

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

СИТНИКОВ Олексій Володимирович

УДК 681.51:666.11

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

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є рукопис:

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, на кафедрі технічних та програмних засобів автоматизації

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Жученко Анатолій Іванович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри технічних та програмних засобів
автоматизації

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Іващук В'ячеслав Віталійович
Національний університет харчових технологій,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерних
технологій систем управління

доктор технічних наук, професор
Болбот Ігор Михайлович
Національний університет біоресурсів і
природокористування України,
професор кафедри автоматики та робототехнічних систем
ім. академіка І.І. Мартиненка

Захист відбудеться «19» вересня 2023 р. о 14.30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресом: 03056, м. Київ, просп. Берестейський 37, корп. 19, ауд. 530.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресом: 03056, м. Київ, просп. Берестейський 37.

Автореферат розісланий «16» серпня 2023 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04



А.Ю. Сазонов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Скловаріння – процес відомий, виходячи з історичних хронік, з часів стародавнього Єгипту. В наші часи склодува 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. 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. Цей фактор пояснюється значною відмінністю у питомому виробничому показнику роботи, згідно з 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. 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., А.Аbbassi, Дзюзер В.Я., Захариков Н.А.. 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, запропоновані системи керування даним технологічним процесом.

Сучасний рівень розвитку комп'ютерно-інтегрованих систем керування технологічними процесами дозволяє вирішувати задачу підвищення ефективності процесу скловаріння на новому більш якісному рівні.

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 виробництва» (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 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 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:

- дослідження структурно-параметричної схеми скловарної печі;

- розробка математичної моделі ванни скловарної печі;

- розрахунок передатних функцій елементів скловарної печі з врахуванням всіх напрямків теплових потоків;

- спрощення структурної схеми скловарної печі як об'єкту керування;

- наведено перевірку адекватності отриманої математичної моделі скловарної печі;

- розроблення та дослідження роботи системи керування скловарною піччю;

- розроблення математичної моделі зовнішнього теплообміну складових елементів скловарної печі;

- 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);

Міжнародній науково-технічній *internet*-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (2015р., 2016р. м.Київ);

Monografia pokonferencyjna «Science, research, development. Technics and technology #3» (2018р., Rotterdam);

Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях. Збірник наукових статей дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції (2021р., м.Київ).

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано зв'язок роботи з науковими програмами кафедри, сформульовано мету і задачі дисертаційних досліджень, зазначено методи дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про апробацію та публікації основних результатів роботи.

У **першому розділі** для вирішення задачі створення математичної моделі скловарної печі при розробці алгоритму і систем керування процесом виготовлення скломаси проведено аналіз процесу скловаріння, його особливості для підтримання відповідного теплового режиму роботи печі.

Розглянуто основні види скловарних печей, особливості роботи кожної з них. Наведено класифікацію печей за способом подання полум'я та представлені основні типи пальників. Проведено аналіз стану математичного опису процесу скловаріння. Наведено, що в процесі виробництва скла визначальну роль відіграють теплові процеси. Скловарна піч відноситься до складних теплових об'єктів, являє собою основний агрегат у технологічному процесі при виробництві скла. Досліджено підходи до моделювання у різних наукових розробках – розглянуті визначальні фактори, які впливають на якість скла.

Запропонована структурно-параметрична схема печі з урахуванням всіх входів, виходів та збурень представлена на рис.1.

Вихідними регульованими параметрами для даного апарату:

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 :

витрата палива (газу) ($F_{\text{газ}}$); витрата повітря на процес горіння ($F_{\text{пов}}$); витрата вихідних газів (нагрівання повітря) ($F_{\text{вих.газ}}$); витрата шихти ($F_{\text{ших}}$); витрата повітря на барботаж ($F_{\text{пов.барб}}$);

Керовані збурюючі дії :

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 збурюючі дії:

склад сировини (шихти) ($Q_{\text{ших}}$); швидкість завантаження шихти в ході процесу варки

($V_{\text{ск}}$); фізичні параметри навколишнього середовища (тиск, температура, вологість)

($P_{\text{н.с.}}, T_{\text{н.с.}}, f_{\text{н.с.}}$);

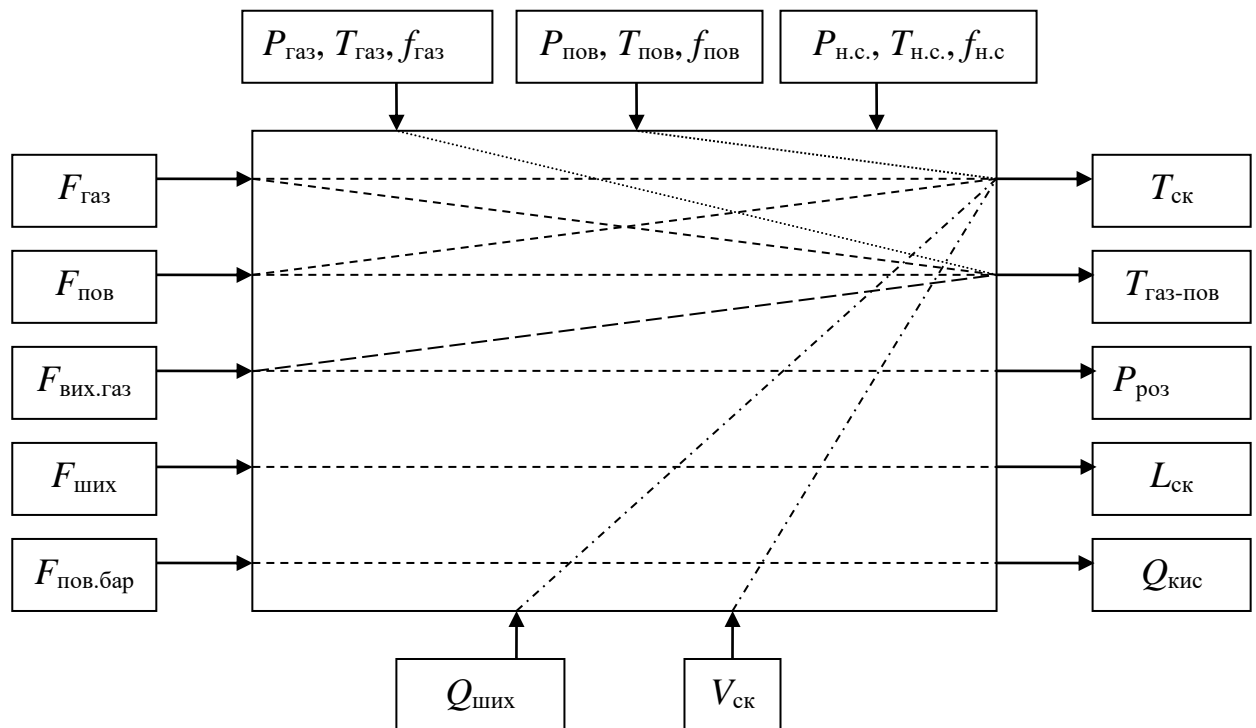


Рис. 1. Параметрична схема скловарної печі.

Встановлено, що основним каналом керування скловарною піччю є канал «витрата газу – температура скломаси».

Проведено аналіз існуючих систем контролю та керування виробництвом скломаси. Складність технологічного процесу виробництва скломаси та його інерційність потребує створення сучасної автоматичної системи керування, що відповідає потребам виробництва та реалізує задачі по підтриманню заданого теплового режиму. 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.

За результатами проведеного системного аналізу процесу скловаріння у печах ванного типу сформульовано завдання дослідження, направлене на удосконалення математичної моделі скловарної печі та створення енергоефективної системи керування процесом виготовлення скломаси.

У **другому розділі** створена математична модель скловарної печі на основі моделі зовнішнього теплообміну та за допомогою структурного моделювання була створена загальна математична модель скловарної печі з врахуванням процесу нагрівання скломаси, окремо враховано теплопередачу між скломасою та кладкою дна печі (рис.2).

Підтримання заданого температурного режиму скловарної печі обумовлено процесами хімічного перетворення та сприяє нагріванню шихти до температури плавлення та повного розчинення компонентів шихти. В основу математично опису покладено розгляд наступних процесів: гідродинамічних, термодинамічних, хімічних. Рівняння, що охоплюють процеси: руху Нав'є-Стокса, переносу тепла, неперервності, стану середовища, та відповідають певним граничним умовам.

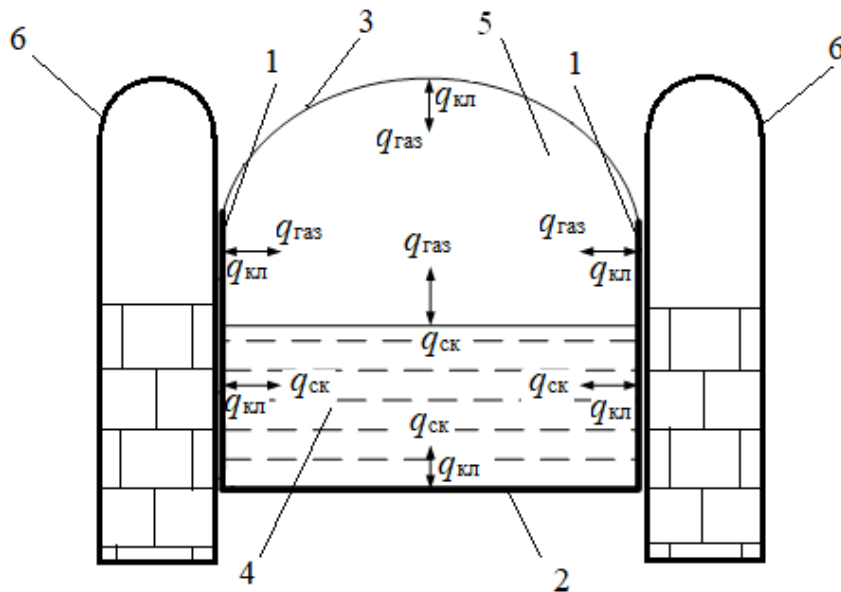


Рис. 2 Схема скловарної печі ванного типу в поперечному перерізі
1 – бокова кладка, 2 – дно, 3 – склепіння, 4 – скломаса, 5 – газовий простір, 6 – регенератори

Математичний опис скловарної печі, включає в себе рівняння зовнішнього теплообміну для скломаси, кладки та газу, математичний опис процесу нагрівання, що використані для розрахунку передатних функцій скломаси та кладки за каналами «температура газу – вихідна температура скломаси» та «температура газу – температура кладки у характерних точках» відповідно. 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. Ефективне випромінювання поверхні скломаси та кладки підпорядковується закону Ламберта – поглинаючі здібності випромінювачів рівні для всіх променевих потоків та дорівнюють відповідним ступеням чорноти. Передачі тепла: $q = \sigma_v (T_{\text{вип}}^4 - T_{\text{пром}}^4)$, де σ_v – видимий коефіцієнт випромінювання, $T_{\text{вип}}$ – температура випромінюючого середовища, $T_{\text{пром}}$ – температура променесприймаючого середовища.

Ефективне випромінювання дзеркала скломаси $E_{\text{еф.ск}} = E_{\text{влас}} + E_{\text{відр}}$, де $E_{\text{влас}}$ – власне випромінювання, $E_{\text{відр}}$ – відбиваюче випромінювання.

Ефективне випромінення дзеркала скломаси $E_{\text{влас}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{ск}} \cdot F_{\text{в}} \cdot T_{\text{ск}}^4 = 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4$, 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, $T_{\text{ск}}$ – температура скломаси, $F_{\text{в}}$ – поверхня ванни, $F_{\text{кл}}$ – 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 $\Psi_{\text{кл}}=1,47$.

Ефективне випромінення скломаси, кладки та власне випромінення кладки:

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

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

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

$\Psi_{\text{ск}}$ – 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 $\Psi_{\text{ск}}=0,68$.

Об'єднання результуючого, падаюче та ефективного випромінення $E_{\text{рез}} = E_{\text{пад}} + E_{\text{еф}}$

Результуюча система рівнянь ефективного та результуючого випромінення для скломаси та кладки:

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

де $E_{\text{рез.ск}}$ – результуюче випромінення для теплового потоку скломаси $q_{\text{ск}}$, $E_{\text{рез.кл}}$ – результуюче випромінення для теплового потоку кладки $q_{\text{кл}}$, зведено подібні:

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

Розв'язано систему відносно $E_{\text{рез.ск}}$ та $E_{\text{рез.кл}}$

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

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

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

Отримана система рівнянь в приростах, розкладена в ряд Тейлора, лінеаризована (в наслідок того, що процес скловаріння відбувається у вузькому температурному діапазоні) та перетворена за Лапласом :

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

враховані $T_{ск.0}$, $T_{кл.0}$, $T_{газ.0}$ – початкові значення температури скломаси, газу та кладки згідно технологічного регламенту, що можуть змінюватись в залежності від початку точки відліку, коефіцієнти $a_1..a_3$, $b_1...b_3$:

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

За отриманою системою теплових потоків для скломаси та кладки розроблено структурну модель об'єкту керування. Структурна модель представлена у вигляді схеми зав'язків між складовими елементами.

На рис.3 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, $T_{г}(p)$ – 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, $W_{г}(p)$ – передатна функція газу, $q_{г}(p)$ – тепловий потік газу.

Передатні функції елементів скловарної печі представлені у вигляді відношення вихідного значення температури до теплового потоку

$$W_{ск}(p) = \frac{T_{ск}(p)}{q_{ск}(p)}, W_{кл}(p) = \frac{T_{кл}(p)}{q_{кл}(p)}, W_{ск}(x,p) = \frac{T_{ск}(x,p)}{q_{ск}(p)}, W_{г}(p) = \frac{T_{г}(p)}{q_{г}(p)}$$

Тепловий потік для газу визначається як функція залежності від витрати, теплоємності та температури газу при вильоту з пальника $q_{г}(p) = G_{г} c T_{г}^4$, де $G_{г}$ – витрата газу.

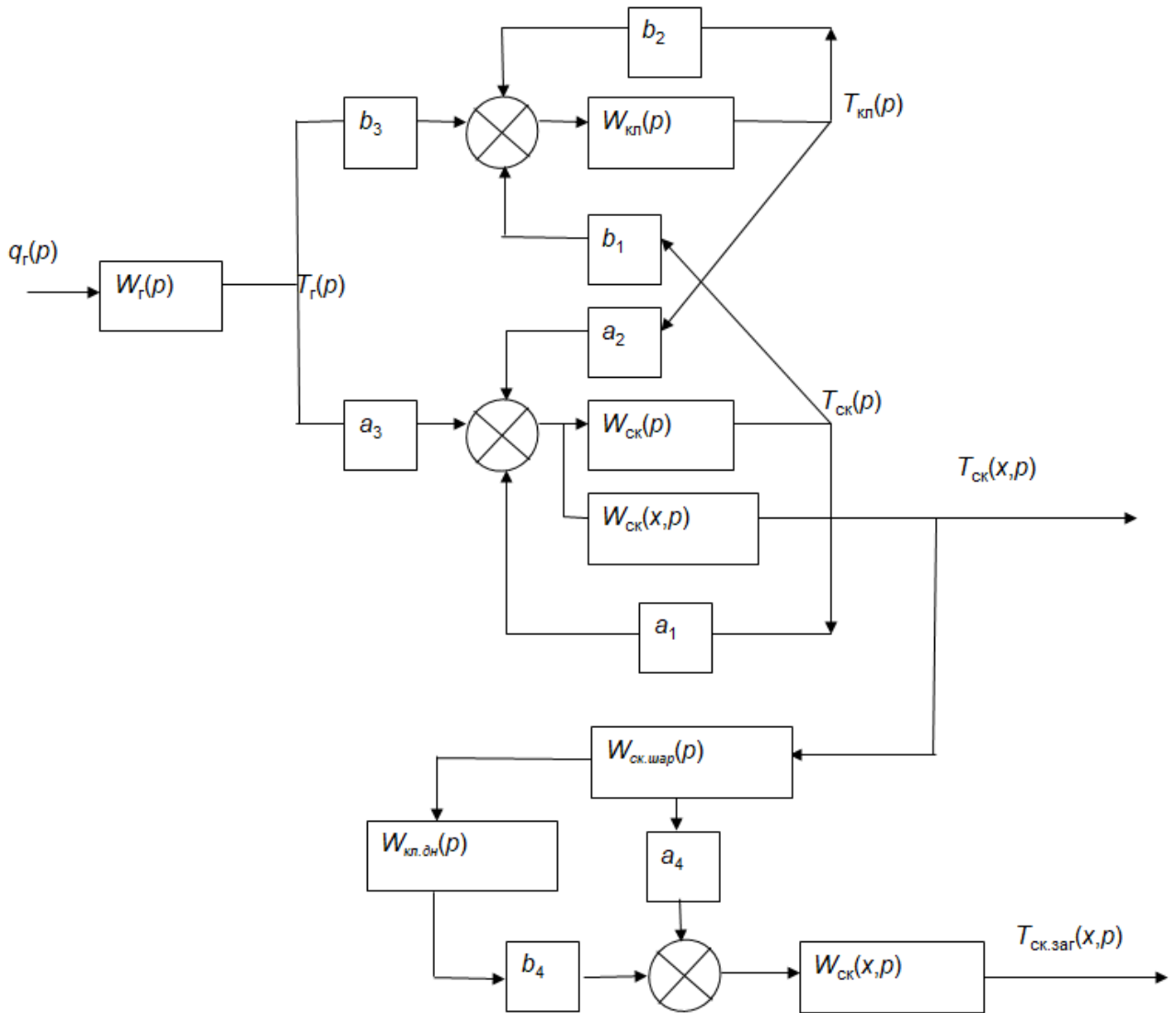


Рис. 3 Структурна модель об'єкта керування.

Зведена загальна передатна функція скловарної печі, що отримана зі структурної моделі, буде мати вигляд:

$$W_{печи}(p, x) = \frac{W_{ск.шар}(p)(a_4 + b_4 W_{кп.дн}(p)) W_{ск}(p, x_{шар})(1 - b_2 W_{кп}(p))(1 - a_1 W_{ск}(p)) W_{ск}(p, x) W_2(p)}{((1 - b_2 W_{кп}(p))(1 - a_1 W_{ск}(p)) - b_1 a_2 W_{ск}(p) W_{кп}(p)) W_{ск}(p)}$$

Використання передатних функцій пов'язано з тим, що даний інструмент представляє собою один із універсальних засобів дослідження об'єктів з розподіленими параметрами. Розраховані 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.

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

В основу побудови математичної моделі скломаси покладені взаємозв'язані рівняння внутрішнього та зовнішнього теплообміну в робочому просторі ванни печі, що є розв'язками системи рівнянь власного випромінювання за законом Стефана-Больцмана, горіння, теплообміну в робочому просторі та внутрішнього теплообміну. 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.

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

де x, y, z – координати уздовж осей, направлених відповідно по глибині шару шихти, по ширині печі і в напрямку повздовжньої осі. Експериментальні дослідження показали, що сальдо-потоки на скломасу з боку полум'яного простору не значним чином змінюються уздовж ширини печі. Зміна сальдо-потоків по ширині печі не перевищує 10%, тобто теплоперенос в поперечному перетині печі незначний. Це означає, що в лівій частині рівняння другий член на порядок менше, ніж сума решти членів, і ним можна нехтувати. Низька різниця між $T_{z1} - T_{zn}$ в одному шарі скломаси, тобто по відношенню до зміни температури по глибині в поперечному переріз ($T_{z1,x1} > T_{z1,xn}$) і по шарах ($T_{z1,x1}, T_{z2,x1} \dots T_{zn,x1}$) спостерігається однорідність температури, виходячи з даних експериментальних досліджень. Таким чином рівняння теплопровідності Фур'є зведено до одновимірного і роль часу відіграє

координата z

$$a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = V \frac{\partial T}{\partial z}$$

Вирішена одновимірна задача теплопровідності для необмеженої пластини товщиною h , при нульових початкових умовах та граничних умов другого роду. Температурне поля нагріву скломаси $T_{ck}(x,t)$, на всій довжині нестационарного процесу:

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

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

Другий доданок являє собою одновимірну задачу теплопровідності для необмеженої пластини товщиною h , при граничних умовах 2-го роду.

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

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.

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

Знайдені корені характеристичного рівняння, як розв'язок однорідного лінійного диференціального рівняння

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

де $C_1(p)$ та $C_2(p)$ знайдено із граничних умов

$$T_{ck}(x,p) = \frac{q_{ck}(p) \left(e^{x\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)}{\lambda_{ck} \left(e^{h\sqrt{\frac{p}{a}}} - e^{-h\sqrt{\frac{p}{a}}} \right)} \quad \text{або} \quad T_{ck}(x,p) = \frac{q_{ck}(p) \operatorname{sh}\left(\sqrt{T_1(x)p}\right)}{\lambda_{ck} \operatorname{sh}\left(\sqrt{T_2 p}\right)},$$

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

Передатна функція температурного поля скломаси

$$W_{ck}(x,p) = k_1 + k \frac{\operatorname{sh}\left(\sqrt{T_1(x)p}\right)}{\operatorname{sh}\left(\sqrt{T_2 p}\right)}.$$

$$\text{де } k = \frac{1}{\lambda_{ck}}, \quad k_1 = \frac{2 \cdot h - 3}{3\lambda_{ck}}.$$

Внутрішній бік кладки являє собою напівобмежене тіло (рис.4). Математичний опис кладки представлено у вигляді одновимірної задачі теплопровідності, товщина шару δ , при граничних умовах 2-го роду.

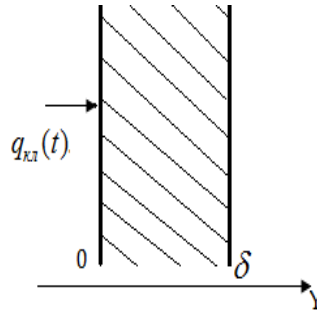


Рис. 4 Напрямок руху теплового потоку кладки $q_{кл}(t)$.

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

$$T_{кл}(y,p) = \frac{q_{кл}(p)}{\lambda_{кл}} \left(\frac{e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} e^{y\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}}}{\left(1 - e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}}\right)} - \frac{e^{-y\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}}}{\left(1 - e^{-2\delta\sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}}\right)} \right) \text{ або } T_{кл}(y,p) = q_{кл}(p) k_2 \frac{\text{sh}(\sqrt{T_3 p})}{\text{sh}(\sqrt{T_4 p})},$$

$$\text{де } k_2 = \frac{1}{\lambda_{кл}}, T_3 = \frac{(y-\delta)^2}{a_{кл}}, T_4 = \frac{\delta^2}{a_{кл}}.$$

Передатна функція кладки за каналом «тепловий потік кладки – температура кладки в характерній точці»

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

Характеристики зміни температури скломаса в різних шарах та кладки у характерній точці по товщині наведено на рис.5.

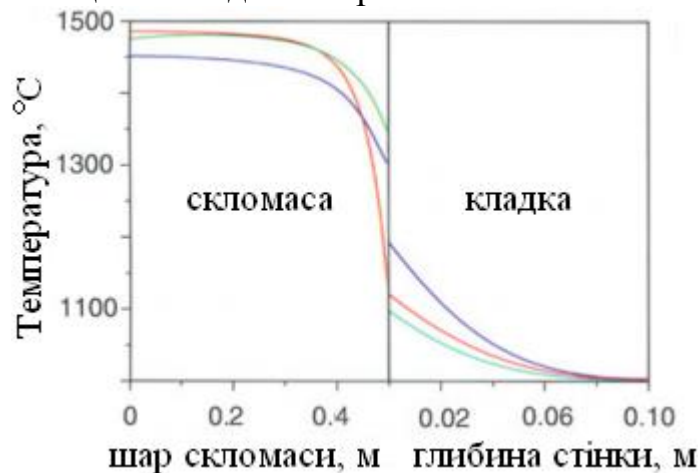


Рис. 5 Температури скломаса та кладки (перші 0,1м кладки, та різні зони по висоті шару скломаса)

Скломаса та кладка дна в поперечному розрізі, представлені наступними параметрами (рис.6): $\delta_{ск}$, $\delta_{кл}$ – 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.

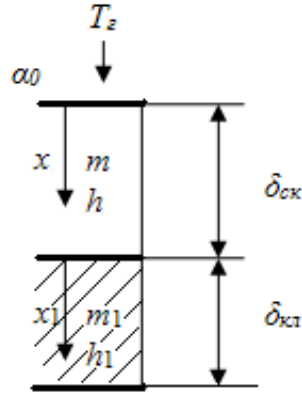


Рис. 6 Шари скломаси та кладки дна у поперечному розрізі.

Рівняння теплопровідності для скломаси та кладки, граничні умови на поверхні контакту газу та скломаси, умови ідеального теплового контакту між скломасою та кладкою, ідеальної теплової ізоляції на нижній поверхні кладки.

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

Розраховані передатні функції для скломаси та кладки дна

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

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

$$W_{T_2 \rightarrow T_{кл}(x)}(p, x) = \frac{D_3(p) \cdot e^{x_1 \sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}} - D_4(p) \cdot e^{-x_1 \sqrt{\frac{p}{a_{кл}}}}}{\Delta}$$

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

У **третьому розділі** проведено дослідження адекватності математичної моделі процесу нагрівання скломаси, розроблено апроксимуюча передатна функція ванни печі за каналом «витрата газу – вихідна температура скломаси» та проведено дослідження температурних полів скловарної печі.

Перевірка адекватності виконано, порівнюючи з даними виробництва, що отримані за показами термопар різних зон. При дослідженні адекватності розглянутої математичної моделі, враховано, що скловаріння є нелінійним процесом, підданим впливу зовнішніх керованих та некерованих збурень. До точок виміру температури вибрані: склепіння ($T_{скл1}$, $T_{скл2}$), дно ($T_{дно1}$, $T_{дно2}$), пірометр ($T_{пір}$), насадка ($T_{нас.п}$, $T_{нас.л}$). За табличними даними були побудовані графічні залежності по 42 точкам (7 днів, по 6 вимірів за добу). За моделлю були отримані результати, що відповідають експериментальним точкам виміру температури (рис.7).

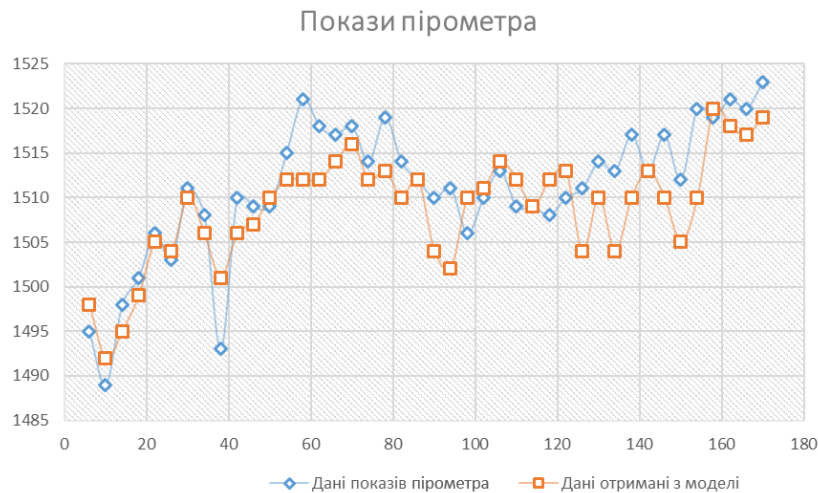


Рис.7 Приклад значення температур у точці «Покази пірометра»

В роботі вибрані критерій перевірки гіпотези адекватності Стьюдента та Фішера. За результатами експериментальних та розрахованих за моделлю значень, були розраховані математичні сподівання, дисперсії, відповідні критерії Стьюдента та Фішера. Рівень значущості $\alpha=0.05$. Для даних значень критичне значення критерія Стьюдента та Фішера дорівнюють відповідно: $t_{kr}=1,99$, $F_{kr}=2,018$. Внаслідок того, що всі розраховані критерії менші за критичні значення, то немає підстави відхилити гіпотезу про адекватність отриманої математичної моделі, що описує тепловий режим скловарної печі.

Не зважаючи на сучасний рівень програмного забезпечення, моделі розробленого типу потребують апроксимації внаслідок того, що в реальному часі розроблена модель не може бути використана в системі керування.

Модель печі як об'єкт із розподіленими параметрами представлений у вигляді матриці по просторовій координаті x , що відповідає за шар скломаси.

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

Для вирішення задачі апроксимації в роботі вибрано метод спрощення з використанням чебишевського наближення, як найбільш прийняттого методу для дробово-раціональної структури моделі. В якості критерія наближення буде прийняте максимальне значення помилки рівномірного наближення.

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

де $W(j\omega, x)$ – амплітудно-фазова характеристика; $H(j\omega, c(x))$ – апроксимуюча дробово-раціональна передатна функція, $c(x)$ – вектор невідомих коефіцієнтів, що розраховуються відповідно координати глибини скломаси x в точках контролю.

Розроблена апроксимуюча структура:

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

Апроксимуюча перехідна характеристика $h(c, t) = d_1 + d_2 t + d_3 e^{-d_4 t} ch(d_5 t) + d_6 e^{-d_4 t} sh(d_5 t)$,

де $d_1 = c_1 - c_0 c_6$; $d_2 = c_0$; $d_3 = c_0 c_6 - c_1$; $d_4 = c_4 / 2c_5$; $d_5 = \sqrt{c_4^2 - 4c_5} / 2c_5$;

$d_6 = (c_0 c_4^2 - c_1 c_4 + 2c_2 - c_0 c_5) / \sqrt{c_4^2 - 4c_5}$.

Чебишевське наближення, що підлягає мінімізації

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

Розв'язок поставленої задачі зведений до розв'язку системи нелінійних диференційних рівнянь та відбувається за допомогою $J(c_0)$ відносно значення c_0 .

Розраховано перехідні характеристики апроксимованої моделі $T_{ск}(t, x) = T_{ск0} + Gh(c, t)$, де $G = G_T / G_{MAX}$ – безрозмірний коефіцієнт витрати газу.

Використовуючи засоби імітаційного моделювання, для кожної із зон печі побудовано температурне поле у вигляді температурного розподілу в конкретному перерізі, з використанням апроксимованої моделі. Приклади температурних полів представлені на рис.8-11.

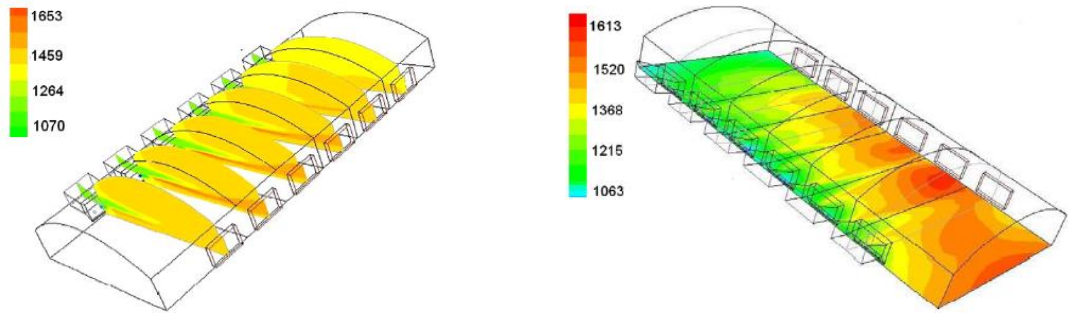


Рис.8 Температурний розподіл в зонах газового простору та по поверхні скломаси

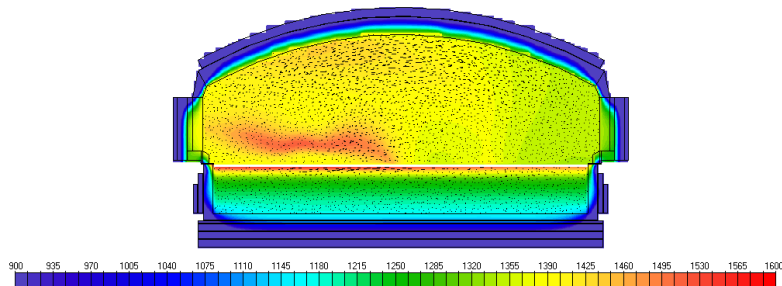


Рис. 9 Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

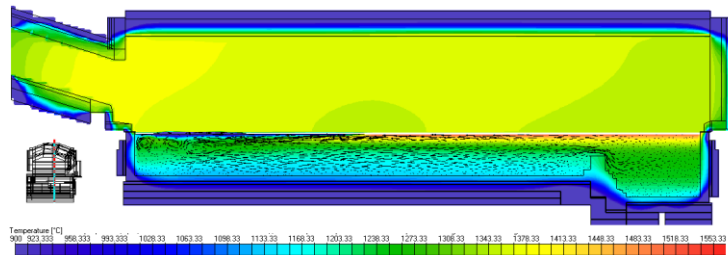


Рис. 10 Температурний розподіл в повздовжньому перерізі скловарної печі

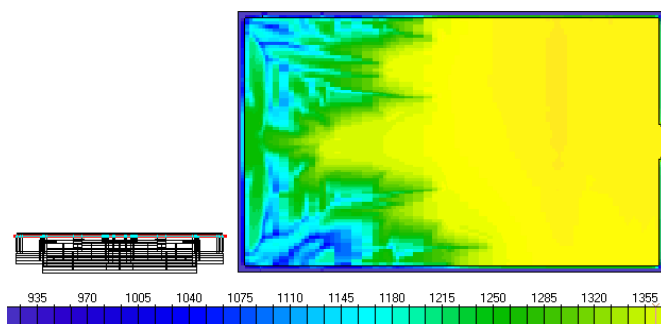


Рис. 11 Температурне поле поверхневого шару скломаси при зміні складу шихти.

За допомогою засобів імітаційного моделювання, проведено дослідження температурних полів у різних перерізах скловарної печі, досліджено результат дії збурення, які показали ряд недоліків у існуючій системі керування.

У розділі чотири обґрунтовано вибір критерію оптимальності, розроблені та досліджені системи програмного керування процесом варіння скломаси, адаптивна система керування та система керування з використанням алгоритмів нечіткої логіки. Проведено порівняльний аналіз розроблених систем.

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. Варіювання витрати газу забезпечує термічну однорідність виробничого потоку та температурне поле печі з відповідними властивостями. Показники 18 датчиків температури залежать від витрати газу по пальниках.

Сформована задача оптимально керування – при заданій продуктивності печі та складу шихти знайти вектор витрати газу U , при якому досягається мінімум критерія керування J .

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

де 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, що відповідає кількості вимірів температури за моделлю, t – поточний час.. 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, при значенні T_i більше за $T_{i_{max}}$ – перегрівання.

Запропонований критерій керування має переваги над аналогами: 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.

В роботі при синтезі адаптивної та нечіткої системи керування спиралися на результати роботи існуючої на виробництві каскадної системи керування скловарною піччю. Для дослідження системи керування тепловим режимом скловарної печі використано методи системного аналізу та універсальна мова програмування *UML* (рис. 12). На теоретично-множинному рівні технологічний процес представлений у вигляді відображень: $T_n: A \times B \times Y_{inp} \times R \rightarrow Y_{out}, 1 \leq n \leq N$, 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. Відображення T_n : T_1 - показання датчиків вимірювання, T_2 - кут повороту димового шибера, T_3 - витрата газ-повітря, T_4 - робота регенератора, T_5 - робота завантажувача, T_6 - реверс факелу, T_7 - візуальний контроль, T_8 - дія при аварійній ситуації, T_9 - зміна параметрів тех. процесу.

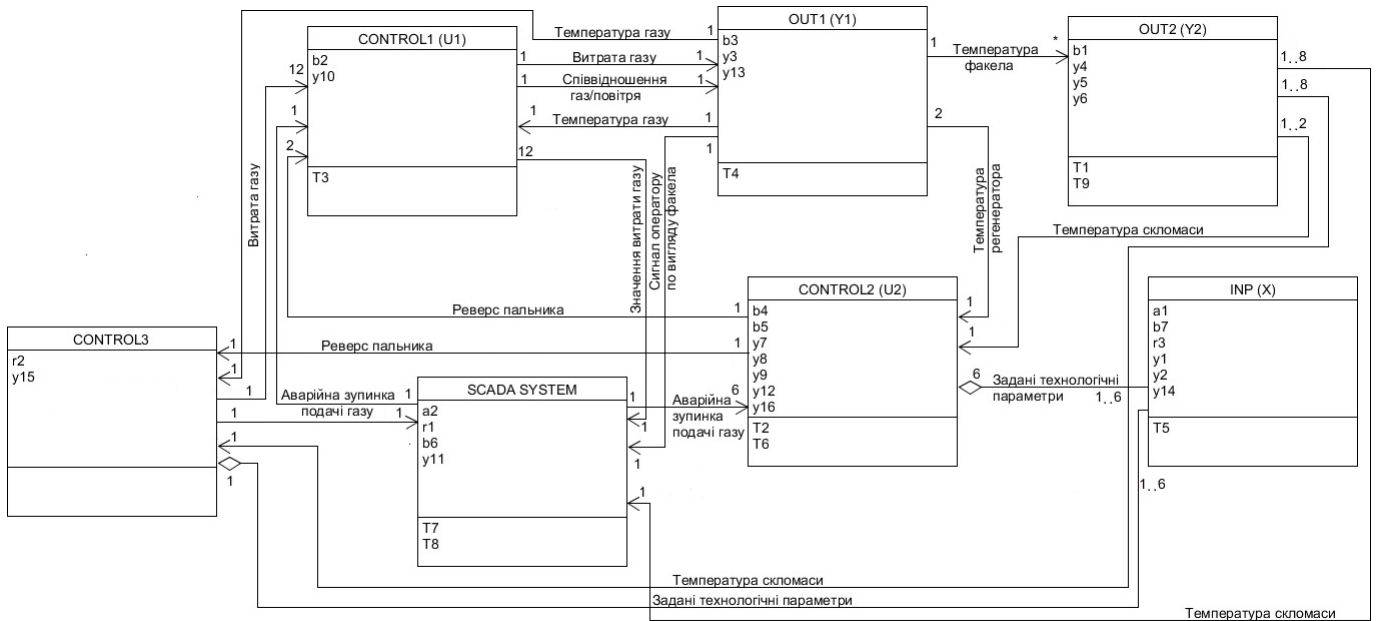


Рис. 12 Система керування скловарної печі з використанням діаграми класів UML.

В графічній формі описано всі складові алгоритму керування та взаємодія між ними в програмних блоках. Під класом розглянута конкретна складова системи керування. Процеси, що відбуваються в основному регуляторі (*control3*) представлено на діаграмі стану (рис. 13).

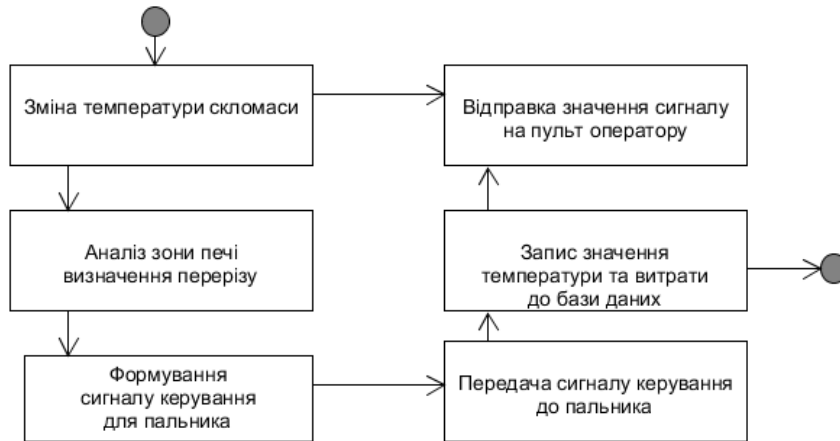


Рис. 13 UML діаграма стану процесу керування.

Проведено порівняльний аналіз роботи розробленої та класичної каскадної системи (рис. 14).

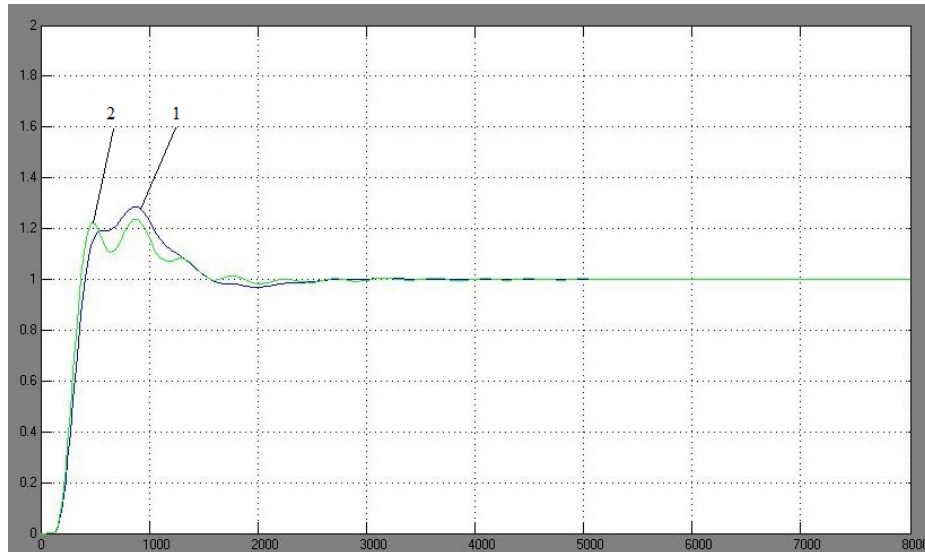


Рис.14 Перехідні процеси каскадної системи керування скловарної печі (1) та з використанням загального регулятора (2)

Поставлено задачі адаптивного керування – підтримка на заданому рівні температурного режиму роботи печі. Витрата пального збільшується від першого пальника до кавельпункту, а потім зменшується. Для вирішення задачі дотримання однорідності температурного поля скломаси, в системі керування використано блок адаптації (рис. 15) до зміни значень температури в температурному полі скломаси, викликаного променевими потоками тепла, що виділяється під час горіння палива.

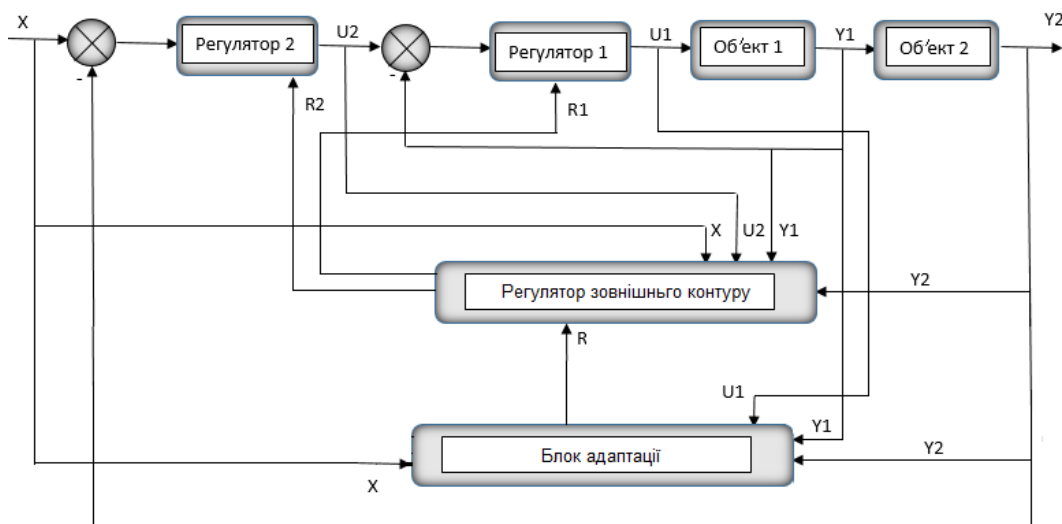


Рис. 15 Структурна схема системи керування скловарною піччю з використанням блоку адаптації для регулятора зовнішнього контуру.

R – регулювання подачі газу по кожній з пари пальників, $R1$ – вектор параметрів, що будуть переналаштовані, $R2$ – сигнал керування реверсом факела.

Запропоновано алгоритм адаптації Kr наступного виду $Kr^{n+1} = \alpha \cdot Kr^n + \beta$, де Kr^n – значення загального коефіцієнта підсилення регулятора перед адаптацією, Kr^{n+1} – нове значення загального коефіцієнта підсилення регулятора, n – номер кроку адаптації, α , β – коефіцієнти, що відповідають технологічним особливостям

об'єкту. Принципом розробленого адаптивного алгоритму керування є використання процесу порівняння сигналу $u(t)$ з даними технологічного регламенту виробництва. Блок адаптації реалізує алгоритм $u_i(t) < \varepsilon_i(t)$, де $\varepsilon_i(t)$ – сигнал неузгодженості, при займані ним відповідного значення, іде зміна Kr (рис.16).

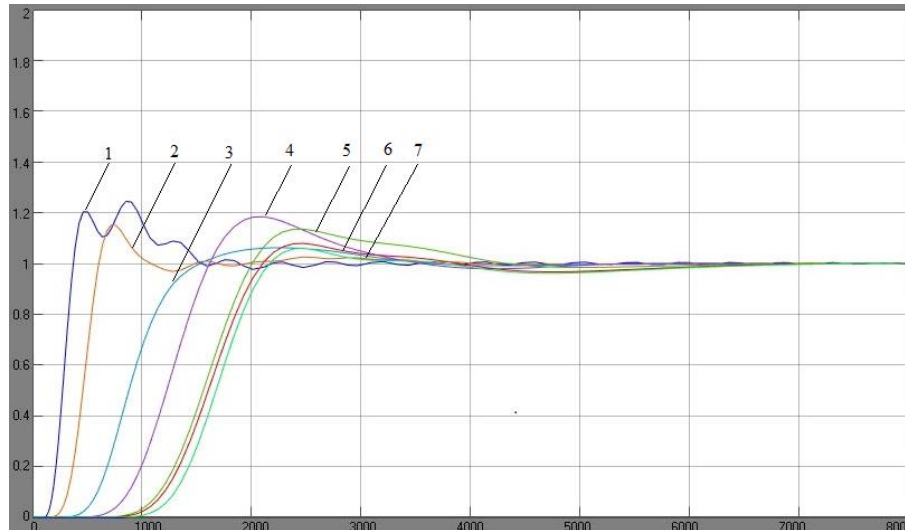


Рис. 16 Порівняльний графік перехідних процесів адаптивної системи керування скловарної печі по всіх зонах печі.

Розроблена нечітка система керування (рис. 17), що отримує на вхід вихідні дані по роботі системи у певних точках скловарної печі, на виході формує вектор налаштувань регулятора. Систему нечіткого висновку було реалізовано з використанням *Fuzzy Logic Toolbox*. Графіки функцій належності вхідних ($input1$ - $input7$ відхилення від заданого значення) та вихідних лінгвістичних змінних ($output1$ - $output7$ представляють собою переналаштований параметр регулятора kr). Розроблена база правил виду «Якщо – то» (*if-then*), базуючись на рекомендаціях експертів та технологів виробництва.

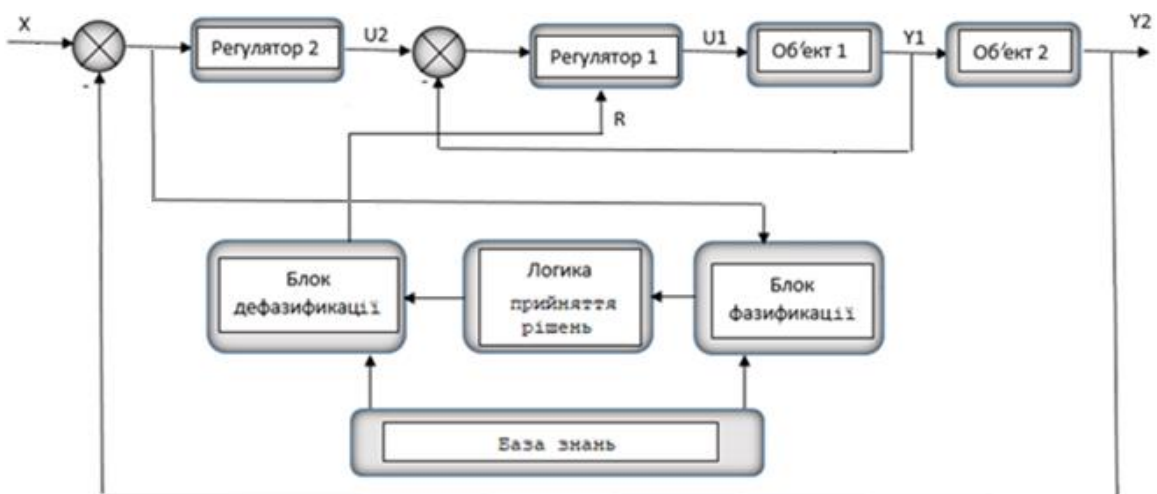


Рис. 17 Структурна схема системи керування скловарною піччю з використанням блоку нечіткого регулятора.

Проведено порівняльний аналіз та дослідження розроблених систем керування тепловим режимом скловарної печі (рис. 18).

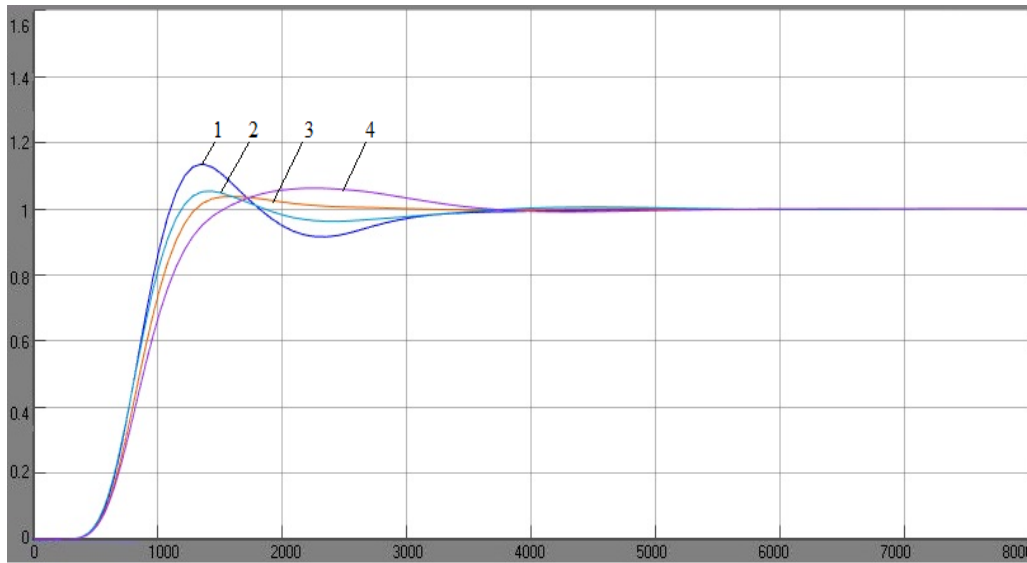


Рис. 18 Приклади перехідних процесів систем керування скловарної печі

На рис.18 наведені 1 – каскадна система, 2 – система з загальним регулятором, 3 – адаптивна система, 4 – система з використанням алгоритмів нечіткої логіки.

В роботі при синтезі систем керування використана квадратична інтегральна оцінка, що призначена для визначення оптимальних значень параметрів налаштування системи керування. Оптимальним вважають такі значення, які відповідають мінімуму інтегральної оцінки $I \rightarrow \min: I = \int_0^{\infty} |y(\infty) - y(t)|^2 dt = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)|^2 dt$,

де $\varepsilon(t)$ – похибка керування. За результатами проведених досліджень інтегральної оцінки, якість системи керування з адаптивним регулятором вища ніж в інших, що підтверджує її ефективність та перевагу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА 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*. Це 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.

ПУБЛІКАЦІ 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 (Національна академія наук України. Інститут кібернетики ім. 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 (Німеччина)

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 прийнятною.

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. **Ситніков А.В.** Система адаптивного управління стекловаренної печи ванного типу [текст] / А.В. Ситніков // 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. Ситніков** // 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.

АНОТАЦІЯ

Ситніков О.В. Моделювання та автоматичне керування тепловим режимом скловарної печі ванного типу. – 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.

Розроблено математичний опис скловарної печі як об'єкту дослідження та включає в себе рівняння зовнішнього теплообміну для скломаси, кладки та газу, що отримується з рівнянь балансу для ефективного та результуючого випромінювання поверхні та середовища у вигляді рівнянь відповідних теплових потоків. Для кожної зі складових розроблено математичний опис, що враховує взаємодію між складовими в моделі об'єкту керування. Дослідження показали, що модель динаміки нагрівання скломаси відповідає відповідним критеріям адекватності та може бути використана для синтезу системи керування. Експериментальні дослідження температурних полів скломаси дозволили виявити реакцію температурного поля скломаси та кладки на дії збурення.

Сформульована і розв'язана задача адаптивного керування процесом скловаріння загального регулятора, приведено порівняння результатів роботи розробленої системи з існуючою каскадною та експертною системою керування. Показано, що адаптивна система показала переваги над звичайною.

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

ANNOTATION

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. The glassmaking process is quite energy-intensive. Fuel prices are rising according to market trends, so gas must be used as economically as possible without compromising the quality of the products.

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.

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 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. 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. To solve the problem of 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 .

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. The development of the structure of the control system and the algorithm of adaptive software control took place using the UML programming language.

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)

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

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

Підп. до друку 05.05.2023. Формат 60×841/16. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,98.
Наклад 100 пр. Зам. № 23-031

. Видавництво «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15
03056, м. Київ
тел. (044) 204-81-78