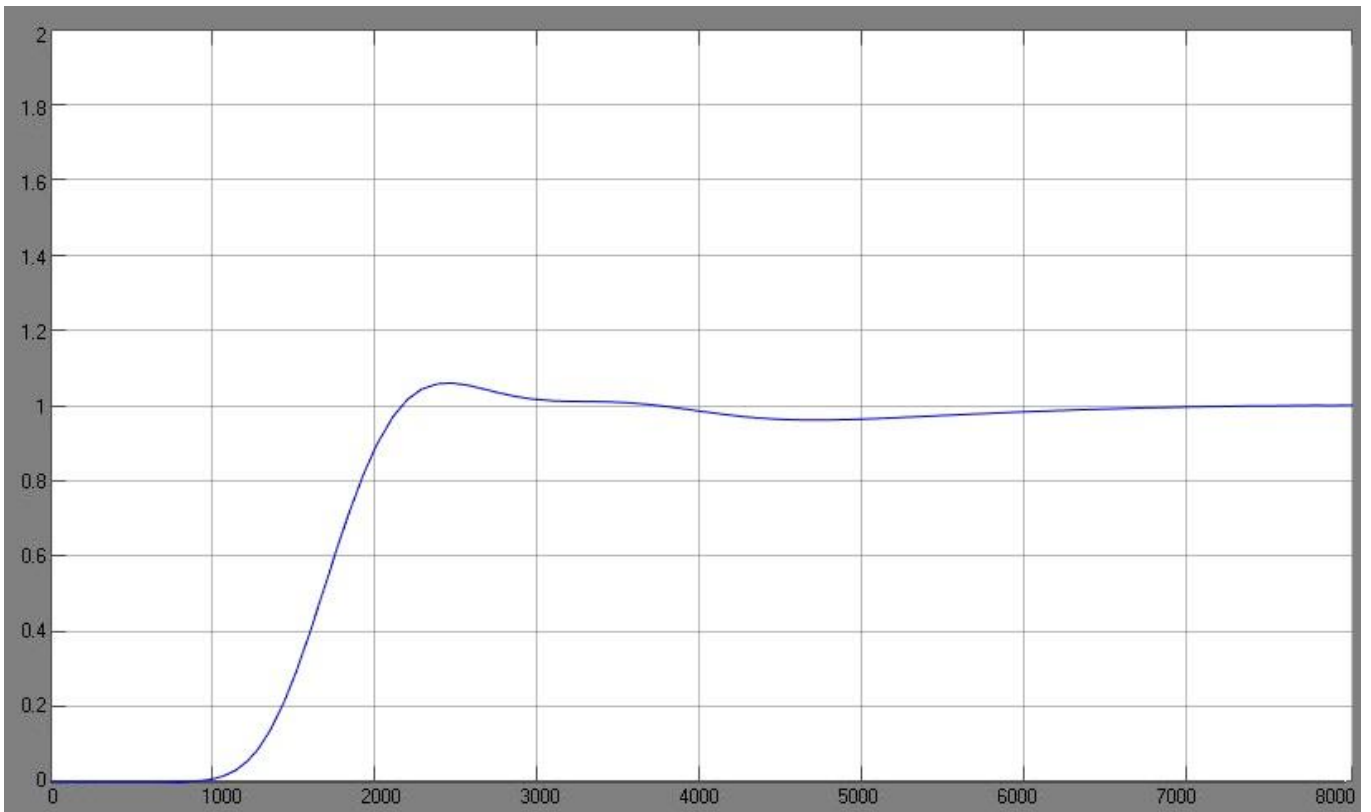


Рисунок 4.28 Перехідний процес адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування сьомої зони

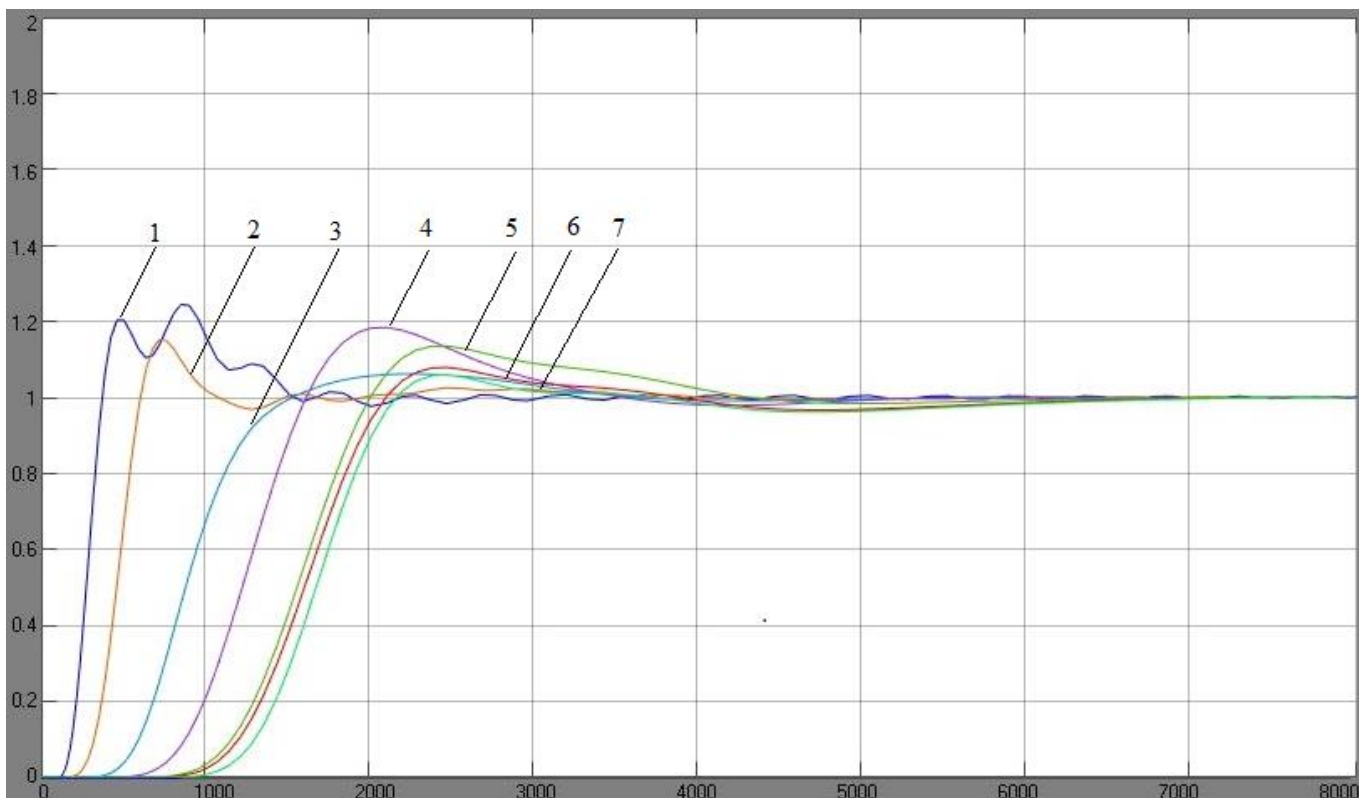


Рисунок 4.29 Перехідні процеси адаптивної АСР скловарної печі за каналом керування по всіх зонах печі – порівняльний графік.

На рис. 4.29 наведено порівняльні графіки перехідних процесів по всіх перерізах на які умовно поділена скловарна піч. З наведених результатів видно, що перегулювання виникає в першій, другій зоні (початковий розігрів) та четвертій зоні (точка кавельпункту – максимальної температури). В адаптивній системі керування перегулювання, що у свою чергу веде до зайвої витрати пального, нижче ніж у звичайній системі.

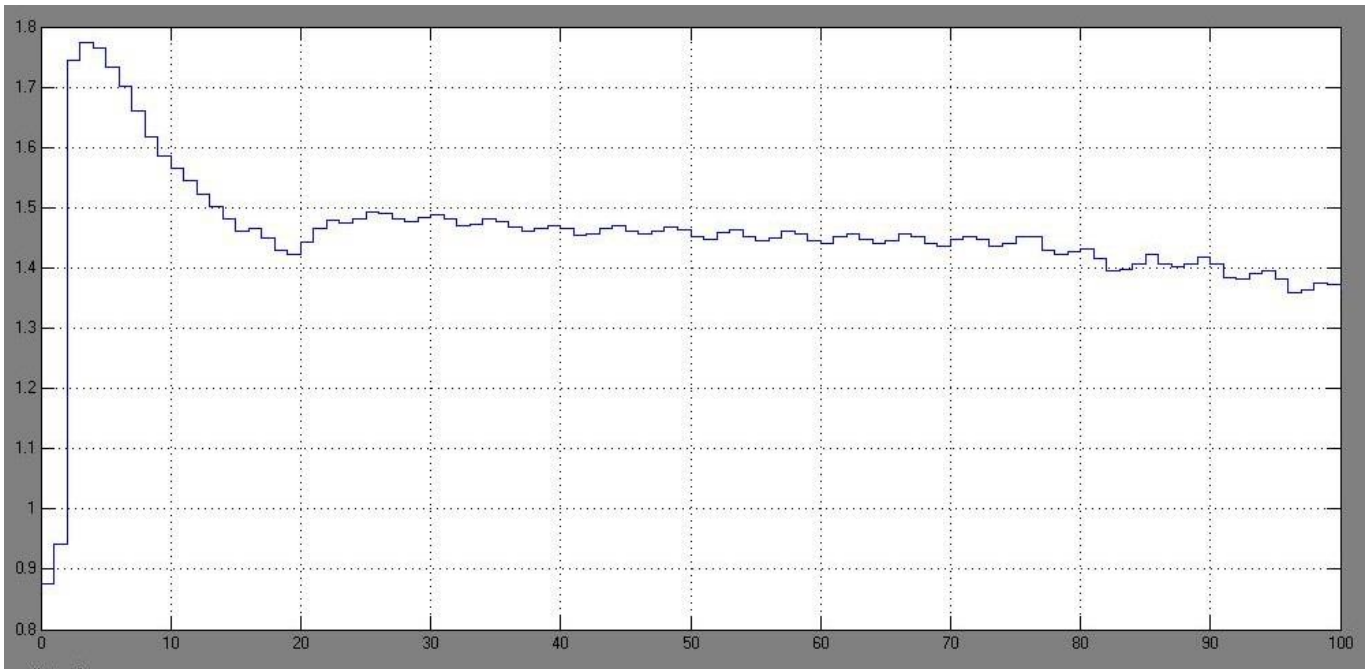


Рисунок 4.30 Процесу налаштування пропорційної складової регулятора контура стабілізації

Стратегія керування наведена на рис. 4.30. На графіку представлено зміна в часі пропорційної складової регулятора

4.5. Експериментальне дослідження системи керування тепловим режимом скловарної печі

4.5.1 Система керування скловарною піччю з використанням нечіткого керування.

Останнім часом широкого застосування при моделюванні систем керування набули нечіткі моделі та алгоритми керування. В основі нечіткого керування покладено практичне використання бази знань кваліфікованих спеціалістів та фахівців, що представлені у вигляді лінгвістичних баз правил [119]. При налаштуванні та управлінні АСР ефективним буде використання досвіду експертів виробництва. Використання алгоритму нечіткої логіки дозволяє, використавши

знання та рекомендації фахівців, значно поліпшити процес синтезу типових регуляторів [24, 25]. Нечітка система отримує на вхід вихідні дані по роботі системи у певних точках скловарної печі у свою чергу на виході повинна формувати вектор налаштувань регулятора, що враховує технологічний регламент скловарної печі

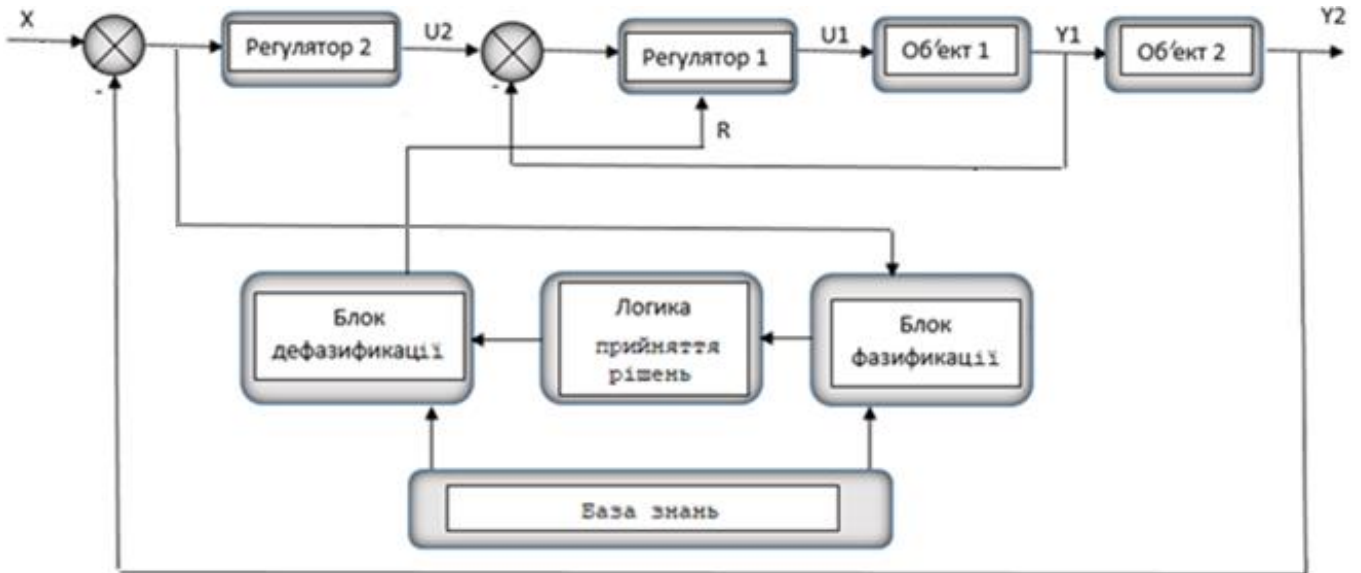


Рисунок 4.31 Структурна схема системи керування скловарною піччю з використанням блоку нечіткого регулятора.

Для реалізації алгоритму використання нечіткої логіки у програмному пакеті *MATLAB* за допомогою середовища *Simulink* була змодельована система, що реалізує систему керування скловарною піччю представленою на рис. 4.14

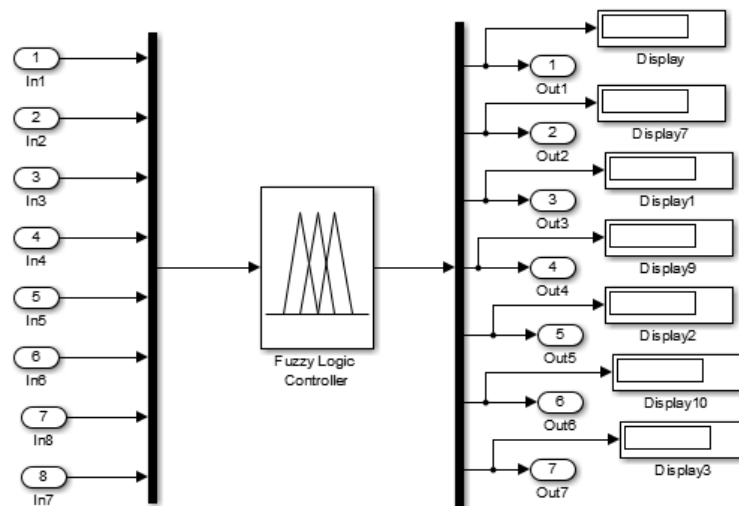


Рисунок 4.32 Схема системи керування з використанням нечіткого регулятора

Використовуючи *Fuzzy Logic Toolbox*, було реалізовано систему нечіткого висновку (рис.4.33).

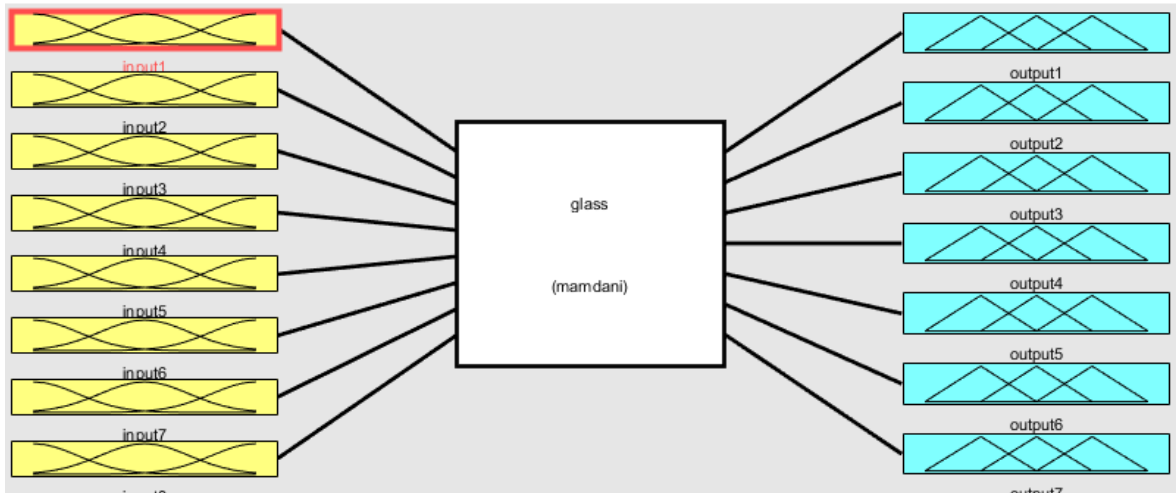


Рисунок 4.33 Графічний інтерфейс редактора FIS

Приклади графіків функцій належності вхідних (*input1- input7* відхилення від заданого значення) та вихідних лінгвістичних змінних (*output1- output7* представляють собою переналаштований параметр регулятора kr в контурі стабілізації) наведені на рис. 4.34 – 4.36.

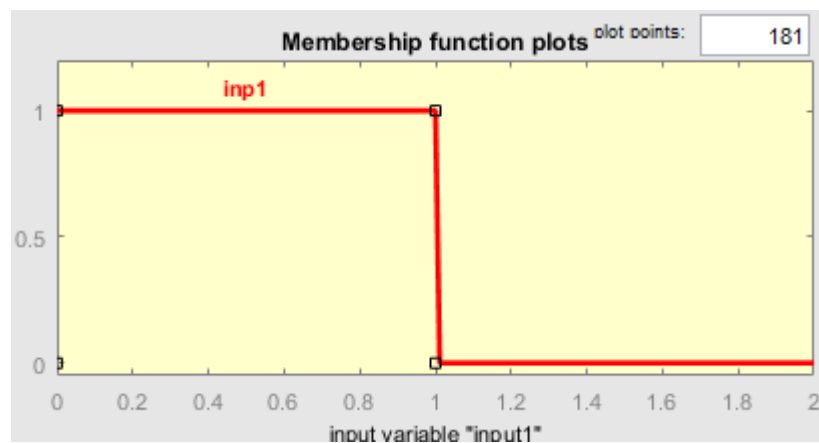


Рисунок 4.34 Функції належності лінгвістичної змінної «вхід №1»

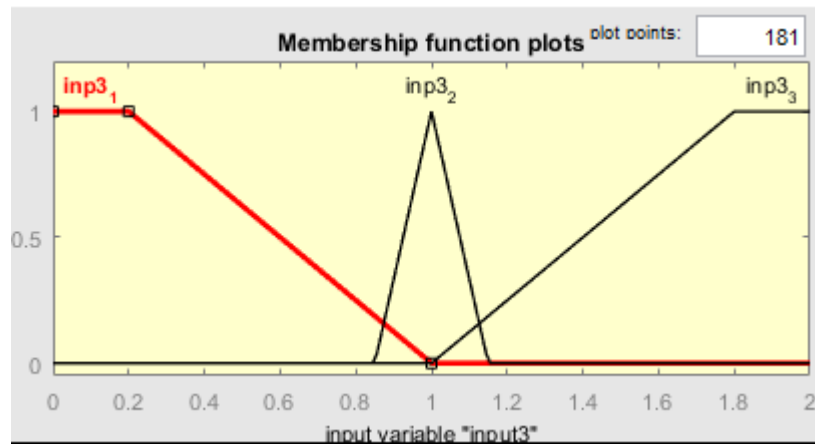


Рисунок 4.35 Функції належності лінгвістичної змінної «вхід №3»

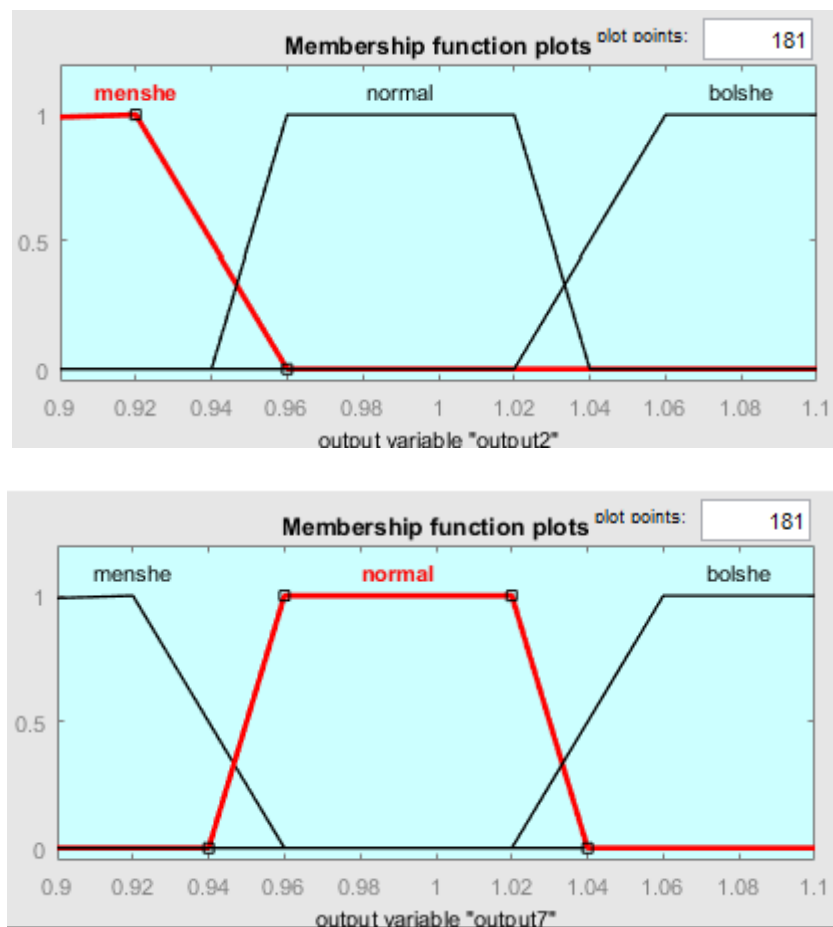


Рисунок 4.36 Результати етапу фазифікації вихідних лінгвістичних

Для подальших досліджень нечіткої системи розроблена база правил виду «Якщо – то» (*if-then*), базуючись на рекомендаціях експертів та технологів виробництва

1. If (input1 is inp1) and (input2 is inp2_1) then (output1 is bolshe) (1)
2. If (input1 is inp1) and (input2 is inp2_2) then (output1 is normal) (1)
3. If (input1 is inp1) and (input2 is inp2_3) then (output1 is menshe) (1)
4. If (input2 is inp2_2) and (input3 is inp3_2) then (output2 is normal) (1)
5. If (input2 is inp2_3) and (input3 is inp3_3) then (output2 is menshe) (1)
6. If (input2 is inp2_1) and (input3 is inp3_1) then (output2 is bolshe) (1)
7. If (input2 is inp2_1) and (input3 is inp3_3) then (output2 is normal) (1)
8. If (input2 is inp2_3) and (input3 is inp3_1) then (output2 is normal) (1)
9. If (input3 is inp3_1) and (input4 is inp4_1) then (output3 is bolshe) (1)
10. If (input3 is inp3_3) and (input4 is inp4_3) then (output3 is menshe) (1)
11. If (input3 is inp3_2) and (input4 is inp4_2) then (output3 is normal) (1)
12. If (input3 is inp3_1) and (input4 is inp4_3) then (output3 is normal) (1)
13. If (input3 is inp3_3) and (input4 is inp4_1) then (output3 is normal) (1)
14. If (input4 is inp4_1) and (input5 is inp5_1) then (output4 is bolshe) (1)
15. If (input4 is inp4_3) and (input5 is inp5_3) then (output4 is menshe) (1)
16. If (input4 is inp4_2) and (input5 is inp5_2) then (output4 is normal) (1)
17. If (input4 is inp4_1) and (input5 is inp5_3) then (output4 is normal) (1)
18. If (input4 is inp4_3) and (input5 is inp5_1) then (output4 is normal) (1)
19. If (input5 is inp5_1) and (input6 is inp6_1) then (output5 is bolshe) (1)
20. If (input5 is inp5_3) and (input6 is inp6_3) then (output5 is menshe) (1)
21. If (input5 is inp5_2) and (input6 is inp6_2) then (output5 is normal) (1)
22. If (input5 is inp5_1) and (input6 is inp6_3) then (output5 is normal) (1)
23. If (input5 is inp5_3) and (input6 is inp6_1) then (output5 is normal) (1)
24. If (input6 is inp6_1) and (input7 is inp7_1) then (output6 is bolshe) (1)
25. If (input6 is inp6_3) and (input7 is inp7_3) then (output6 is menshe) (1)
26. If (input6 is inp6_2) and (input7 is inp7_2) then (output6 is normal) (1)
27. If (input6 is inp6_1) and (input7 is inp7_3) then (output6 is normal) (1)
28. If (input6 is inp6_3) and (input7 is inp7_1) then (output6 is normal) (1)
29. If (input7 is inp7_1) and (input8 is inp8_1) then (output7 is bolshe) (1)
30. If (input7 is inp7_3) and (input8 is inp8_3) then (output7 is menshe) (1)
31. If (input7 is inp7_2) and (input8 is inp8_2) then (output7 is normal) (1)
32. If (input7 is inp7_1) and (input8 is inp8_3) then (output7 is normal) (1)
33. If (input7 is inp7_3) and (input8 is inp8_1) then (output7 is normal) (1)

Рисунок 4.37 База правил

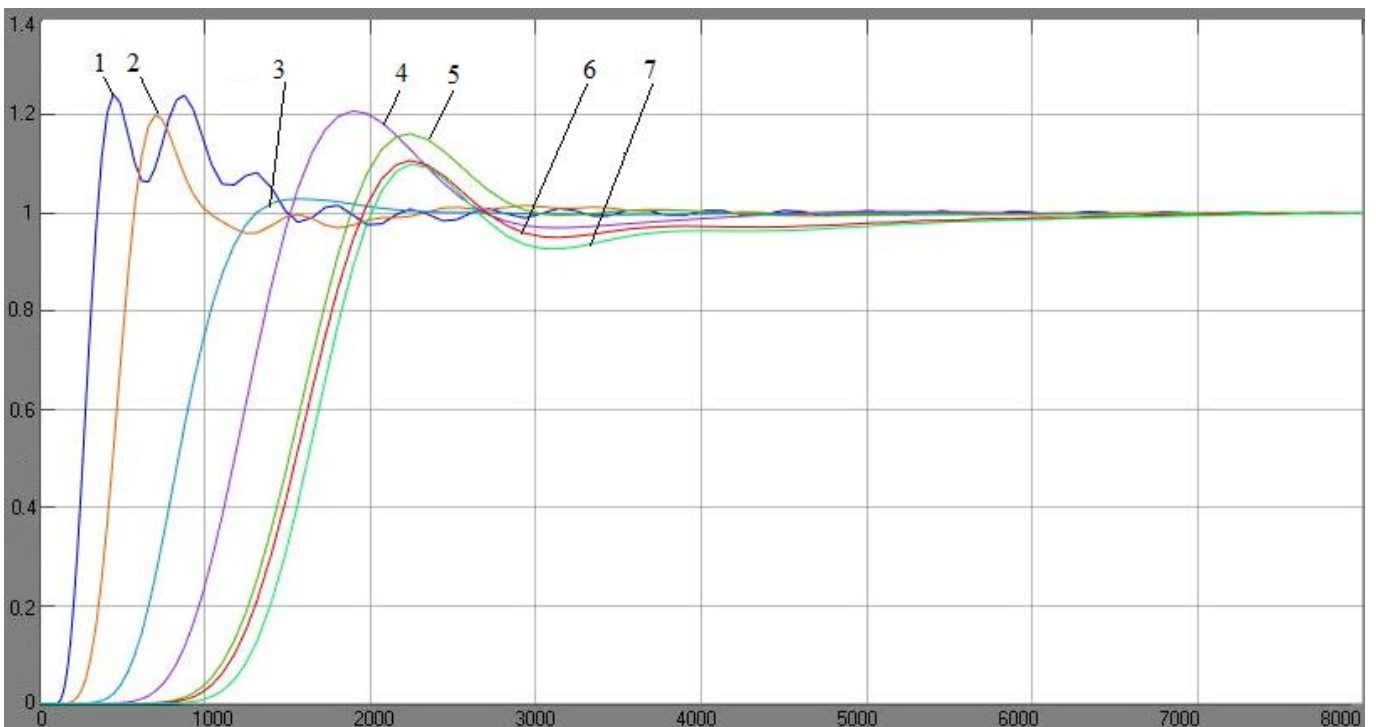


Рисунок 4.38 Перехідні процеси адаптивної АСР скловарної печі з використанням алгоритмів нечіткої логіки по всіх зонах печі (1-7) – порівняльний графік.

Наведено графіки порівняння перехідних процесів систем керування скловарною піччю з адаптацією (використанням алгоритмів нечіткої логіки) параметрів налаштування по всіх зонах печі (1-7 – номер відповідної зони печі)

4.5.2. Порівняльний аналіз та дослідження розроблених систем керування тепловим режимом скловарної печі.

Виходячи з проведених досліджень засобами математичного пакету *MathLab* та засоби моделювання *Simulink* була розроблена зведена система, що дозволяє провести аналіз по кожній зоні печі для всіх розглянутих систем.

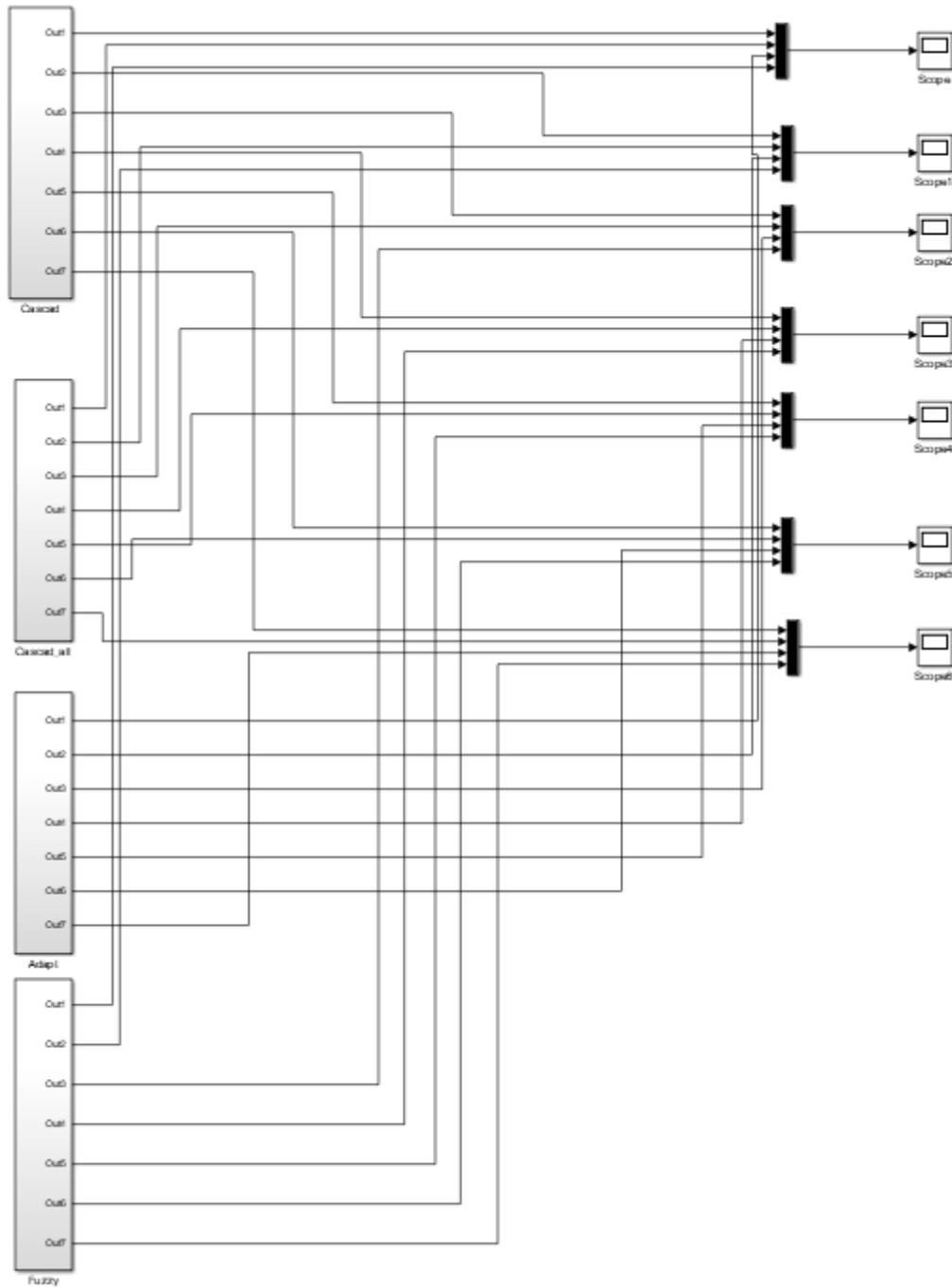


Рисунок 4.39 Зведена система керування скловарної печі для проведення порівняльного аналізу розроблених систем керування.

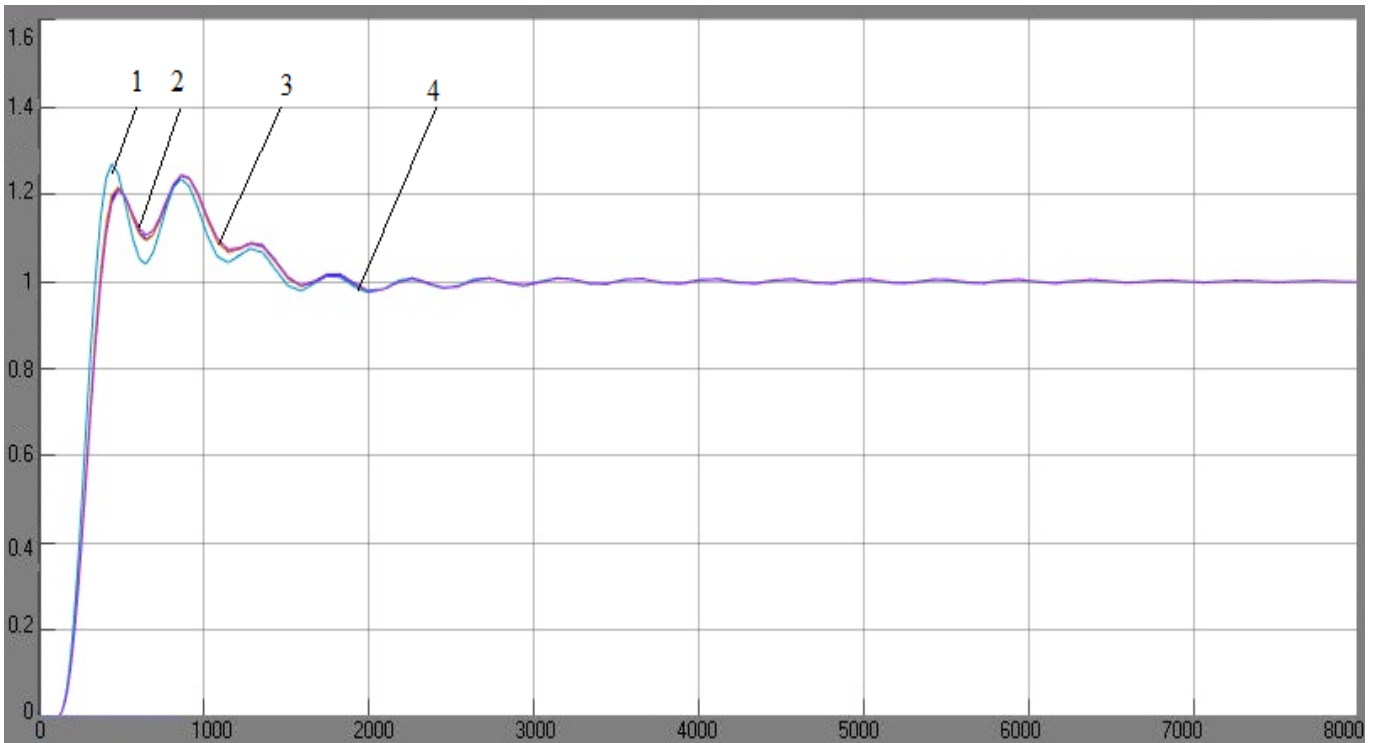


Рисунок 4.40 Перехідні процес систем керування скловарної печі по першій зоні

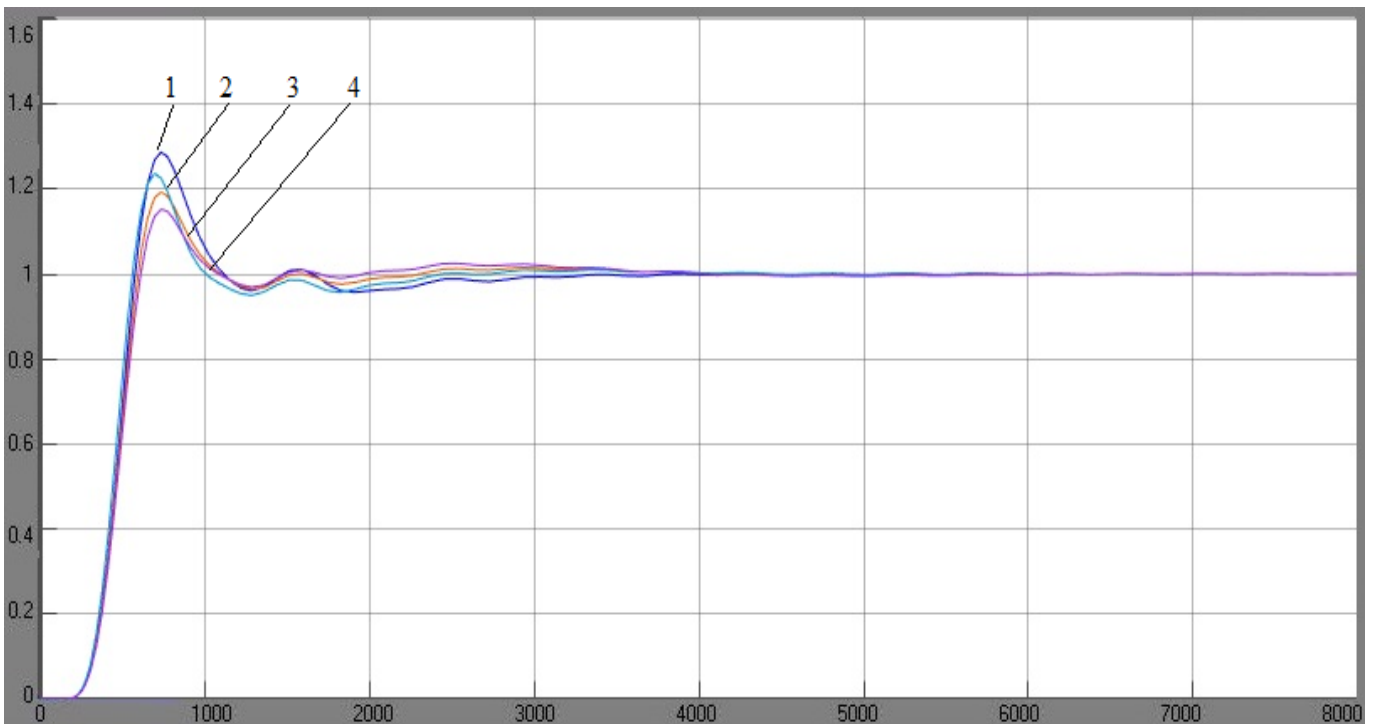


Рисунок 4.41 Перехідні процес систем керування скловарної печі по другій зоні

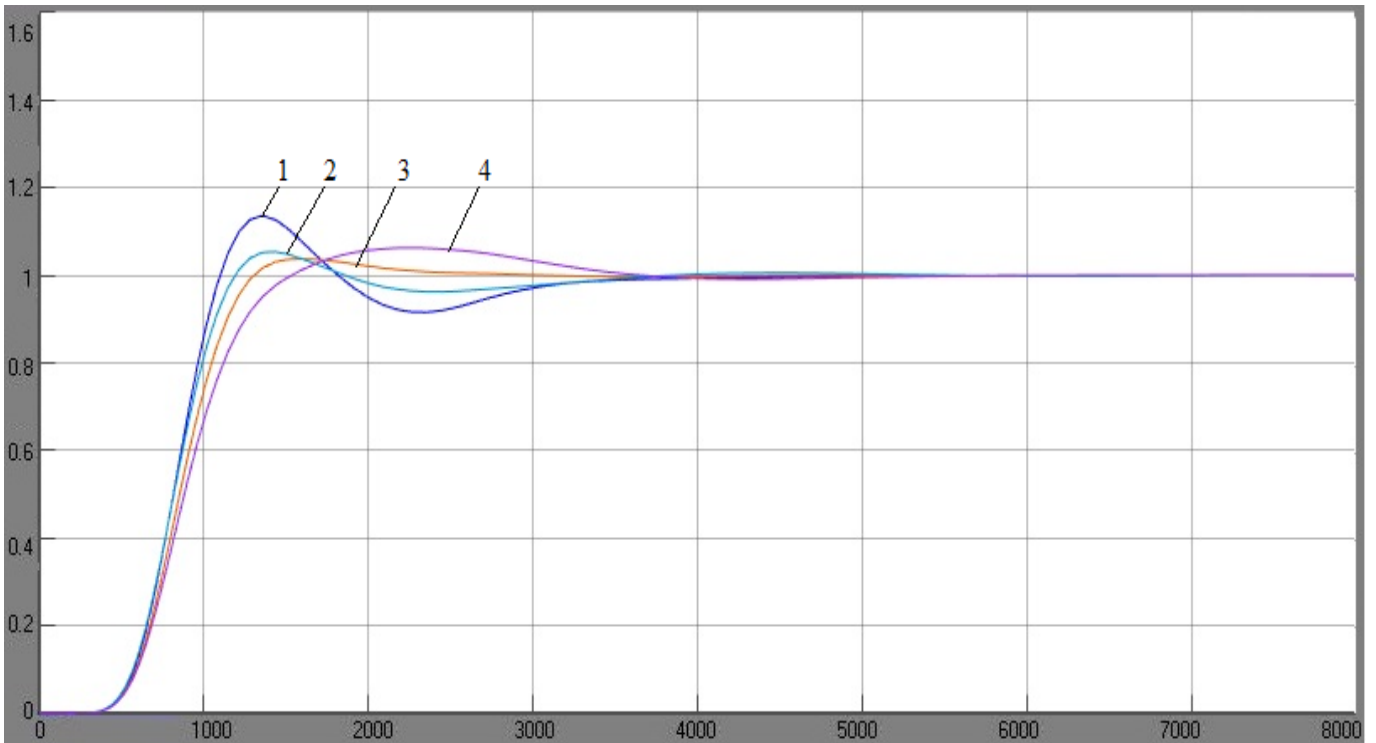


Рисунок 4.42 Перехідні процес систем керування скловарної печі по третій зоні

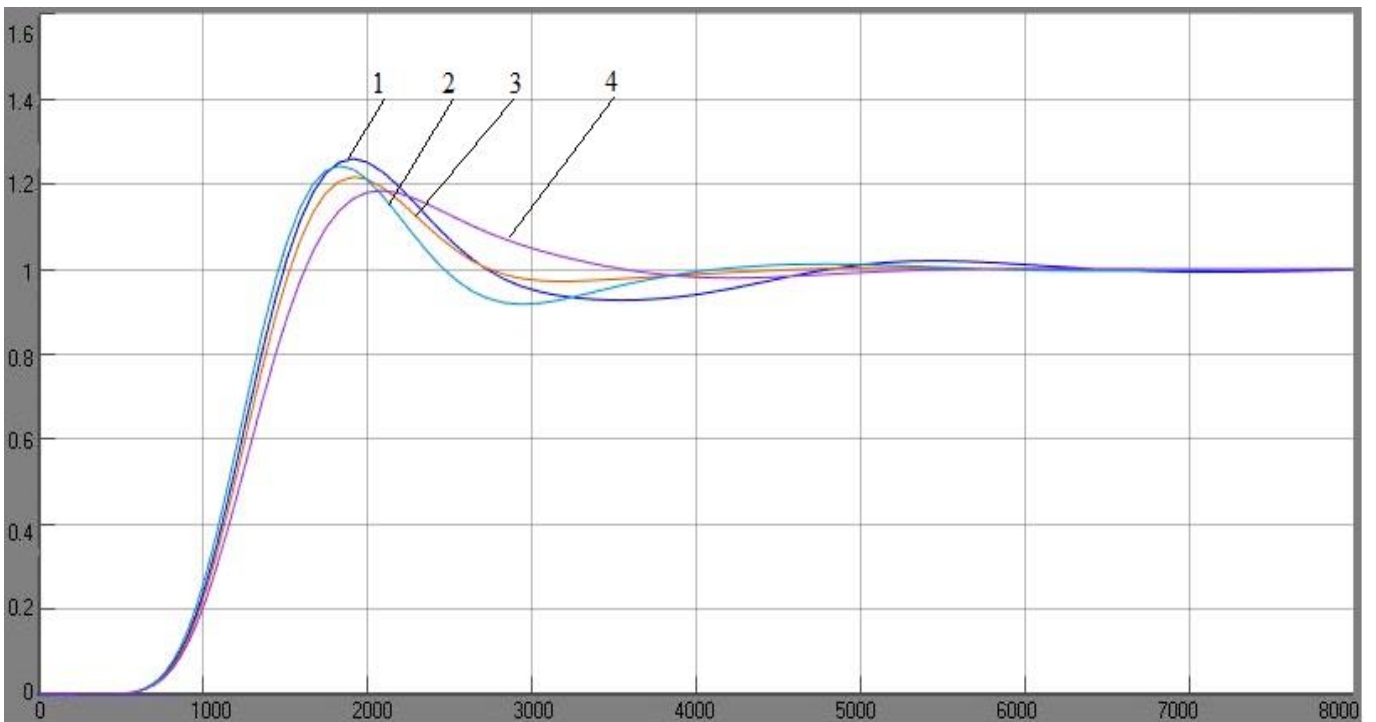


Рисунок 4.43 Перехідні процес систем керування скловарної печі по четвертій зоні

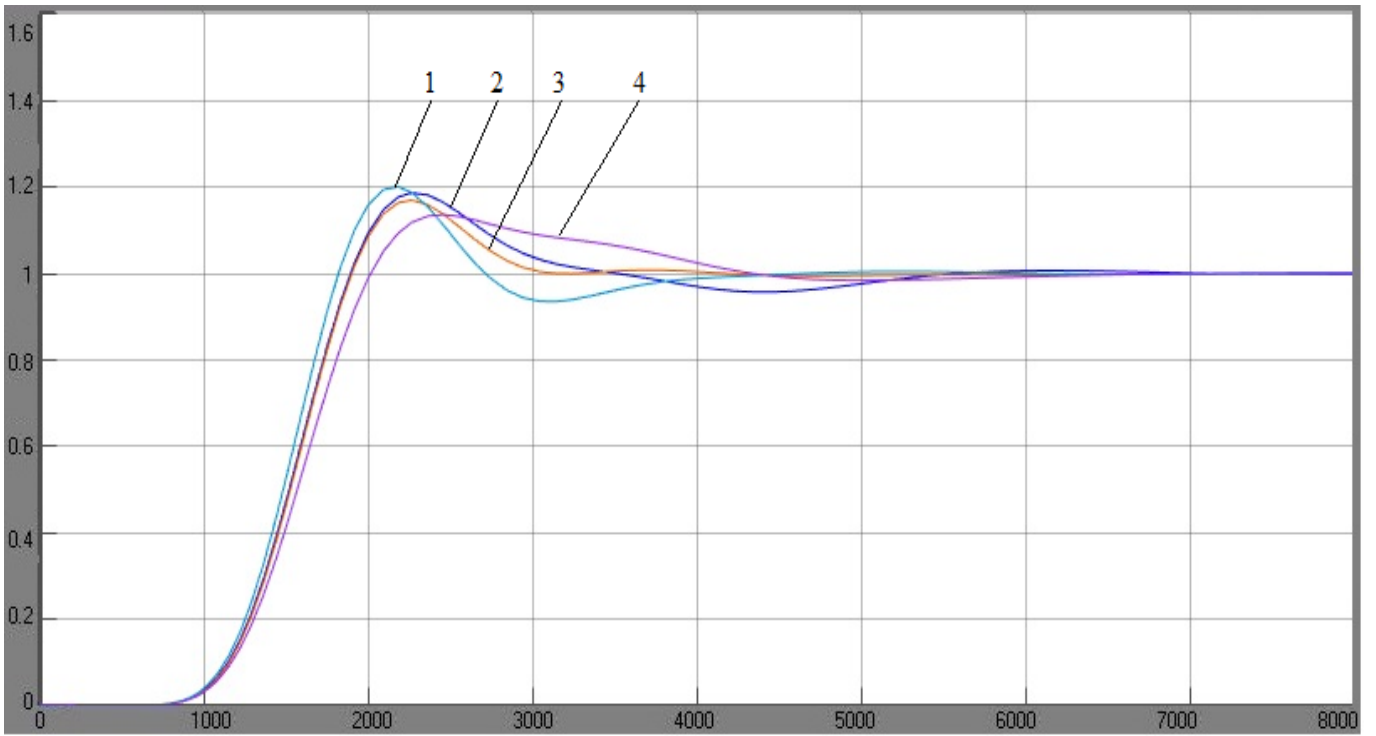


Рисунок 4.44 Перехідні процес систем керування скловарної печі по п'ятій зоні

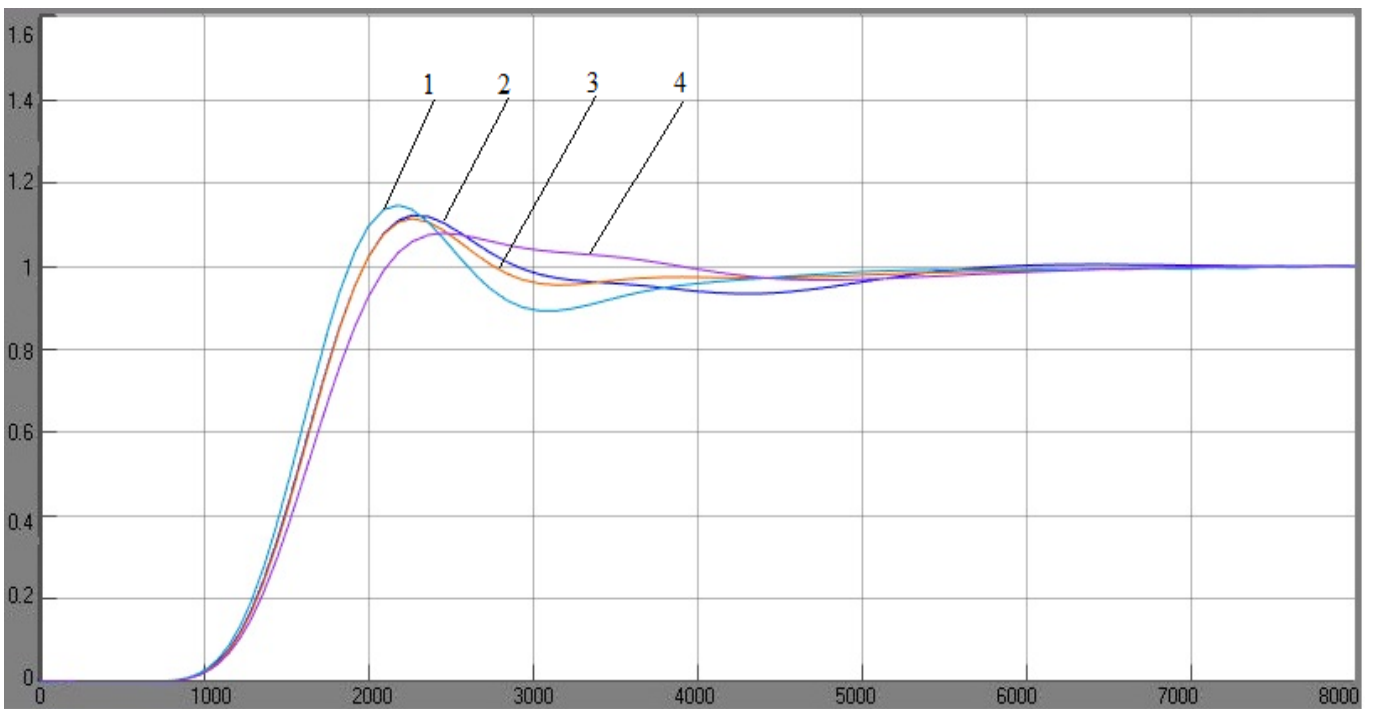


Рисунок 4.45 Перехідні процес систем керування скловарної печі по шостій зоні

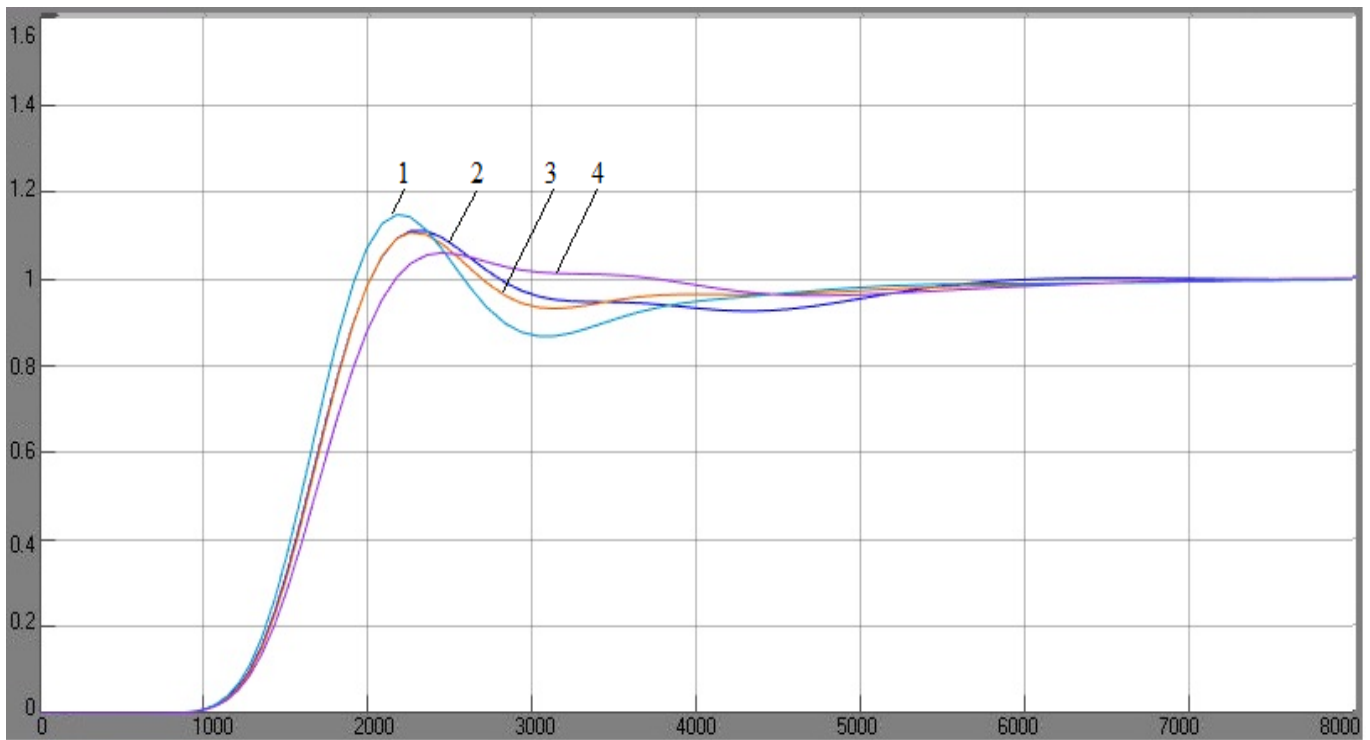


Рисунок 4.46 Перехідні процес систем керування скловарної печі по сьомій зоні

На порівняльних графіках, що наведені на рис. 4.40 – 4.46 1 – каскадна система, 2 – каскадна система з загальним регулятором, 3 – адаптивна система, 4 – адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки.

За результатами проведених досліджень видно, що перегулювання саме найнижче у системі з адаптивним регулятором, що дає можливість без зміни якості вихідного продукту зменшити витрати пального. У свою чергу частково збільшена швидкодія (вихід на усталений режим системи) через зменшення коливань.

Дії збурень змодельовані у вигляді константи, внаслідок інерційності об'єкта необхідно виконувати плавне коригування керуючого впливу (система за короткий проміжок часу не зможе опрацювати значення поданого збурення). Даний вид збурення можливий, як приклад, при зміні складу шихти.

При аналізі й синтезі систем регулювання з коливальними властивостями найбільше широко використовується квадратична інтегральна оцінка, що призначена для визначення оптимальних значень параметрів налаштування системи керування. Оптимальним вважають такі значення, які відповідають мінімуму інтегральної оцінки $I \rightarrow \min$ [98]:

$$I = \int_0^{\infty} |y(\infty) - y(t)|^2 dt = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)|^2 dt.$$

де $\varepsilon(t)$ – похибка керування.

Всі розраховані значення критерія якості представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.4 Квадратична інтегральна оцінка якості системи керування

Зона печі	Тип системи	Інтегральна оцінка
1	каскадна система	12,74
	каскадна система з загальним регулятором	12,4
	адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки	12,4
	адаптивна система	12,4
2	каскадна система	18,06
	каскадна система з загальним регулятором	9,73
	адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки	9,98
	адаптивна система	4,41
3	каскадна система	4,28
	каскадна система з загальним регулятором	3,92
	адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки	4
	адаптивна система	1,16
4	каскадна система	4,75
	каскадна система з загальним регулятором	10,05
	адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки	4,79
	адаптивна система	4,66
5	каскадна система	4,62
	каскадна система з загальним регулятором	4,58
	адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки	4,75

	адаптивна система	4,86
6	каскадна система	4,62
	каскадна система з загальним регулятором	4,24
	адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки	4,41
	адаптивна система	4,12
7	каскадна система	4,32
	каскадна система з загальним регулятором	4,08
	адаптивна з використанням алгоритмів нечіткої логіки	4,16
	адаптивна система	3,92

Таким чином, виходячи з наведених в таблиці результатів інтегральної оцінки, якість системи керування з адаптивним регулятором вища ніж в інших, що підтверджує її ефективність та перевагу.

Після проведених досліджень та опираючись на рекомендації експертів можна сформувати рекомендації для виробництва по економічному ефекту, що буде виражений у вигляді зменшення витрати пального по всіх парах пальників печі

Таблиця 4.5 Рекомендації подачі зменшення подачі газу по пальниках печі

Зона печі	Максимальна температура по зоні печі T_{\max} , °C	Рекомендації зміни подачі пального, %
1	1500	зменшення подачі пального на 5%
2	1560	зменшення подачі пального на 4%
3	1590	збільшення подачі пального на 6%
4	1580	зменшення подачі пального на 4%
5	1550	зменшення подачі пального на 3%
6	1500	збільшення подачі пального на 3%
7	1490	збільшення подачі пального на 3%

Таким чином наведено результати економічного ефекту, що буде як результат впровадження на виробництво розробленої системи керування скловарною піччю.

4.6. Висновки до РОЗДІЛУ 4

1. Проведений аналіз для критерія оптимальності керування та проведено дослідження обраного критерію, на основі дослідження поставлено задачі керування, що ставляться до адаптивного регулятора.
2. Розроблено алгоритм програмного керування системою подачі газу по пальника печі та керування реверсом факелу пари пальників печі. Принцип роботи алгоритму представлений на *UML* діаграмі стану, де врахована послідовність дій регулятора.
3. Виходячи з поставленої задачі для адаптивного керування, розроблено адаптивну систему керування скловарною піччю. Проведені дослідження розробленої системи керування на основі математичної моделі скловарної печі, що показали відповідність роботи поставленій задачі.
4. Проведено дослідження в порівнянні роботи типової каскадної АСР тепловим режимом скловарної печі, АСР тепловим режимом з регулятором програмного керування, системи з використанням блоку адаптації нечіткої моделі та адаптивної системи керування. Дослідження показали, що якість керування найвища в адаптивній системі керування тепловим режимом скловарної печі.
5. На основі проведених досліджень розроблено технологію керування процесу скловаріння, основними компонентами виступають технологічні, програмні та організаційно-методичні засоби: математична модель об'єкту керування, експериментальне дослідження процесу виготовлення скломаси, закон оптимального адаптивного керування та система автоматичного керування.
6. Проведено дослідження ефективності розробленої системи керування з використанням інтегрального критерія якості та надано рекомендації, що до отримання економічної вигоди зменшенням витрати палива по пальниках печі.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі підвищення ефективності процесу виготовлення скломаси шляхом створення системи керування, яка сприятиме підвищенню рівня енергозбереження процесу (шляхом зменшення витрат пального) при забезпеченні якості вихідного продукту, що відповідає даним технологічного регламенту.

1. На основі проведеного системного аналізу процесу скловаріння встановлено, що одним із шляхів підвищення ефективності процесу скловаріння є створення сучасної системи керування, що у свою чергу вимагає побудови адекватних математичних моделей скловарної печі, на основі яких має бути проведено дослідження особливостей теплового режиму скловарної печі.

2. Розроблена математична модель скловарної печі, яка враховує: відбиваюче, результуюче випромінення та теплові потоки для скломаси та кладки, динаміки нагрівання скломаси у варильній зоні печі. В загальній математичній моделі окремо враховано кладку бокових стінок, а окремо – кладку дна, що дало можливість більш досконально використати акумулюючі здатності кладкою.

3. Створена апроксимуюча математична модель динаміки для керування процесом виготовлення скломаси у варильній зоні скловарної печі, яка описує тепло- і масообмін через скломасу в залежності від глибини шару.

4. Проведені експериментальні дослідження температурних полів скловарної печі засобами імітаційного моделювання та, використовуючи розроблену модель процесу скловаріння, дали можливість виявити недоліки існуючої системи керування подачі пального та дослідити вплив збурень.

5. Використовуючи засоби системного аналізу, розроблено та синтезовано блок програмного керування тепловим режимом скловарної печі, що виконаний з використанням мови програмування *UML*. Дало можливість зменшити витрати пального по кожній із групи пальників печі.

6. Створена система керування підтримки заданого температурного режиму печі на основі регулятора зовнішнього контуру. Проведені дослідження засвідчили переваги над існуючою на виробництві системою.

7. Розроблені системи керування процесом скловаріння на основі адаптивного регулятора, що забезпечує керування процесом в умовах дії збурень і дозволяє при необхідності виконувати зміну параметрів налаштування регулятора зовнішнього контур та з використанням алгоритму нечіткої логіки. Проведено аналіз ефективності роботи систем.

8. Впроваджені у навчальний процес на кафедрі технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» такі результати дослідження: математичні моделі процесу скловаріння, системи адаптивного керування процесом виготовлення скломаси.

Література

1. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве : монография / Л. Л. Товажнянский, В. М. Кошельник, В. В. Соловей, А. В. Кошельник ; под ред. В. М. Кошельника ; Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т». — Х.: НТУ «ХПИ», 2008. — 628 с.
2. "Эко-бум": Рынок стеклянной тары в Украине [Электронный ресурс] // Портал UBR. — 2013. — Режим доступа до ресурсу: <http://ubr.ua/businesspractice/own-business/eko-bum-rynok-steklianoi-tary-v-ukraine-242091>.
3. Transparency Market Research. Мировой рынок стеклянной упаковки вырастет на 3,4% до 2019 года. [Электронный ресурс] / Transparency Market Research // GlassNews. — 2013. — Режим доступа до ресурсу: <http://www.glassnews.info/?p=5456>.
4. Гинзбург Д.Б. Стекловаренные печи [Текст] / — М.: «Стройиздат», 1967. —340 с.
5. A.Abbassi Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace /A.Abbassi, Kh.Khoshmanesh// Applied Thermal Engineering, volume 28, issues 5–6, 2008. — 450-459p.
6. Дзюзер В.Я. Исследование и интенсификация теплообмена в ваннных плавильных печах непрерывного действия: дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / Дзюзер Владимир Яковлевич — Свердловск, 1980. - 184 с.
7. Захариков Н.А. Теплообменные процессы в стекловаренных печах [Текст] / — К.: «Гостехиздат», 1962. - 246 с
8. Havel P. Overview of automatic control of glass furnaces / Havel. // Ceramics – Silikáty. — 2006. — №50. — С. 51–55.
9. R. G. C. Beerkens. Analysis of industrial glass melting processes. submitted to: Glass researcher, 2003.
10. Лазебна Т.А. Математичне моделювання складних теплових об'єктів [Текст] / Т.А. Лазебна, О.В. Ситніков, І.С. Бобонич, О.П. Савченко //Компьютерная математика (Национальная академия наук Украины. Институт кибернетики им. Глушкова), №2, 2011.—С.30-35

11. Жученко А.І. Отримання передатних функцій елементів скловарної печі [Текст] /А.І. Жученко, О.В. Ситніков // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №1(7), 2011 – С.128-129
12. Кубрак А.І. Виведення передатної функції ванни скловарної печі [Текст] /А.І. Кубрак, О.В. Ситніков // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №2(10), 2012 – С.131-136.
13. Кубрак А.І. Побудова математичної моделі ванни скловарної печі [Текст] /А.І. Кубрак, О.В. Ситніков // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №1(11), 2013 – С.93-97
14. Ситніков О.В. Дослідження адекватності математичної моделі процесу нагріву скломаси [Текст] / О.В. Ситніков // "Modern Technology and Innovative Technologies", №12(part 3), 2020 – С.35-38
15. Жученко А.І. Система керування тепловим режимом скловарної печі ванного типу [Текст] /А.І. Жученко, О.В. Ситніков // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №1(17), 2018 – С.123-127
16. Жученко А.І. Розробка системи керування регенеративною скловарною піччю [Текст] /А.І. Жученко, О.В. Ситніков // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. №4(Том 30(69)), 2019 – С.57-61 (видання включене до міжнародної наукометричної баз даних: Index Copernicus International)
17. Жученко А.І. Математична модель зовнішнього теплообміну скловарної печі [Текст] /А.І. Жученко, О.В. Ситніков Б.П. Губар// Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. №4(Том 33(72)), 2022 – С.87-90 (видання, включене до міжнародної наукометричної баз даних: Index Copernicus International).
18. Жученко А.І. Дослідження температурних полів скловарної печі [Текст] /А.І. Жученко, О.В. Ситніков // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №2(21), 2022 – С.34-41.
19. Ситніков О.В. Створення структурно-параметричної схеми об'єкту керування [Текст]/ О.В. Ситніков, Б.І. Гречук//«Вісник херсонського національного технічного університету», №2(81), 2023 – С.26-31.

20. Ситніков О.В. Створення структурної моделі скловарної печі ванного типу [Текст] / О.В. Ситніков, В.В. Миколаєнко // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки, Чернівці, 2012. – с.38-39
21. Ситніков О.В. Розрахунок дискретної моделі скловарної печі [Текст] / О.В. Ситніков, О.Г. Пилипчук // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки, Чернівці, 2013 – с.45-47
22. Ситніков О.В. Постановка задачі адаптивного керування скловарною піччю ванного типу [Текст] / О.В. Ситніков// Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами, Київ, 2015 – с.82
23. Ситніков О.В. Адаптивне нечітке керування скловарною піччю ванного типу [Текст] / О.В. Ситніков // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами, Київ, 2016 – с.85
24. Ситников А.В. Система адаптивного управления стекловаренной печи ванного типа [Текст] / А.В. Ситников // Science, Research, Development Technic and technology – Роттердам, Голандія, 2018 – 43-45с. (видання іншої держави)
25. Жученко А.І. Адаптивна система керування скловарною піччю з використанням нечіткої логіки [Текст] / А.І. Жученко, О.В. Ситніков // Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях. Збірник наукових статей дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 2021 – с.133-138
26. Пат. Спосіб керування тепловим режимом ванної регенеративної скловарної печі / А.І. Жученко, О.В. Ситніков // Патент на корисну модель №141055 Патент опубліковано 25.03.2020, бюл. № 6/2020
27. Малышев С.Н. К вопросу управления тепловым режимом ванной стекловаренной печи. /С.Н. Малышев// Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. –1985. – С. 57-61
28. Гуляян Ю.А. Технология стеклотары и сортовой посуды [Текст]/ – М.: «Легпромбытиздат», 1986г. –262с.;

29. Савина И.М. Результаты физического моделирования комбинированной пламенно-электрической печи / И.М. Савина, С.В. Игнатов // Исследования по интенсификации процессов промышленного стекловарения. Сборник научных трудов. – Москва, 1986. – С. 66-71
30. Орлов В.К., Кириленко В.И. Влияние формы факела на эффективность обогрева стекломассы // Стекло и керамика. — 1981. №10. - С. 8-9
31. Бузыкин М.В. Исследование динамики плавления стекольной шихты в ваннах стекловаренных печей / М.В. Бузыкин // Автоматизированные системы управления в производстве строительного стекла. Сборник научных трудов – 1982. – С.68-75
32. Ралко А.В. Тепловые процессы в технологии силикатов / А.В. Ралко, А.А. Крупа // «Вища школа» – Киев, 1986. – 232с.
33. Krause, D. Mathematical Simulation in Glass Technology [Text] / D. Krause, H. Loch– Mairdumont GmbH & Co. Kg, 2002. – 488 p
34. Югов А.М. Определение температурных полей на контактирующих поверхностях внешнего контура агрегата стекловаренной печи. /А.М. Югов, В.И. Москаленко, А.В. Ихно, Д.А. Юдкало// Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва – Донецьк, 2009. – №6(80) С. 76-83.
35. Чумак Л.І. Математичне моделювання процесу варіння скла у ванній скловарній печі [Текст] / Л.І. Чумак, О.В. Волох // Вісник ПДАБА, №8, 2013 – С.32-38
36. Дзюзер В.Я. Исследование теплообмена в стекловаренной печи с учётом селективности излучающей и поглощающей среды: тез. док./ В.Я.Дзюзер // В кн.: Расчёт и оптимизация теплотехнических и электрохимических объектов. Свердловск, 1981. – С. 40
37. Жученко А. І. Математична модель процесу скловаріння [Текст] / А. І. Жученко, А. Я. Карвацький, В.С. Цапар // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, №2(13), 2014. – С. 97-104
38. Сорокина А.Е. Анализ возможностей управления процессом стекловарения /А.Е. Сорокина // Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. –1985. – С. 62-69

39. Маневич В.Е. Моделирование процессов производства стекла при комплексном решении задач по совершенствованию технологии и систем управления /В.Е. Маневич// Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. –1985. – С. 21-26
40. Малышев С.Н. Исследование динамики температуры газового пространства ванной стекловарной печи/С.Н. Малышев// Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. –1985. – С. 46-54
41. Богаєнко К.І. Автоматизовані системи керування процесами нагріву та відпалу металу. монографія/ К.І. Богаєнко, Г.Г. Грабовський, А.А. Грищенко, С.А. Грищенко // – К.: «Техніка», 1997. – 124с.
42. Лисовская Г.П. Математическое моделирование влияния технологических и конструкционных параметров стекловаренных печей на конвекционные потоки и процессы гомогенизации стекломассы /Г.П. Лисовская, В.А. Сенатова// Исследования по интенсификации процессов промышленного стекловарения. Сборник научных трудов. – 1986. – С. 111-120
43. Саркисов П.Д., Агарков А.С. Технологический анализ и контроль производства стекла и изделий из него [Текст] / Учебное пособие для техникумов. – М.: , 1976. – 224с.
44. Панкова Н.А., Севастьянов Р.И., Сафронов В.Г. Влияние температуры стекломассы па ее конвекцию в зоне варки // Стекло и керамика. – 1980 -№7 - С. 6-7
45. Тайц Н.Ю. Расчёты нагревательных печей. / Н.Ю. Тайц // «Высшая школа» – Киев, 1958.
46. Бирюков В.П. Определение оптимального теплового режима работы стекловаренной печи методом дифференциального анализа /В.П. Бирюков// Исследования по интенсификации процессов промышленного стекловарения. Сборник научных трудов. – Москва, 1986. – С. 90-94
47. Кошельник В.М. Математическая модель регенератора стекловаренной печи с неподвижной огнеупорной насадкой / В.М. Кошельник, Б.О. Левченко, А.В. Кошельник// Труды международной науч.-техн. конференции „Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Х.: ХГПУ.– 1997.– Ч. 2. – С. 108 – 111.

48. Мигура А.А. Разработка и анализ нейросети для прогнозирования параметров эффективности насадки регенератора стекловаренной печи / А.А. Мигура, А.В. Кошельник// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. «Энергосберегающие технологии и оборудование», №8(78), 2015 – С. 29-33
49. Макаров Е.П. Моделирование тепло- и массообменных процессов, протекающих в газoeлектрических стекловаренных печах / Е.П. Макаров, Кузнецов Ю.К. // Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. – Москва, 1985. – С. 26-30
50. Сенатова В.А. Исследование процесса усреднения стекломассы методом математического моделирования / В.А. Сенатова// Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. – 1985. – С. 90-94.
51. Тэн Б.Я. Влияние конвективного массопереноса на скорость процесса стеклообразования /Б.Я. Тэн, В.А. Чубинидзе, В.М. Смирнов// Исследования по интенсификации процессов промышленного стекловарения. Сборник научных трудов. –1986. – С. 80-89
52. Левченко Б.А., Братута Э.Г., Ефимов А.В., Кошельник В.М., Соловей В.В., Тарасенко Н.А., Филипьев О.В., Шевелев А.А. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных предприятий: Учебное пособие. В 2 т. / Под. ред. Б.А. Левченко. –Х.: НТУ „ХПИ”.– 2000. – Ч.2. – 333 с.
53. Роцин А.В. Оценка температурного поля стекломассы в условиях интенсивных помех /А.В. Роцин, Д.Н. Уралов// Автоматизированные системы управления в производстве строительного стекла. Сборник научных трудов, - Москва, 1982. – С.78-83
54. Яшина К.В. Комплексная математическая модель тепловых процессов происходящие в дуговых электросталеплавильных печах/ К.В. Яшина, А.В. Садовой // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. ХНТУ №2(24), 2009 – 26-32с.
55. Соколов А.А. и др. Моделирование гидродинамики вязких расплавов. — М.: «Стройиздат», 1972. —191 С.
56. Феколин В.М., Лебедева Л.П. Влияние температурного режима печи на гидродинамику стекломассы// Стекло и керамика. — 1987. - № 12. — С.10-12

57. Пчеляков К.А., Гайтанова Л.Я. Исследование гидравлики и конвективных потоков зеленой стекломассы /В сб.: Труды института стекла. - 1965. - №1(126). — С. 35-42
58. Ящишин Й.М. Технологія скла: В 3 ч. - Ч. I. Фізика і хімія скла: Підручник для вищих навчальних закладів. [Текст]/ НУ «Львівська політехніка», 2001 – 188с.
59. Адерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т.2 / Д. Адерсон, Д. Таннехилл, Р. Плетчер// – М.: «Мир», 1990. – 392с.
60. Бэтчелор Дж. Введение в динамике жидкости: В 2 т. /Дж Бэтчелор // – М.: «Мир», 1973 – 552 с.
61. Н.К. Versteeg, W. Malalaskera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Longman, 1995. – 552 p.
62. Gershtein V.Yu. Mathematical model of complex heat transfer in the industrial furnace. Thermophysics and Aeromechanics, v.2, N 2, 1995, pp.129-137.
63. Козлов А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей. — М.: «Легпромбытиздат», 1990. - 141с.
64. Moul A. Two and three dimensional mathematical models of glass tank furnace // Glass Technology Vol.23 p. 106-111
65. Viskanta R. Review of three-dimensional mathematical Modeling of Glass melting / R. Viskanta // Journal of Non. Crist. Solids. 1994. - № 177.1. P. 347-362.
66. M. K. Choudhary, “Recent Advances in Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer Phenomena in Glass Furnaces,” J. Am. Ceram. Soc., 85 [5] 1030–1036 (2002).
67. Кириллова С.Ю. К вопросу построения моделей объектов управления с запаздыванием // Компьютерные технологии обработки и анализа данных / Отв. ред. СС Садыков, Р.С. Садуллаев. Ташкент: НПО «Кибернетика» АНРУз, 2000 . - С . 150-154.
68. Солинов Ф. Г. Производство листового стекла [Текст] / – М.: «Стройиздат», 1976г. – 288с.
69. Prokhorenko O. Radiative Thermal Conductivity of Melts / High Temperature Glass Melt Property Database for Process Modeling, eds., / T. P. Seward, and T. Vascott. American Ceramic Society, Westerville, OH, USA, 95–117, 2005

70. Тарунин А.А., Межеричкий П.И. Развитие систем автоматизации в производстве стекла. /А.А. Тарунин, П.И. Межеричкий// АТП в производстве стекла. Сборник научных трудов. – 1985. – С. 10-14.
71. Волгіна Ю.М. Теплотехнічне обладнання скловарних заводів [Текст]/ – М.: «Стройиздат», 1974р. – 312с.
72. Зубанов В.А. Механическое оборудование стекольных и ситалловых заводов / В.А.Зубанов, Е.А.Чугунов, И.А.Юдин// – М.: «Машиностроение», 1975. –408с.
73. Кошельник А.В., Кошельник В.М., Долженко Е.Ю. Методика оценки влияния регенеративного подогрева воздуха горения на работу ванной стекловаренной печи. /А.В. Кошельник, В.М. Кошельник, Е.Ю. Долженко// Труды ОПУ, 2007. – №2(28). С. 1-6.
74. Арутюнов В.А., Бухмирон В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учеб. для вузов/ Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А.; Под науч. ред. В.А. Арутюнова. — М.: «Металлургия», 1990. — 232с.
75. Wang J., Brewster B. S., Mcquay M. Q., Webb V. W. Validation of Advanced Models for Glass Melting Furnaces: A Collection of Papers Presented at the 60th Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 21[1] (1999)
76. Елисеенко В.М. Состояние и перспективы использования персональных ЭВМ в стекольной промышленности / В.М. Елисеенко // Стекло и керамика,1990. – №8. – С. 19-21.
77. Кучеров О.Ф. и др. Автоматизированные системы управления производством стекла/. Кучеров О.Ф., Маневич В.Е., Клименко В.В. — Л.: «Стройиздат», 1980. - 178с.
78. Китайгородский, В. В. Справочник по производству стекла [Текст] / – М.: «Госстройиздат», 1963. – 518с.
79. Black G. S. Control technology applied to glass level regulation / G. S. Black // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 1990. – №26. – С. 183–188.
80. Бобкова Н. М. Общая технология силикатов / Н. М. Бобкова, Е. М. Дятлова, Т. С. Куницкая. – Минск: «Высшая школа», 1979. – 287 с.

81. Лисиенко В.Г., Фетисов Б.А., Попов О.Н., Дзюзер В.Я., Кутьин В.Г. Прогнозирование тепловой работы стекловаренной печи// Стекло и керамика. — 1989. — №4. — С. 6-9
82. Лаптев В.И. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов производства стеклотары/ В.И. Лаптев. - М.: Легкая индустрия, 1977. -- 151 С.:
83. Rudolf Günther Glass-melting Tank Furnaces Society of Glass Technology, 1958. – 232 p
84. Бондарев К.Т. Высокотемпературная варка стекла / К.Т. Бондарев, В.В. Поляк // Стекло и керамика. 1971. - № 1. - С. 8 - 12
85. Панкова Н.А. Стабилизация температуры выработочного потока стекломассы // Стекло и керамика. — 1989. — №9. — С. 23-24
86. Кошельник В. М. Применение математических моделей для диагностики технико–экономических параметров системы регенерации тепла высокотемпературных теплотехнологических установок / В. М. Кошельник, А. В. Кошельник, Е. Ю. Долженко. Интегрированные технологии и энергосбережение. — 2004. – № 1. – С. 40 – 44.
87. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Марков Е.П. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств / – М.: «Наука», 1986. - 359с.
88. Суликова В.А. Алгоритм нечёткого управления процессом варки стекла /В.А. Суликова // Вестник ОГУ №3(164), 2014 – с. 173-179
89. Hsu James P. Heat balance and calculation of fuel consumption in glass-making / P. Hsu James // Glass. Ind. 1971. - № 1 (52). - PP. 16 - 19; 22 - 23
90. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. М.: Наука, 1976. - 500 с.
91. Craig Larman Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development, Pearson 2004 – 736p.
92. Шаеффер Н.А., Хойзнер К.Х. Технология стекла [Текст]/ – К.: «СТІ-Print», 1998, 279с.

93. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е перераб. и доп. [Текст]/ – М.: «Атомиздат», 1979. – 416 с.
94. Суринов Ю.А. Об основных методах современной теории лучистого теплообмена./ – М.: Сборник «Проблемы энергетики» АН СССР, 1959. – С.423-469
95. Лыков А.В. Терия теплопроводности [Текст]/ – М.: «Высшая школа», 1967, - 600с.
96. Березаяокая Е.Л., Кудрявцева Л.В., Курпатенков В.Д., Люлька Л.А. Расчет лучистых тепловых потоков / Е.Л. Березаяокая, Л.В. Кудрявцева, В.Д. Курпатенков, Л.А. Люлька // – М.: «МАИ», 1989. – 64с.
97. Шаткое А.Г. Системно-структурный анализ процессов теплообмена и его применение [Текст]/ – М.: «Энергоатомиздат», 1983, – 280с.
98. Кубрак А.І Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем: Навч.посібник. /А.І. Кубрак, А.І. Жученко, М.З. Кваско – К.: «Політехника», 2004, – 424 с.
99. Ажогин В.В., Згуровский М.З. «Машинное проектирование оптимальных систем управления пространственно-распределённых динамических объектов» [Текст]/ – К.: «Вища школа», 1985р, - 172с.
100. Жученко А.И. Динамика объектов с распределёнными параметрами. /А.И. Жученко, Н.А. Кубрак, И.М. Голинько// – К.: «ЭКМО», – 2005, – 121с.
101. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределёнными параметрами. / А.Г. Бутковский // – М.: «Наука», 1979, – 224с.
102. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами [Текст]/ – М.: «МИР», 1973, - 957с.
103. Мармоза А. Т. Практикум з математичної статистики. Навч. посіб. [Текст]/ – К.: Кондор, 2004, – 264 с.
104. Мартиненко М. А. Математична статистика . Навч. посіб. [Текст]/ – К.: «Четверта хвиля», 2005, – 208 с.
105. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування [Текст] /– К.: «Задруга», 1999. – 424 с.

106. Євтушенко В. В. Огляд стану проблеми автоматизації скловарної печі та обґрунтування застосування методів нечіткої логіки / В. В. Євтушенко. // Вісник КДПУ. – 2007. – №4. – С. 161–164.
107. Чумак Л.И Автоматизированный контроль теплового режима стекловаренной печи./Л.И Чумак, А.А. Москалева // Вісник ПДАБА(№3), 2006 - с.58-62
108. Щукин А.А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов [Текст]/ – М.:«Энергия»,1973. – 224с.
109. Бельский В.Б., Сергев Б.В. Промышленные печи и трубы / В.Б. Бельский, Б.В.Сергев// «Стройздат» – Москва, 1974.
110. Шелюбский В.И. Контроль однородности и постоянства состава стекла./В.И. Шелюбский// М.: Стройиздат, 1990. -198 с.
- 111.Халабузарь Т.А. Автоматизированная система управления температурой в стекловаренной печи/ Т.А. Халабузарь, В.П. Куценко // – Д.: ИУС КМ, 2013 – с.663–668.
112. Assi, A. H. Engineering Education and Research Using Matlab [Текст] / Assi A. H. – InTech, 2011. – 490 p.
113. Куракин А.И. Балансовый метод исследования скловаренных печей / А.И. Куракин // «Стекло и керамика», 1982р. №3 - с.12-14;
114. Hosang J. Evolutionary algorithm based corrective process control system in glass melting process/ J. Hosang, F. Chen // EMO'07 Proceedings of the 4th international conference on Evolutionary multi-criterion optimization. – 2007., –С. 472–485□□
115. Martin Fowler UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language, 3rd Edition [Текст] / Martin Fowler – Print2Print, 2016, – 208 p.
116. Березаяокая Е.Л., Кудрявцева Л.В., Курпатенков В.Д., Люлька Л.А. Расчет лучистых тепловых потоков [Текст]/ – М.: «МАИ», 1989, – 64с.
117. Перельман И.И. Непосредственная адаптация и адаптация путём идентификации. [Текст]/ – М.: «Институт проблем управления», 1980., – с. 257
118. Müller J. A system for optimal glass furnace control [Электронный ресурс] / J. Müller, R. Bódi, F. Matustík // www.glassmediaonline.com. – 2004. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.gmic.org/Energy%20Page/glass-service.inde-g-oct04-.pdf>.

119. Jianling Q. Design of Fuzzy PID Controller and Application in Glass Furnace / Q. Jianling, D. Zhenjie, L. Yezi. // Electronic Measurement and Instruments. – 2007. – №1. – С. 224–227.

120. Скобцов Ю. А. Основы эволюционных вычислений. [Текст] / – Д.: ДонНТУ, 2008. — 326 с.