

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Хавін Євген Валерійович



УДК 611.1.031.216

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ОПТИМАЛЬНОГО
ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛАВИЛЬНИХ РЕАКТОРІВ
СКЛЯНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кошельник Вадим Михайлович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри теплотехніки та
енергоефективних технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Цейтлін Мусій Абрамович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
професор кафедри хімічної техніки
та промислової екології

доктор технічних наук, професор
Петраш Віталій Дем'янович,
Одеська державна академія будівництва
та архітектури, професор кафедри опалення,
вентиляції та охорони повітряного басейну

Захист відбудеться " 18 " листопада 2010р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " 07 " лютого 2010р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05



Тимченко В.К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне хімічне виробництво поряд із зростанням вимог до якості і вартості виробів характеризується інтенсифікацією теплотехнологічних процесів. При цьому зростає інтенсивність корозійних процесів, унаслідок чого різко знижується стійкість вогнетривкої кладки у такому обладнанні, як плавильний реактор скляного виробництва. У реакторах ванного типу (варильних басейнах скловарних печей) найбільш інтенсивно руйнується верхня частина стіни плавильного реактору на рівні поверхні розплаву. У цих умовах застосування нестійких вогнетривких матеріалів є неприпустимим, тому що не забезпечує економічно доцільну тривалість кампанії реактора. Застосування більш стійких коштовних вогнетривів дозволяє підвищити температуру варіння скла до 1550-1600° С, але без застосування систем примусового охолодження, що дозволяють знизити температуру внутрішньої поверхні стіни варильного басейну, зменшуючи тим самим інтенсивність процесу руйнування, тривалість кампанії практично не зростає.

Найбільш розповсюдженим способом охолодження стін варильного басейну є обдув повітрям. За рахунок охолодження реактор може проробити тривалий час навіть при невеликій залишковій товщині стінового огороження (20-30 мм). Для стінових огорожень варильних басейнів скловарних печей можуть бути прийняті різні рішення за типом, товщиною вогнетриву і режимом охолодження. Тому задача вибору оптимального вогнетриву, виду і режиму охолодження, тобто такого сполучення факторів, що забезпечує найбільшу економічну ефективність кампанії реактора є актуальною. Таким чином, дослідження, які присвячено рішенню науково-практичної задачі підвищення ефективності технологічних реакторів ванного типу для виробництва скла на підставі оптимізації режимів повітряного охолодження та вибору раціональних конструктивних параметрів систем охолодження і вогнетривких огорожень реакторів, є своєчасними і мають важливе практичне значення під час проектування і експлуатації плавильних реакторів промислових печей та визначають напрямок дисертаційної роботи .

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, наведені у дисертаційній роботі, виконано на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ “ХПІ” в межах держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: "Розробка теплотехнологічного комплексу скловарна піч – установка випарного охолодження для виробництва скломаси і водяної пари з використанням енергозберігаючих теплотехнологій" (ДР № 0102U000984) та “Оптимізація енергоекономічних параметрів систем регенеративного тепловикористання високотемпературних установок промислових скловарних печей (ДР № 0105U000574), в яких здобувач брав участь як відповідальний виконавець окремих етапів тем.

Мета та задачі дослідження. *Мета роботи* – обґрунтування, постановка і рішення задачі визначення закономірностей процесів оптимального повітряного охолодження та вибір раціональних конструктивних параметрів систем охолодження і стінових огорожень плавильних реакторів скляного виробництва (варильних басейнів скловарних печей).

Для досягнення мети необхідно вирішені наступні *задачі*:

- розробити і реалізувати удосконалені математичні моделі теплопередачі від розплаву скломаси до зовнішньої поверхні вогнетривкої стінки плавильного реактору на рівні дзеркала скломаси та розрахунку періоду стійкості (кампанії) стінового огороження;

- встановити функціональну залежність періоду стійкості стінового вогнетриву від його товщини та інтенсивності охолодження зовнішньої поверхні стін плавильного реактору;

- визначити залежності для цільових функцій оптимізації на основі взаємозв'язку охолодження і холодного ремонту плавильного реактора, екстремальні значення яких дозволяють одержати закономірності процесу оптимального охолодження з урахуванням техніко-економічних показників;

- сформулювати постановку і реалізувати чисельне рішення задачі визначення закономірностей процесів оптимального повітряного охолодження стінових огорожень плавильних реакторів скляного виробництва;

- провести розрахункові дослідження з визначення оптимальних режимів повітряного охолодження, вибору конструктивних параметрів систем охолодження та стінового огороження плавильних реакторів з дискретно-струминним і струминно-каналним способами охолодження.

Об'єктом дослідження є процеси та системи повітряного охолодження стінових огорожень плавильних реакторів скляного виробництва (варильних басейнів скловарних печей).

Предметом дослідження є закономірності аеродинаміки і тепломасообміну для процесів оптимального охолодження, вплив параметричних характеристик соплових апаратів систем повітряного охолодження та стінових огорожень плавильних реакторів скляного виробництва на ефективність охолодження.

Методи дослідження. Теоретичною основою дисертаційного дослідження є положення теорії тепломасообміну, методи математичного моделювання і теорія оптимального керування. Нелінійна задача теплопередачі через плоску стінку реактору вирішувалась методом теплового балансу з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності від температури за наявності струминного теплообміну на зовнішній поверхні стінки та зведено до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які розв'язані ітераційним методом. Період стійкості стінового бруса розраховано чисельним інтегруванням при експоненціальній залежності швидкості корозії від температури. Для рішення задачі оптимального керування використовується метод штучно-постійної апроксимації керування, що дозволяє звести задачу до пошуку екстремуму функції багатьох змінних. Задача пошуку оптимального розв'язку вирішувалася шляхом комбінації методу координатного спуску з методом золотого перетину.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- набув подальшого розвитку метод розрахунку періоду стійкості стінового огороження і теплопередачі через стіновий брус плавильного реактору, де у математичних моделях, у відміню від відомих, використано експоненціальну залежності швидкості зносу вогнетриву від температури і функціональну залежність теплового опору пристінного шару скломаси від теплового опору стінки реактору;

- вперше сформульовано математичну постановку і розроблено методику чисельного рішення задачі визначення закономірностей оптимальних режимів для процесів повітряного охолодження стінових огорожень плавильних реакторів скляного виробництва;

- отримано нові залежності для цільових функцій оптимізації процесу повітряного охолодження з урахуванням взаємозв'язку охолодження, кампанії і холодного ремонту плавильного реактора;

- вперше визначено параметри оптимальних режимів повітряного охолодження і раціональні конструктивні параметри систем охолодження та стінового огороження варильного реактору скловарної печі з дискретно-струминним і струминно-каналним засобами повітряного охолодження.

Практичне значення отриманих результатів. Методи, алгоритми і програмне забезпечення, які розроблено в дисертаційній роботі, розширюють розрахункову базу проектування та керування експлуатаційними режимами скловарних печей, забезпечуючи вибір і оптимальне сполучення стінового вогнетриву з економічно оптимальним режимом роботи системи охолодження. Результати роботи використано для вибору режиму оптимального повітряного охолодження басейну для варки оптичного скла на скловарній печі ДП "ІЗОЛ" (м. Ізюм). Результати досліджень передано до ДП «Український науково – дослідний інститут скла» (м. Констянтинівка), де їх використано для впровадженні науково – технічних заходів з підвищення ефективності роботи систем регенерації і повітряного охолодження плавильного реактору промислової скловарної печі.

Матеріали дисертаційної роботи використано у навчальному процесі кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ "ХП" під час підготовки спеціалістів – теплоенергетиків у курсі «Системи виробництва і розподілу енергоносіїв» та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації отримано здобувачем особисто, серед них: методики розрахунку корозійної стійкості стінового огороження та теплопередачі через стінку басейну скловарної печі; реалізація чисельної методики визначення оптимальних режимів повітряного охолодження варильних басейнів скловарних печей; розрахунки оптимальних режимів і раціональних параметрів систем дискретно-струминного і струминно-каналного охолодження стін варильного басейну скловарної печі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи обговорювалися на: Міжнародній науково - технічній конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я", (Харків, 2002 р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве", (Харків, 2003 р.); першій міжвузівській науково – практичній конференції "Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій", (Харків, 2003 р.); 4-ій міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми информатики и моделирования", (Харків, 2004 р.); 13-ій і 16-ій Міжнародних науково-практичних конференціях "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье", (Харків, 2005, 2008 р.р.). Матеріали дисертаційної роботи доповідались на наукових семінарах і засіданнях кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ "ХП" у 2004 – 2010 р.р.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 11 наукових праць, з яких 9 статей – у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, додатка і списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 146 сторінок, у якому 31 рисунок по тексту, 8 рисунків на 4-х окремих сторінках, 12 таблиць по тексту, 7 таблиць на 5-и окремих сторінках, додаток на 5-и сторінках, список джерел з 116-и найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та предмет дослідження, показано новизну і достовірність наукових результатів та їх практичне значення, приведено інформацію щодо апробації роботи та публікації основних результатів.

У першому розділі проаналізовано стан моделювання процесів теплообміну у хімічних реакторах скляного виробництва за умови охолодження. Досліджено службу вогнетривів у реакторах скловарних печей і наведено аналіз залежностей для розрахунку теплообміну за умови струминного повітряного охолодження. Представлено огляд робіт Д.Б. Гінзбурга, Н.А. Захарікова, О.Н. Попова, О. Фервонера та ін. з досліджень експлуатації вогнетривів у хімічних реакторах і стійкості вогнетривів у розплавах скла. Систематизовано дослідження з застосування повітряного охолодження плавильного реактору (далі – варильного басейну) печі, як засобу збільшення кампанії. На підставі робіт Б.П. Дибана і А.І. Мазура, В.П. Ісаченко і В.І. Кушнар'ова, Гордона та ін. вивчено особливості теплообміну під час взаємодії повітряних струменів з перешкодами для дискретних струминних ланцюжків (дискретно-струминні системи) та багаторядних струминних систем в обмеженому просторі (струминно-каналні системи). Обґрунтовано вибір напрямків досліджень за темою дисертаційної роботи.

Обстеження за 3-4 року роботи обладнання, яке застосовується у технологічному процесі скловаріння, показало, що фактором, який визначає строк служби до холодного ремонту (кампанію) хімічних реакторів скловарних печей є стійкість верхньої частини стін варильного басейну на рівні дзеркала скломаси. Підвищення стійкості стін варильного басейну дозволяє збільшити кампанію скловарної печі в 2-3 рази (до 7-8 років і більш.). Стійкість кладки варильного басейну крім складу скла найбільше істотно залежить від температури варіння, причому ця залежність носить яскраво виражений експоненціальний характер. Інтенсифікація відбору тепла із зовнішньої поверхні кладки басейну за допомогою охолодження дозволяє підсилити процес теплопередачі через стіновий брус та, зменшуючи швидкість корозії за рахунок зниження температури внутрішньої стінки басейну, збільшити кампанію печі. Для охолодження кладки використовуються різні варіанти повітряного (рис. 1), водяного та випарного охолодження. В даний час немає якої-небудь обґрунтованої концепції вибору способів і режимів охолодження, що забезпечує

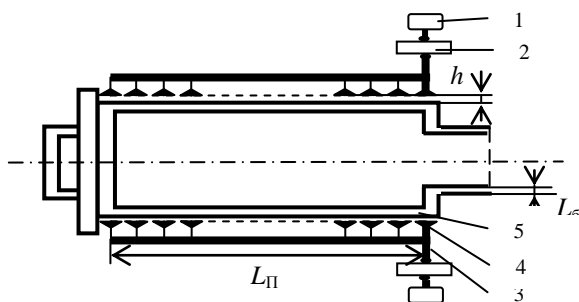


Рис. 1 Схема системи охолодження:
1 – електродвигун; 2 – вентилятор;
3 – повітряпровід; 4 – сопловий апарат;
5 – брус, що охолоджується.

максимальну ефективність. Зокрема, рекомендації з режимів охолодження найпоширенішим способом – струминним охолодженням повітрям носять чисто емпіричний характер.

Огляд досліджень з теплообміну в дискретно-струминних та струминно-каналних схемах повітряного охолодження дозволив виявити експериментальні залежності, що забезпечують достовірний розрахунок потужності для систем повітряного

охолодження.

Аналіз стану питання дозволив сформулювати актуальний напрямок досліджень, який полягає в тому, що до проблеми підвищення кампанії печі слід підходити комплексно. Це означає, що треба вирішувати задачу підбору такого сполучення режиму охолодження, матеріалу і геометрії стінового бруса, витрат на холодний ремонт, додаткових витрат палива та інших додаткових витрат, що буде забезпечувати оптимальний процес охолодження вогнетриву з урахуванням техніко-економічної сторони проблеми

В другому розділі викладено постановку задачі оптимального керування процесом охолодження хімічних реакторів-басейнів ванних скловарних печей, яка полягає у визначенні закономірностей і параметрів оптимальних режимів повітряного охолодження за кампанію печі. Це забезпечує такий період стійкості стінового вогнетриву басейну печі, що при заданому матеріалі та товщині стінового бруса, витратах на додаткове паливо і холодний ремонт печі дає мінімум додаткових питомих фінансових витрат або максимум питомого чистого прибутку, тобто забезпечує максимальну ефективність охолодження.

Для рішення сформульованої задачі оптимального керування процесом охолодження хімічного реактора використовується метод штучно-постійної апроксимації керування – закону зміни коефіцієнта примусового теплообміну. Штучно-постійна апроксимація дозволяє звести задачу до мінімізації функції багатьох змінних, якими є коефіцієнти теплообміну. Як цільові розглянуто функції питомих додаткових витрат та питомого прибутку. Для мінімізації використаний координатний спуск в сполученні з золотим перетином.

Період стійкості стінового бруса у роботі розраховано чисельно, при експоненціальній залежності швидкості корозії від температури. Температури поверхонь вогнетривкої стіни басейну печі визначено на основі моделі теплопередачі через стінку з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності вогнетриву від температури, зворотно-пропорційної залежності теплового опору пристінного шару скломаси від теплового опору стінки за наявності теплообміну на зовнішній поверхні. Задачу розрахунку граничних температур зведено до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, яка розв'язана ітераційним методом. Вірогідність апроксимацій забезпечується порівнянням з експериментальними залежностями теплового опору пристінного шару скломаси та швидкості корозії вогнетривів від температури.

Модель розрахунку періоду стійкості стінового бруса басейну печі T_{Π} (кампанії печі) запропоновано у роботі у вигляді інтеграла за товщиною бруса L :

$$T_{\Pi} = \int_{L_{\text{осм}}}^{L_6} W^{-1}(t_B^*) dL, \quad (1)$$

де L_6 – початкова товщина стінового бруса; $L_{\text{осм}}$ – залишкова товщина стінового бруса; W – швидкість руйнування на рівні дзеркала скломаси; t_B^* – температура внутрішньої поверхні вогнетриву, °K.

Швидкість руйнування W описується експоненціальною залежністю

$$W = e^{(A^* - B^* / t_B^*)}, \quad (2)$$

де A^* , B^* – константи, що залежать від типу вогнетривкого матеріалу, виду скла та визначаються експериментально. Коректність залежності швидкості руйнування від температури у

вигляді експоненти підтверджується зіставленням з експериментами, які наведено у роботах О.Н. Попова.

Теплопередача від розплаву скломаси до зовнішньої поверхні вогнетривкої стінки згідно з Н.А. Захаріковим подавалася у вигляді стаціонарної задачі теплопередачі через стінку. Особливостями моделі дисертаційної роботи є залежність коефіцієнта теплопровідності вогнетриву від температури і зворотно-пропорційна апроксимація залежності теплового опору пристінного шару скломаси від теплового опору стінки. Визначення граничних температур t_B, t_H зводиться до розв'язання системи нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \lambda_{\Theta}(t_B - t_H) = L\alpha_c(t_H - t_0), \\ K_C(t_C - t_B) = K(t_C - t_0), \end{cases} \quad (3)$$

де $\lambda_{\Theta} = \lambda_{\Theta}(t_B, t_H)$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності стінового бруса; $\alpha_c = \alpha_L + \alpha$ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні стінки, що включає α_L і α – коефіцієнти променистого та конвективного теплообміну, променистий теплообмін задавався законом Стефана-Больцмана; $K_C = K_C(t_B, t_H)$, $K = K(t_B, t_H)$ – відповідно коефіцієнти теплопередачі пристінного шару скломаси і стінки басейну в цілому; t_C, t_0 – температури скломаси та повітря.

На основі залежностей між критеріями Нуссельта і Рейнольдса для середнього теплообміну в дискретно-струминних ($Nu = 0,36 Re^{0,63}$) та струминно-каналних ($Nu = \epsilon Nu_{\infty}$) системах струминного повітряного охолодження, де $Nu_{\infty} = 0,018 Re_K^{0,8}$ – рівняння для стабілізованого турбулентного плинку в каналі, ϵ – коригувальний коефіцієнт, запропонований А.І. Мазуром, отримано співвідношення для потужності N_{2i} систем охолодження в залежності від аеродинамічного опору та витрат повітря. При визначенні аеродинамічного опору струминно-каналної системи охолодження ζ^* додатково до опору системи до зрізу соплових отворів ζ згідно з рекомендацій А.І. Мазура враховується опір вдуву ζ_1 та прокачування ζ_2 середовища через канал.

У розділі обґрунтовано рекомендації з вибору ширини сопла дискретно-струминної системи охолодження та геометрії соплового апарата струминно-каналної системи охолодження (діаметр отворів, крок перфорації та відстань до охолоджуваної поверхні) за умови мінімізації потужності, необхідної для забезпечення заданого коефіцієнта теплообміну, що є однією із проблем для процесів охолодження хімічних реакторів.

У **третьому розділі** подано розрахунки стійкості стінового вогнетриву в залежності від інтенсивності охолодження. Перевірку основних математичних моделей – розрахунку температурного поля та стійкості стінового вогнетриву було проведено порівнянням з експериментальними даними з роботи В.М. Будова, у якій наведено результати спостережень за вогнетривами басейну печі Салаватського заводу. Корозійний знос вогнетриву моделювався

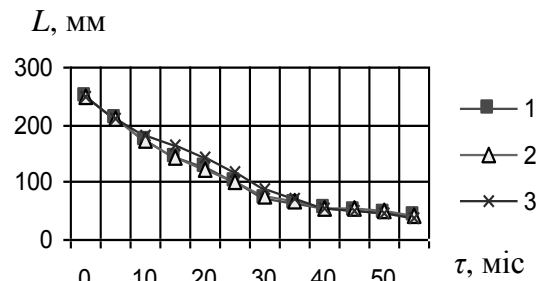


Рис. 2 Зміна товщини бруса на рівні дзеркала скломаси: 1 – $\alpha=200$ Вт/(м²К) у перші 30 місяців роботи, $\alpha=300$ Вт/(м²К) – у заключний період; 2 – $\alpha=240$ Вт/(м²К) у перші 30 місяців роботи, $\alpha = 360$ Вт/(м²К) – у заключний період; 3 – експеримент

на основі залежностей (1) - (3). Діапазони значень коефіцієнтів теплообміну відповідали зазначеним у роботі В.М. Будова витратам повітря за умови ширини сопла 15-20 мм і ширини охолоджуваної поверхні 200-300 мм. Розрахункову зміну товщини вогнетривкого бруса і середню експериментальну зміну товщини на рівні дзеркала скломаси наведено на рис. 2. Розбіжність у результатах розрахунку та експерименту (до 20 %) можна вважати задовільною, причому розрахунок дає підвищену швидкість зносу, що йде в запас стійкості. Також були проведені розрахунки кінетики роз'їдання вогнетривів (періоду стійкості) для прикладу з роботи О.Н. Попова. Розбіжність у результатах склала 5-15 %, можливо це зв'язано з тим, що не враховувалась залежність коефіцієнта теплопровідності від температури, а швидкість корозії задавалася табличною, відповідно до експериментальної кривої. Для трьох вогнетривких матеріалів – бакор 33, 41 та ХАЦ 30 було проведено розрахунки з оцінки впливу товщини бруса та режиму охолодження його поверхні на стійкість у розплаві натрійкальційсилікатного скла. Як приклад, на рис. 3, 4 показано залежності періоду стійкості (T_{Π}) від коефіцієнта теплообміну (α) і товщини вогнетриву (L_6). Аналіз результатів показав, що інтенсивне повітряне охолодження при $\alpha = 150-200$ Вт/(м²К) дає підвищення стійкості вогнетривів стінового бруса у 3-5 разів. Більш інтенсивне, наприклад, випарне охолодження ($\alpha > 300$ Вт/(м²К)) забезпечує підвищення стійкості в 10-12 разів у порівнянні з охолодженням шляхом природної тепловіддачі, причому стійкість стінового бруса при такому охолодженні не лімітує кампанію печі, тому що період стійкості в цьому випадку досягає 6-25 років.

У четвертому розділі сформульовано постановку задачі і методику розв'язання задачі

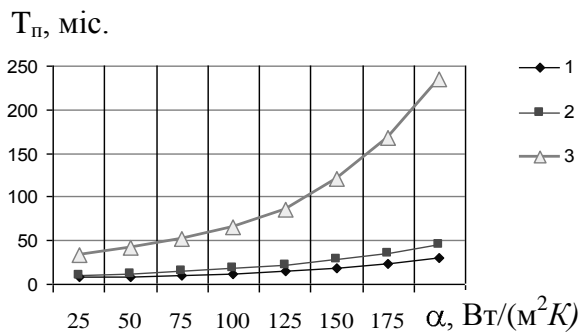


Рис. 3. Залежність періоду стійкості від коефіцієнта теплообміну ($L_6=300$ мм):
1 – бакор 33; 2 – бакор 41; 3– ХАЦ 30

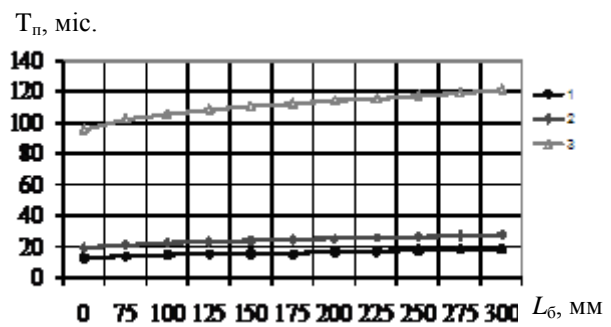


Рис. 4. Залежність періоду стійкості від товщини вогнетриву $\alpha=150$ Вт/(м²К):
1 – бакор 33; 2 – бакор 41; 3 – ХАЦ 30

оптимізації процесу охолодження. Отримано залежності для цільових функцій у вигляді додаткових питомих фінансових витрат і питомого прибутку за кампанію печі, пов'язаних із охолодженням басейну та холодним ремонтом печі.

Сумарні витрати за повну кампанію печі S_{Π}^* , зв'язані з процесом примусового охолодження басейну та проведенням холодного ремонту, подаються сумою $S_{\Pi}^* = \sum_{j=1}^6 S_j$, а питомі витрати S_{Π} і питомий прибуток Π мають вигляд:

$$S_{\Pi} = \left(\sum_{j=1}^5 S_j + S_6^* \right) T_{\Pi} / (T_{\Pi} + T_P)^2, \quad (4)$$

$$\Pi = [\bar{S}_{\Pi} P(T_{\Pi} - T_p) - \sum_{j=1}^5 S_j] / (T_{\Pi} + T_p), \quad (5)$$

де T_{Π} – робоча кампанія печі, T_p – час холодного ремонту печі; $S_1 - S_6$ – додаткові повні фінансові витрати, зв'язані з процесом примусового охолодження стін варильного басейну та проведенням холодного ремонту; $S_1 = \bar{S}_T N_1$ – вартість енергії, що відводиться охолодженням, визначається через вартість теплової енергії \bar{S}_T та енергію N_1 , що відбирається охолодженням; $S_2 = K_0^* + S_0^*$ – витрати на виготовлення та монтаж (K_0^*) та експлуатацію (S_0^*) системи охолодження, віднесені до кампанії печі; S_3 – інші додаткові експлуатаційні витрати за кампанію печі, основна частка яких зв'язана з тепловою енергією, необхідною для компенсації утрат, що зростають у процесі експлуатації. Але через ізольовані основні елементи конструкції сучасних скловарних печей за кампанію практично не зростають додаткові теплові витрати, тобто в розрахунках можна прийняти $S_3 = 0$; S_4 – вартість холодного ремонту печі, S_5 – витрати, зв'язані з утратою тепла при розігріві та зупинці печі на ремонт; $S_6 = \bar{S}_{\Pi}^* P T_p$ – непрямі витрати, зв'язані з утратою прибутку через зупинку печі на ремонт, визначаються питомим чистим прибутком, одержуваний при роботі печі \bar{S}_{Π}^* і продуктивністю печі P .

Прибуток і витрати віднесені до повної кампанії $T_{\Pi} + T_p$.

Задача визначення закономірності процесу оптимального охолодження полягає в пошуку такого закону зміни коефіцієнта тепловіддачі за кампанію печі, що мінімізує питомі витрати (4) ($S_{\Pi} \Rightarrow \min$) або максимізує питомий прибуток за повну кампанію печі (5) ($\Pi \Rightarrow \max$). Задача розрахунку оптимального процесу охолодження являє собою задачу оптимального керування, що складається у визначенні коефіцієнта тепловіддачі α , який мінімізує функцію S_{Π} або максимізує функцію Π . На керування накладаються обмеження, зв'язані з технічними можливостями системи охолодження

$$\alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_m. \quad (6)$$

Залежно від коефіцієнта тепловіддачі відповідним чином змінюються зовнішня та внутрішня температури стінового бруса: $t_H = t_H(\alpha_c, L)$, $t_B = t_B(\alpha_c, L)$, де $L = L(\tau)$ – товщина стінового бруса в момент часу τ . Період стійкості стінового бруса (робоча кампанія) визначається інтегралом стійкості, а для визначення температур t_B і t_H використовується нелінійна система рівнянь теплопередачі. Величина потужності, споживаної системою охолодження N_2 , визначається конструкцією системи охолодження та коефіцієнтом теплообміну $\alpha = \alpha(\tau)$.

Розглянуто методику чисельного розв'язання задачі оптимізації процесу охолодження. Унаслідок того, що період стійкості T_{Π} і потужність системи охолодження N_2 являють собою неявні функції коефіцієнта теплообміну, функція керування визначалася у вигляді кусково-сталих значень, тобто $\alpha = \alpha_i$ при $\tau_i \leq \tau \leq \tau_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots, N$, $\tau_1 = 0$, $\tau_N = T_{\Pi}$. При цьому для досить великої величини N можна вважати, що за відрізок часу роботи системи охолодження з $\alpha = \alpha_i$ за час $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i$ температури внутрішньої і зовнішньої стінок басейну t_{Bi} , t_{Hi} та швидкість корозії W_i в часі не змінюються $t_{Bi} = \text{const}$, $t_{Hi} = \text{const}$, $W_i = W(t_{Bi}) = \text{const}$, $\tau_i \leq \tau \leq \tau_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots, N$, що дозволяє спростити вирази для періоду стійкості

$$T_{\Pi} \cong \Delta L \sum_i^N W^{-1}(t_{Bi}), \text{ де } \Delta L = (L_6 - L_{\text{ост}}) / N. \quad (7)$$

Унаслідок кусково-сталої апроксимації функцій α_c , t_H , t_B , W відповідним чином спрощуються функції (4, 5), що з урахуванням виразів для $S_1 - S_6$, докладно поданих у дисертаційній роботі, здобувають вигляд:

$$S_{\Pi} = \left\{ S_4 + S_5 + \Delta L \sum_{i=1}^N \bar{S}_{3i} W_i^{-1}(t_{Bi}) + \bar{S}_{\Pi} P T_P \right\} \frac{T_{\Pi}}{(T_P + T_{\Pi})^2}, \quad (8)$$

$$\Pi = \left\{ \bar{S}_{\Pi} P (T_{\Pi} - T_P) - (S_4 + S_5 + \Delta L \sum_{i=1}^N \bar{S}_{3i} W_i^{-1}(t_{Bi})) \right\} \frac{1}{(T_P + T_{\Pi})}, \quad (9)$$

де $\bar{S}_{3i} = (\bar{S}_T \alpha_{ci} (t_{ni} - t_0) + \bar{S}_2^* N_{2i}) 2x L_{\Pi} + \bar{S}_3^*$ - еквівалентні питомі витрати, зв'язані охолодженням стіни реактора довжиною L_{Π} та шириною $2x$ на i -ому відрізку часу, коли коефіцієнт теплообміну $\alpha_{ci} = \text{const}$, та питома потужність системи охолодження $N_{2i} = \text{const}$; \bar{S}_2^* - питома вартість енергії, споживана системою охолодження; $\bar{S}_3^* = \bar{S}_1^* + \bar{K}_0 / A_H$ - питома експлуатаційна вартість системи охолодження, що залежить від вартості обслуговування та поточного ремонту системи охолодження \bar{S}_1^* , витрат на розробку, виготовлення і монтаж системи охолодження \bar{K}_0 , амортизаційного періоду для системи охолодження A_H .

Обмеження (6) у дискретному варіанті має вигляд

$$\alpha_0 \leq \alpha_i \leq \alpha_m, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

Таким чином, задача оптимального керування процесом охолодження в дискретній постановці являє собою задачу мінімізації функції декількох змінних (8) (або максимізації функції (9)) при обмеженнях (10).

Для одержання чисельних результатів було створено програмне забезпечення, де було використано метод координатного спуску у сполученні з методом золотого перетину.

У п'ятому розділі наведено результати практичних розрахунків з визначення закономірностей оптимальних режимів роботи дискретно-струминної та струминно-канальної систем охолодження і визначення параметрів стінового огороження реактору з бакору 33 стосовно великогабаритної печі. Система дискретно-струминного охолодження є складовою хімічного реактору – басейну у вигляді: ланцюжка сопел прямокутного перетину, улаштованих із зовнішньої сторони уздовж варильного басейну на рівні дзеркала скломаси. Охолодженню піддавалася верхня частина причілків шириною $2x=300$ мм. (рис. 1). Система струминно-канального повітряного охолодження за винятком видувного апарата має таку ж конструкцію, як і система дискретно-струминного охолодження. Відмінність полягає в тому, що замість сопел-насадок використовується перфорована стінка короба, що знаходяться від охолоджуваної поверхні на відстані h ; перфорацію виконано отворами діаметром d із кроком s .

Були проведено дослідження з оцінки ефективності цільових функцій (4) та (5) при

заданому вогнетриві і конструктивно-технологічних параметрах систем охолодження (площа соплових отворів, температура повітря та інше). Розрахунки проводилися за умови обмежень на α_i , Вт/(м²К): $11,6 \leq \alpha_i \leq 350$, $i = 1, 2, \dots, N$. Нижнє значення α_i відповідає природній конвекції, верхнє—визначалося максимальною потужністю нагнітачів. Використані в розрахунках інші технічні, фізичні та економічні характеристики нараховують 52 найменування і подані у дисертаційній роботі. Розрахунки показали, що вже при параметрі дискретизації $N \geq 80$ спостерігається збіг результатів оптимізації (для $N=70$ і $N=80$) з точністю до 1-2 %, тому всі розрахунки з оптимізації охолодження проводилися з $N = 100$. Отримані оптимальні результати для всіх цільових функцій перераховувалися до питомого чистого прибутку (5). Аналіз результатів показав, що використання цільових функцій (4) та (5) дає практично однакові оптимальні рішення. Внаслідок цього у всіх розрахунках використовувалася цільова функція (5).

В роботі проведено дослідження з вибору ширини сопла для дискретно-струминної та відстані від видувних отворів до охолоджуваної поверхні (висоти каналу) у струминно-каналній схемі охолодження. На рис. 5 наведено залежності результатів оптимізації від ширини сопла (дискретно-струминна система) та відстані до охолоджуваної поверхні (струминно-канална система).

Границі зміни параметрів $5 \text{ мм} \leq b \leq 18 \text{ мм}$ та $1,75 \text{ мм} \leq h \leq 12,3 \text{ мм}$ визначалися областю застосування критеріальних залежностей. Результати оптимізації (питомий прибуток Π_{max} , питомі додаткові витрати S_{Π} , кампанія печі $T_{\text{Пopt}}$) для оптимальної ширини сопла $b = 5 \text{ мм}$ та відстані до охолоджуваної поверхні $h = 12,3 \text{ мм}$ подано у табл. 1, тут же наведено експлуатаційні характеристики при відсутності охолодження та при охолодженні за над

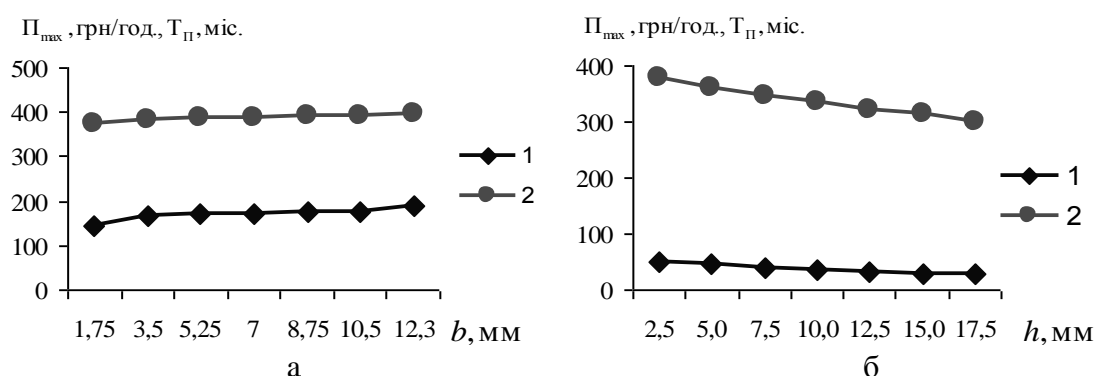


Рис. 5. Залежність результатів оптимізації режимів охолодження:

а – від ширини сопла b ; б – від відстані до охолоджуваної поверхні h ; 1 – $T_{\text{Пopt}}$; 2 – Π_{max}

інтенсивному режиму.

Графіки, надані на рис. 6, 7, ілюструють оптимальні режими охолодження за оптимальні робочі кампанії печі $T_{\text{Пopt}} = 48,0$ міс. (дискретно-струминна система) і $T_{\text{Пopt}} = 189$ міс. (струминно-канална система), для яких питомий чистий прибуток склав $\Pi_{\text{max}} = 362$ грн/год і $\Pi_{\text{max}} = 395$ грн/год відповідно.

Результати оптимізації режимів охолодження

Спосіб охолодження	Π_{\max} , грн/год	S_{Π} , грн/год	$T_{\text{Попт}}$, міс
Без охолодження	175	290	10,3
Понад інтенсивний режим	274	250	108
Дискретно-струминний	362	153	48
Струминно-каналний	395	132	189

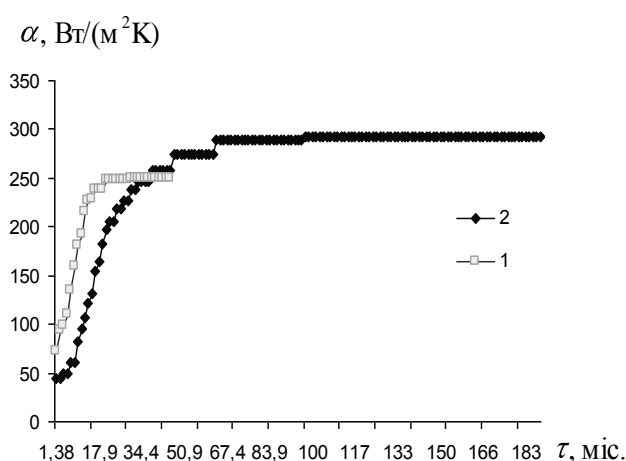


Рис. 6. Оптимальна зміна коефіцієнта тепловіддачі за кампанію печі:

- 1 – дискретно-струминне охолодження;
2 – струминно-каналне охолодження

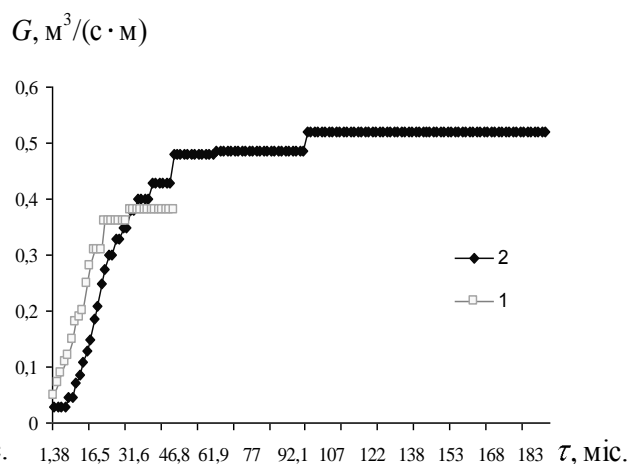


Рис. 7. Оптимальна зміна витрати повітря за кампанію печі:

- 1 – дискретно-струминне охолодження;
2 – струминно-каналне охолодження

Отримані режими охолодження принципово погоджуються з емпіричними рекомендаціями. Наприклад, у роботах Ю.М. Волгіної, О.Н. Попова та ін. для дискретно-струминних систем рекомендується витрата повітря 0,8–1,0 м³/с на метр довжини стіни басейну, а в заключний період витрата повітря збільшується до 1,5 – 2,0 м³/с на метр довжини стіни.

Розрахунки свідчать, що процес охолодження практично рівномірно інтенсифікується збільшенням витрати з 0,05 м³/(с м) до 0,35 м³/(с м) (дискретно-струминна система) та з 0,03 м³/(с м) до 0,43 м³/(с м) (струминно-канална система), у заключний період кампанії застосовується інтенсивний режим охолодження з витратою повітря 0,4–0,5 м³/(с м), понад інтенсивний режим з витратою $G_i \geq 1,0$ м³/(с м) економічно недоцільний. Розбіжність з емпіричними рекомендаціями зв'язана з тим, що в експлуатованих системах використовуються сопла з шириною $b = 15 - 18$ мм, для яких, як довели розрахунки, оптимальна максимальна витрата повітря в заключний період складає 0,8–0,9 м³/(с м), що підтверджує оптимальність вибору сопла мінімальної ширини в дискретно-струминних системах охолодження. Для розглянутого варіанта розкладки вогнетривів слід зазначити більш високу ефективність системи струминно-каналного охолодження. Оптимальний режим струминно-каналної системи в цьому випадку дозволяє одержати більш високий питомий прибуток (на 8–9 %) при істотному збільшенні кампанії печі (у 4 рази).

У заключній частині розділу розглянуто вирішення задачі вибору параметрів стінового огороження басейну за умов оптимальності охолодження. Для п'яти варіантів розкладки стінових вогнетривів різної стійкості і вартості (бакор 33, 41, ХАЦ 30) проводилося варіювання товщини L_6 охолоджуваної частини при одночасному завданні відповідної товщини ізолюваної частини стінового огороження L_{6l} та оптимальному охолодженні дискретно-струминним та струминно-каналним способом. З отриманих результатів виходить, що максимальну ефективність забезпечує використання самого стійкого і дорогого вогнетриву ХАЦ 30. Оптимальні рішення для найбільш ефективної розкладки вогнетривів наведені в табл. 2.

Таблиця 2.

Результати оптимізації для ефективних варіантів розкладки вогнетриву

Спосіб охолодження	Матеріал та товщина стіни		Π_{\max} , грн/год	$T_{\text{порт}}$, міс
	Охолоджувана частина	Ізолювана частина		
Дискретно-струминний	ХАЦ 30, $L_6 = 0,25$ м	ХАЦ 30, $L_{6l} = 0,2$ м	434	143
Струминно-каналний	ХАЦ 30, $L_6 = 0,25$ м	ХАЦ 30, $L_{6l} = 1,1$ м	421	965
Без охолодження	ХАЦ 30, $L_6 = 0,25$ м	ХАЦ 30, $L_{6l} = 0,2$ м	392	21

Для розглянутих варіантів охолодження кращі оптимальні рішення досить близькі, але трохи кращий результат (Π_{\max}) дає дискретно-струминне охолодження, тому що для дуже великої оптимальної кампанії басейну при струминно-каналному охолодженні (див. табл. 2) оптимальне рішення суттєво погіршується внаслідок витрат на проміжні холодні ремонти інших частин печі, що руйнуються. Оптимальне рішення може змінитися у бік застосування струминно-каналного охолодження у випадку введення обмеження на кампанію басейну. У даному випадку оптимальне дискретно-струминне охолодження забезпечує більш високий питомий прибуток (на 3 %), а струминно-каналне – у 6,5 разів більше за оптимальну кампанію печі. Наведені в табл. 2 питомий прибуток і кампанія печі, що мають місце при відсутності охолодження, доводять, що, наприклад, у цьому випадку втрачається 11 % прибутку, а кампанія печі в 3,5 разів менше, ніж при використанні дискретно-струминного оптимального охолодження. Це вказує на необхідність застосування оптимального охолодження басейну, виготовленого із дорогих стійких вогнетривів типу ХАЦ 30.

З метою прогнозу зміни режиму охолодження за умови зміни економічної ситуації були проведено розрахунки з визначення впливу зростання ціни на паливо (\bar{S}_{T0}), що відповідним чином відбивається на вартості електроенергії, вогнетривів і т. п. Також розглядалась залежність від прибутку, який отримано від виробництва скломаси \bar{S}_{Π} . За результатами, на-

приклад, виходить, що 20 % збільшення ціни на паливо призводить до зниження величини прибутку на 35 %, але 20 % підвищення ціни забезпечує вихідну прибутковість.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності хімічних технологічних реакторів ванного типу для виробництва скла (варильних басейнів скловарних печей) на підставі оптимізації режимів повітряного охолодження та вибору раціональних конструктивних параметрів систем охолодження і вогнетривких огорожень реакторів.

Дисертаційна робота є результатом теоретичного узагальнення систематизованих експериментальних промислових та лабораторних досліджень процесів тепломасообміну у реакторах скляного виробництва, які охолоджуються.

Основні результати досліджень:

1. Розроблено уточнені математичні моделі розрахунку теплопередачі через стінку реактора та періоду стійкості (кампанії) стінового огороження плавильного реактору скловарної печі, що дозволило підвищити точність розрахунку періоду корозійної стійкості.

2. Розроблено метод розрахунку періоду стійкості стінового вогнетриву, що показав достатню точність, так, розбіжність з експериментальними та теоретичними результатами, наведеними у літературі, склала 5-20 %. Отримано залежності періоду стійкості вогнетривів від інтенсивності охолодження, які показали, що інтенсивне охолодження дає підвищення стійкості вогнетривів у 5-10 разів і забезпечує збільшення періоду стійкості стінового вогнетриву до 6-25 років.

3. Отримано залежності для цільових функцій у вигляді додаткових питомих витрат за рахунок охолодження плавильного реактора та холодного ремонту скловарної печі і залежності для питомого прибутку за кампанію печі, екстремальні значення яких дозволяють одержати оптимальні закономірності процесу охолодження.

4. Розроблено метод для визначення закономірностей зміни параметрів процесів оптимального повітряного охолодження огорожень реактора-басейну скловарної печі у вигляді задачі оптимального керування, що полягає у визначенні закону зміни коефіцієнта теплообміну, який мінімізує питомі додаткові витрати або максимізує питомий чистий прибуток упродовж кампанії печі. Для чисельного розв'язання задача зведена до пошуку екстремуму функції багатьох змінних при кусково-сталій апроксимації керування і змінних стану. Для пошуку екстремуму цільової функції використано метод координатного спуску у сполученні з методом золотого перетину.

5. Створено програмне забезпечення і проведено розрахункові дослідження щодо визначення закономірностей оптимальних режимів охолодження та вибору конструктивних параметрів стінового огороження реактора скловарної печі з дискретно-струминним та струминно-каналним способами повітряного охолодження. Отримані закономірності оптимального охолодження показали, що на початковому етапі інтенсивність охолодження зростає до деякого максимального, економічно оптимального рівня, який підтримується до кінця

кампанії печі. Застосування більш інтенсивного охолодження з питомою витратою повітря $G \geq 1,0 \text{ м}^3/(\text{с м})$ є економічно недоцільним.

6. Знайдено найбільш ефективний варіант розкладки стінових вогнетривів, що при ефективній розкладці і оптимальному охолодженні стінового вогнетриву забезпечує збільшення питомого прибутку на 11 % і у 3,5 рази більшу робочу кампанію плавильного реактора скляного виробництва, чим при експлуатації такого реактору без охолодження, а також збільшення прибутку на 20 % і у 3 рази більшу робочу кампанію у порівнянні з оптимально охолоджуваним первісним варіантом розкладки вогнетриву.

7. Встановлено, що застосування струминно-канального способу охолодження дозволяє, як правило, забезпечити більш ефективне охолодження в порівнянні з дискретно-струминним охолодженням. Оптимальний режим струминно-канального охолодження дає можливість одержати більш високий питомий прибуток (на 9-10 %) при істотному збільшенні робочої кампанії (у 3-4 рази). В окремих випадках при зменшенні прибутку на 3 % цей спосіб дає значне збільшення кампанії печі (у 5 разів).

8. Результати роботи впроваджено для вибору режиму оптимального повітряного охолодження басейну варки оптичного скла на скловарній печі ДП "ІЗОЛ" (м. Ізюм), а також передано до ДП «Український науково-дослідний інститут скла», де використано у впровадженні науково-технічних заходів щодо підвищення ефективності роботи систем регенерації і повітряного охолодження плавильного реактору промислової скловарної печі.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хавин Е.В. Расчет коррозионной стойкости огнеупоров варочного бассейна / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин, И.П. Хавина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2002. – № 9. – Т.12. – С. 107-112.

Здобувачем розроблено чисельні методики розрахунку корозійної стійкості стінового огородження та теплопередачі через стінку басейну скловарної печі.

2. Хавин Е.В. Постановка задачи оптимизации режима охлаждения варочного бассейна стекловаренной печи / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ» – 2003. – № 11 – Т.1. – С. 73-78.

Здобувачем отримано залежності для додаткових питомих фінансових витрат.

3. Хавин Е.В. Решение задачи оптимизации режима охлаждения варочного бассейна на основе минимизации дополнительных издержек за кампанию стекловаренной печи / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2004. – № 14. – С. 75-86.

Здобувач брав участь у розробці методики чисельного рішення задачі оптимізації повітряного охолодження варильних басейнів скловарних печей.

4. Хавин Е.В. Оптимизация процессов струйно-воздушного охлаждения варочного бассейна реактора для производства стекломассы / В.М. Кошельник, А.В. Кошельник, Е.В. Хавин // «Східно-Європейський журнал передових технологій». – 2005. – № 3/2(15). – С. 115-121.

Здобувачем виконано розрахунки параметрів оптимального охолодження, виконана обробка розрахунків.

5. Хавин Е.В. Выбор эффективной целевой функции оптимизации процесса охлаждения варочного бассейна реактора ванного типа для производства стекломассы / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2005. – № 25. – С. 145-150.

Здобувачем виконано розрахунки оптимального охолодження варильного басейну для різних цільових функцій.

6. Хавин Е.В. Оценка точности модели коррозионного износа стеновых огнеупоров варочных бассейнов стекловаренных печей / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2005. – № 52. – С. 71-76.

Здобувачеві належать чисельні розрахунки корозійного зносу стінового вогнетриву.

7. Хавин Е.В. Выбор рациональных конструкционных параметров соплового аппарата систем струйно-воздушного охлаждения бассейнов стекловаренных печей / В.М. Кошельник, А.В. Кошельник, Е.В. Хавин // «Східно-Європейський журнал передових технологій». – 2006. – № 2/2(20). – С. 94-97.

Здобувачем виконано розрахунки впливу параметрів соплового апарата систем струйно-повітряного охолодження на оптимальне охолодження басейнів скловарних печей.

8. Хавин Е.В. Выбор рациональных конструктивных параметров оптимально охлаждаемого стенового ограждения варочных бассейнов стекловаренных печей / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2007. – № 9. – С. 116-120.

Здобувачем виконано розрахунки до вибору конструктивних параметрів оптимально охолоджуваного стінового огороження варильних басейнів.

9. Хавин Е.В. К определению температурного поля в огнеупорной кладке варочного бассейна стекловаренной печи / В.М. Кошельник, Д.В. Бекназарян, Е.В. Хавин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2008. – № 33. – С. 169-174.

Здобувачем виконано розрахунки температурного поля.

10. Хавин Е.В. Оптимизация охлаждения варочного бассейна стекловаренной печи / В.М. Кошельник, А.В. Кошельник, Е.В. Хавин // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій: Матеріали 1 міжвуз. наук.-практ. конф., 2 грудня 2003 р.: матеріали конф. – Х., 2003. – С. 23-25.

Здобувачем виконано розрахунки закономірностей оптимального охолодження стінового огороження басейну печі.

11. Хавин Е.В. Выбор наиболее эффективной целевой функции при оптимизации режима охлаждения варочного бассейна стекловаренной печи / Е.В. Хавин // Проблемы ин-

форматики и моделирования: 4-я междунар. науч.-техн. конф., 25-27 ноября 2004 г.: тезисы докл. – X., 2004. – С. 23.

АНОТАЦІЇ

Хавін Є.В. Закономірності процесів оптимального повітряного охолодження плавильних реакторів скляного виробництва. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2010.

У дисертаційній роботі вирішено задачу підвищення ефективності технологічних хімічних реакторів ванного типу для виробництва скла на підставі оптимізації режимів повітряного охолодження та вибору раціональних конструктивних параметрів систем охолодження і вогнетривких огорожень реакторів. Запропоновано нову модель розрахунку періоду стійкості стінового огороження плавильних реакторів, яка базується на експоненційній залежності швидкості корозії вогнетриву від температури. Реалізовано удосконалений розрахунок теплообмінних процесів для стінки плавильного реактора - басейну. Одержано залежність стійкості стінових вогнетривів від інтенсивності охолодження зовнішньої поверхні. На основі техніко-економічних показників у вигляді задачі оптимального керування створено методику визначення закономірностей оптимального повітряного охолодження та параметрів стінових огорожень варильних басейнів скловарних печей. Як критерії оптимізації використано додаткові питомі витрати і питомий прибуток упродовж кампанії печі за рахунок витрат на охолодження реактора та холодний ремонт печі. Задачу зведено до пошуку екстремуму функції багатьох змінних при кусково-сталій апроксимації керування. Розрахунком визначено оптимальні процеси охолодження та параметри стінового огороження плавильного реактора з дискретно-струминним і струминно-канальним способами охолодження, що дозволило обґрунтувати вибір охолодження та оптимальну розкладку вогнетривів. Результати дисертаційної роботи впроваджено на промислових підприємствах та використано у навчальному процесі при підготовці спеціалістів – теплоенергетиків.

Ключові слова: хімічний реактор для виробництва скла, моделювання процесів теплообміну, повітряне охолодження, оптимізація.

Хавин Е.В. Закономерности процессов оптимального воздушного охлаждения плавильных реакторов стекольного производства. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2010.

Диссертационная работа посвящена теоретическому решению задачи повышения эффективности работы технологических химических реакторов ванного типа для производства стекла на основе оптимизации режимов воздушного охлаждения и выбора рациональных параметров систем охлаждения и стенового ограждения реакторов.

Выявлено, что принудительное воздушное охлаждение наружной поверхности верхней части бассейна стекловаренной печи позволяет интенсифицировать теплообменные про-

цессы и, уменьшив скорость износа за счет снижения температуры внутренней стенки на уровне зеркала стекломассы, увеличить кампанию печи. Для охлаждения наружной поверхности огнеупорной кладки используются различные варианты охлаждения, но в настоящее время отсутствует обоснованная концепция выбора способов и режимов охлаждения стеновых огнеупоров, обеспечивающих максимальную его эффективность за кампанию печи. С этой целью на основе технико-экономических показателей впервые предложена эффективная, теоретически и экспериментально обоснованная методика оптимизации режимов струйного воздушного охлаждения.

Предложена математическая модель для расчета периода стойкости (кампании) стенового бруса бассейна стекловаренной печи на уровне зеркала стекломассы, основанная на экспоненциальной зависимости скорости коррозии огнеупора от температуры. Получена математическая модель и реализована методика расчета теплопередачи через стенку бассейна стекловаренной печи, особенностями которой является учет зависимости коэффициента теплопроводности стенового огнеупора от температуры и обратно пропорциональная аппроксимация зависимости теплового сопротивления пристенного слоя стекломассы от суммарного теплового сопротивления стенки.

Выполнены исследования обоснованности и достоверности научных положений и основных результатов путем оценки внутренней сходимости численных решений задачи оптимизации, сравнения применяемых математических аппроксимаций и результатов расчетов с экспериментальными данными.

Получены зависимости стойкости стеновых ограждений от толщины охлаждаемой стены варочного бассейна стекловаренной печи и интенсивности охлаждения её наружной поверхности на уровне зеркала стекломассы.

На основе дополнительных удельных финансовых издержек и удельной прибыли за полную кампанию печи, связанных с принудительным охлаждением бассейна печи и её холодным ремонтом, в виде задачи оптимального управления сформулирована математическая постановка задачи определения закономерностей процессов оптимального воздушного охлаждения варочных бассейнов стекловаренных печей. Предложена и реализована методика численного решения задачи оптимизации режима охлаждения как задачи минимизации (максимизации) функции многих переменных при кусочно-постоянной аппроксимации управления (коэффициента теплообмена).

Проведены расчеты по определению закономерностей процессов оптимального охлаждения, конструктивных параметров систем охлаждения и стенового ограждения варочного бассейна стекловаренной печи с дискретно-струйным и струйно-канальным способами воздушного охлаждения, позволившие обосновать выбор раскладки и режима охлаждения огнеупоров и увеличить кампанию в 3 раза при повышении удельной прибыли на 20 %.

Методики, алгоритмы и программное обеспечение, разработанные в работе, расширяют расчетную базу проектирования и управления эксплуатацией стекловаренных печей, обеспечивая выбор и оптимальное сочетание стенового огнеупора с экономически оптимальным процессом охлаждения.

Результаты оптимизации режимов охлаждения и раскладки стеновых огнеупоров для плавильного реактора стекловаренной печи средней производительности использованы в научных исследованиях и внедрены в практику.


Ключевые слова: химический реактор для производства стекла, моделирование процессов теплообмена, воздушное охлаждение, оптимизация.

Khavin E.V. Laws for processes of optimum air cooling of melting reactors of glass manufacture. – Manuscript.

The dissertation for submitting for the scientific degree of candidate of technical science, specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical engineering. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2010.

Work is devoted to the theoretical research of a problem of definition of laws for processes of optimum air cooling, rational parameters of systems of cooling and walls of chemical melting reactors of glass manufacture (cooking pools of the glass melting furnace). It is offered new integral model of the calculation the period of corrosion stability the refractory of a pool stove, which is founded on exponential dependencies for velocities of corrosion of the refractory from the temperature. The marketed modernized calculation of thermal processes and temperature field in wall of the pool stove. It is received dependency to stability of refractory from thickness and cooling of external surface. On base of the technical-economic factors in the manner of problems of optimum management is designed methods of the determination of the regularities of the optimum air cooling and parameter fences of the cooking pools of glass melting furnace. As criterion to optimization are used additional specific expenses and specific profit to account of the expenses on cooling the pool and cool repair of furnace. The problem solved to searching for of the extremum functions many variable under constant approximation of management. Determined optimum processes of the cooling and parameters fences of the pool with discrete-jet and jet - canal way cooling, that has allowed to motivate cooling and optimum spreading of the refractor.

Key words: chemical reactors of glass manufacture, modeling of thermal processes, air cooling, optimization.



Підписано до друку 08.09.2010 р. Формат 60х90/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк.0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 028362

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16.