

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного

Кошельнік Олександр Вадимович

УДК 666.1.031.2: 66.041

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИКОРИСТАННЯ НА ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕННЯ
ПАРАМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ РЕГЕНЕРАЦІЇ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків–2001

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теплотехніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Левченко Борис Олексійович, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри теплотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Єринов Анатолій Єремійович, Інститут газу НАН України, завідувач відділу проблем промислової теплотехніки

кандидат технічних наук Лушпенко Сергій Федорович,
Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України,
с.н.с. відділу моделювання теплових і механічних процесів

Провідна установа: Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра АЕС і інженерної теплофізики, м. Київ

Захист відбудеться “21” лютого 2002 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України за адресою :61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий “19” січня 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

кандидат технічних наук

_____ О.Е.Ковальський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Виробництво скломаси є одним з найбільш енерговитратних, причому питомі витрати палива на підприємствах України значно більші, ніж в промислово-розвинутих країнах. Основним типом промислових технологічних реакторів на вітчизняних підприємствах є регенеративні печі ванного типу. Незважаючи на те, що для забезпечення необхідного технологічного рівня температур печі обладнуються регенераторами для високотемпературного нагріву повітря, а їх ККД практично не перевищує 20–25 % із-за значних витрат теплоти з димовими газами.

Дослідженням теплових режимів системи регенерації скловарних печей приділялось раніше недостатньо уваги. Теплові процеси в регенераторі є складними для досліджень та розрахунків внаслідок високого рівня температур, дії конвективного і променистого теплообміну, циклічності процесів нагріву та охолодження вогнетривкої насадки. Відсутні надійні методики розрахунку регенераторів, робота яких жорстко зв'язана з технологічними процесами в варочному басейні скловарної печі. На практиці часто зустрічається невідповідність параметрів печі і регенераторів, що негативно впливає на економічність виробництва скломаси.

Удосконалення роботи системи регенерації дозволить підняти рівень температури підігріву повітря до 1000–1100⁰С, що є реальним засобом підвищення потенціалу палива. Впровадження цих заходів дозволить зменшити витрати палива в скловарних печах, що свідчить про необхідність проведення досліджень в цьому напрямку і відповідає діючому закону України “Про енергозбереження”. Тому, враховуючи значну енергоємність виробництва скла на підприємствах України та високу вартість природного газу і вогнетривких матеріалів, підвищення ефективності роботи системи регенерації теплоти скловарних печей є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота виконана в межах аспірантури при кафедрі теплотехніки НТУ “ХП”, а також під час стажування в фірмі "OERTLI WAERMETECHNIK" (м.Цюрих, Швейцарія) по програмі SATW. Робота зв'язана з науковими програмами і тематикою досліджень, які виконувались згідно з Державною програмою економічного і соціального розвитку України по Державному контракту з Міністерства освіти України № 4–9.4.95.162/89–95 "Розробити та впровадити ефективне теплообмінне обладнання скловарних печей з метою раціонального використання паливно - енергетичних та матеріальних ресурсів"; держбюджетною темою Міністерства освіти України по напрямку "4. Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології", тема М 1611 "Удосконалення теорії чисельного моделювання гідродинаміки та теплообміну для течій, що розвиваються в пористих структурах та переривчатих каналах", № Д/Р 0198U005687.

Мета дослідження і задачі дослідження. Мета роботи полягає в підвищенні ефективності

тепловикористання в скловарних печах на основі дослідження роботи регенераторів та удосконалення параметрів системи регенерації теплоти.

Задачі дослідження, які пов'язані з метою дисертаційної роботи:

–скласти банк даних характеристик сучасних типів насадок регенераторів;

–розробити методику дослідження системи регенеративного нагріву повітря скловарної печі

;

–уточнити методику розрахунку коефіцієнтів конвективного і променистого теплообміну в каналах насадки регенераторів скловарних печей, провести дослідження теплообміну з урахуванням особливостей роботи агрегату;

–розробити уточнену кінцево-різницеvu математичну модель для розрахунків температурних полів насадки і теплоносіїв в регенераторі, створити програмний обчислювальний комплекс для моделювання роботи системи регенерації скловарної печі;

–виконати розрахунки та провести експериментальні дослідження на промисловому агрегаті, визначити вплив зміни комплексу режимних параметрів системи регенерації на ефективність використання палива в скловарній печі;

–узагальнити результати досліджень, розробити рекомендації по підвищенню ефективності роботи системи “скловарна піч–регенератор”.

Об'єкт дослідження – регенеративна скловарна піч ванного типу.

Предмет дослідження – система регенеративного нагріву повітря, теплові режими регенераторів.

Методи дослідження. Моделювання роботи системи регенерації скловарної печі виконано на програмному обчислювальному комплексі, створеному на основі численного рішення задачі теплообміну в насадці регенератора методом елементарних теплових балансів. Для розрахунку коефіцієнтів теплообміну в каналах використані емпіричні критеріальні залежності і наближені формули. Для аналізу результатів використано метод математичної статистики. Експериментальні дослідження проведені з використанням загальноприйнятої методики вимірювання параметрів на промисловому агрегаті. Це дозволило оцінити адекватність математичних моделей, розробити практичні рекомендації по підвищенню ефективності роботи системи регенерації теплоти скловарної печі.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розширена область використання методів математичного моделювання для широко розповсюджених регенеративних скловарних печей шляхом створення уточненої математичної моделі і програмного обчислювального комплексу для дослідження регенераторів і визначення параметричних характеристик системи “регенератор–скловарна піч”;

2. Уточнена методика розрахунку коефіцієнтів конвективного та променистого теплообміну

в каналах насадки регенераторів скловарних печей з урахуванням реальних умов їх експлуатації, таких як зміна температури насадки і теплоносіїв, запиленість газового потоку;

3. Шляхом математичного моделювання теплових режимів при умові обмеження розмірів насадочної камери вперше визначено вплив зміни комплексу основних режимних і конструктивних параметрів регенератора на ефективність роботи системи регенерації скловарної печі;

4. Запропоновано для прогнозування роботи системи регенерації скловарної печі нові статистичні залежності, що одержані шляхом аналізу результатів обчислювального експерименту для визначення рівня температури нагрівання повітря і величини економії палива від експлуатаційних параметрів, обминаючи стадію проведення трудомістких теплотехнічних розрахунків.

Практичне значення роботи.

1. Створено ефективний програмний обчислювальний комплекс для моделювання і діагностики теплових режимів системи регенерації теплоти при використанні різних типів насадок і матеріалів. Комплекс також може бути використано для автоматизованих систем управління та при оптимізації параметрів системи “скловарна піч – регенератор”;

2. Виконана діагностика теплових режимів регенератора для сталих розмірів насадочної камери при зміні параметрів теплоносіїв в діапазоні величин, що відповідає реальним умовам роботи промислових скловарних печей на протязі всього періоду експлуатації;

3. На основі узагальнення теоретичних результатів та промислового експерименту розроблено рекомендації по підвищенню ефективності роботи системи регенерації теплоти шляхом вибору параметричних характеристик регенератора, що має практичне значення як при проектуванні, так і експлуатації промислових агрегатів.

Впровадження роботи здійснено: на ВАТ ”СКЛЮ” при розробці теплових режимів регенераторів та в проекті реконструкції скловарної печі (Акт від 27.08.2001 р.); на кафедрі теплотехніки НТУ “ХПІ” в учбовому процесі (Акт від 6.09.2001 р.).

Особистий внесок автора. Постановка задачі і вибір методів досліджень виконані з науковим керівником. Результати досліджень отримані автором самостійно. Дисертант створив банк даних характеристик насадок регенераторів [2], розробив удосконалену математичну модель теплообміну в печі [9], приймав участь в промисловому експерименті, обробці його результатів [5], створив методику і програму розрахунку економії палива в печі, виконав обчислювальний експеримент [6, 7].

Апробація результатів. Результати роботи доповідались на міжнародній науково–технічній конференції “Проблеми ресурсо- и природосбереження в енергетике” НТУ “ХПІ” (м. Харків, 1994 р.); Міжнародних науково–технічних конференціях “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”, MicroCAD’96, 97, 99, 2001 (м.Харків, 1996, 1997, 1999, 2001

рр.); 2-й Міжнародній науково – технічній конференції “Проблеми економії енергії”, Державний університет “Львівська політехніка” (м. Львів, 1999 р.); наукових семінарах кафедри теплотехніки НТУ “ХП” в 1996–2001 рр.

Публікації. Основні результати роботи опубліковані в 9 науково–технічних статтях в фахових виданнях, в тому числі в 4–х статтях без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 105 найменувань та 8 додатків. Загальний обсяг роботи сягає 176 сторінок, включаючи 149 сторінок основного тексту, 35 рисунків, 21 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дається загальна характеристика роботи.

В **першому розділі** виконано аналіз літературних джерел, в яких описані конструкція і параметри ванних скловарних печей регенеративного типу, розглянуто питання застосування високотемпературного нагріву повітря в промислових скловарних печах, наведені параметри і умови експлуатації систем регенерації теплоти. Розглянуто роботи Гінзбурга Д.Б., Козлова А.С., Захарікова М.А., Волгіної Ю.М., Булавіна І.А. та інших. Описані та систематизовані характеристики насадок, що використовуються в регенераторах. Вивчені роботи, що пов'язані з методикою розрахунків елементів системи регенерації теплоти, з дослідженням складного теплообміну в каналах насадок регенераторів. Проаналізовано критеріальні рівняння різних авторів для розрахунку коефіцієнтів конвективного теплообміну, методики та рекомендації щодо розрахунку променистого теплообміну в насадках регенераторів.

Більшість опублікованих в останні роки робіт присвячені регенеративним повітрянагрівачам доменних печей, конструкція та умови експлуатації яких істотно відрізняються від регенераторів скловарних печей. Розрізнені дослідження регенераторів скловарних печей не дозволяють вирішувати задачі удосконалення їх роботи, відсутні методики прогнозного розрахунку теплових процесів та дані експериментальних досліджень, не визначено вплив параметрів регенератора на ефективність використання палива в печі. Ця обставина пояснюється, насамперед, жорстким технологічним зв'язком і складністю для досліджень високотемпературних процесів в робочій зоні печі і в насадці регенераторів. Відсутні публікації, зв'язані з моделюванням теплових режимів регенераторів скловарних печей з використанням сучасних комп'ютерних технологій. На основі аналізу публікацій, проведеного обстеження роботи регенеративних скловарних печей сформульовані мета і задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** представлена загальна методика дослідження системи регенеративного нагріву повітря скловарної печі, що включає обчислювальний експеримент, використання статистичних методів для обробки результатів та експериментальні дослідження на промисловому

агрегаті. Структурна блок–схема дослідження представлена на рис.1.

Для досліджень вибрана регенеративна скловарна піч №1 ВАТ “СКЛЮ” для виробництва тарного скла з підковоподібним факелом і природною тягою. Паливо–природний газ. Піч обладнана парою одноходових регенераторів з шамотною насадкою Сіменса об’ємом 71,28 м³.

Наявність в високотемпературних реакторах теплотехнологічних комплексів різного призначення систем регенерації теплоти димових газів і таких процесів, як горіння палива, складний теплообмін, дозволили використати загальний системний підхід для оцінки ефективності використання палива. Розгляду цих питань для високотемпературних агрегатів присвячені дослідження таких вчених, як Щукін О.О., Ключников А.Д., Семененко М.А., Єрінов А.Є., Сорока Б.С., Губинський В.Й., Лісієнко В.Г. та інших. В дисертаційній роботі використані апробовані методологічні підходи, які характерні для досліджень, що виконані в Інституті газу НАН України. Для аналізу системи регенеративного підігріву повітря скловарної печі, що представлена на рис.2, критерієм ефективності вибрана величина максимальної економії палива, що відповідає умовам роботи “ідеального” агрегату, тобто, без урахування теплових витрат в доквілля.

Ефективність роботи регенератора визначали по величині коефіцієнта регенерації тепла η через значення ентальпій продуктів згоряння на вході і виході із регенератора

$$\eta = \frac{I_{\text{дг}} - I_{\text{вг}}}{I_{\text{дг}}} \quad (1)$$

Розглянуто роботу системи при використанні в агрегаті теплоти холодного і нагрітого в регенераторі повітря. Кількість теплоти, що передана в робочій зоні скловарного агрегату при видатності G_1 складає величину $Q_1 = G_1 b_1 (Q_{\text{н}}^{\text{с}} - V_{\text{г}} c_{\text{г}} t_{\text{дг}})$, а кількість теплоти, що передана в робочій зоні скловарного агрегату при видатності G_2 та підігріві повітря горіння $Q_2 = G_2 b_2 (Q_{\text{н}}^{\text{с}} - V_{\text{г}} c_{\text{г}} t_{\text{вг}})$. Приймавши умову $Q_1 = Q_2$, величину питомої витрати палива з заданою теплотою горіння палива $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$ при підігріві повітря знайдемо як

$$b_2 = b_1 \frac{Q_{\text{н}}^{\text{с}} - I_{\text{дг}}}{Q_{\text{н}}^{\text{с}} - I_{\text{вг}}} \frac{G_1}{G_2} \quad (2)$$

При однаковій продуктивності агрегату по скломасі $G_1 = G_2$ відносна величина економії палива $E_{\text{п}}$ при експлуатації печі з використанням підігрітого в регенераторі повітря складає

$$E_{\text{п}} = \left(1 - \frac{b_2}{b_1}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{Q_{\text{н}}^{\text{с}} - I_{\text{дг}}}{Q_{\text{н}}^{\text{с}} - I_{\text{вг}}}\right) \cdot 100, \% \quad (3)$$

Аналогічним шляхом можна визначити також величину збільшення відносної продуктивності печі $\Delta G = G_2 / G_1$ при однаковій витраті палива, тобто, $b_2 = b_1$. Але в промислових умовах можливість збільшення продуктивності печі із-за технологічних обмежень не завжди може бути реалізована, що пов’язано з роботою інших агрегатів та обладнання.

Можливість підвищення рівня температури горіння палива в робочій зоні печі за рахунок підігріву повітря в регенераторі при умові відсутності теплових витрат може бути оцінена як $\Delta t_r = \Delta Q_p / \left(\sum C_{pr} \right)$. Ця величина визначається додатковою кількістю теплоти $\Delta Q_p = Q_n(t_{in}) - Q_n(t_{out})$.

В розділі обґрунтовано використання методів математичного моделювання для дослідження високотемпературних агрегатів. Як свідчить аналіз опублікованих робіт Коздоби Л.О., Мацевитого Ю.М., Лісієнко В.Г, Бухмирова В.В. та інших, підвищення ефективності моделювання пов'язано з універсалізацією математичних моделей. На цих засадах була розроблена концепція створення математичної моделі. В загальному виді система рівнянь, що описує теплообмін в каналах насадки регенератора, складається з рівняння енергії, рівняння руху і рівняння нерозривності з відповідними крайовими умовами. Використання стандартних обчислювальних модулів відомих програмних продуктів та розробок в даному випадку відзначається складністю і має істотні обмеження щодо їх практичного використання.

В дисертації для рішення задачі теплообміну в каналах насадки регенераторів скловарних печей було обрано елементарних теплових балансів, який успішно використовувався в роботах ІТТФ НАН України, ХП, ДМетАУ для дослідження теплових режимів енергетичного та металургійного обладнання, теплообмінних апаратів. Для аналізу роботи системи “скловарна піч–регенератор” необхідно визначити динаміку зміни температур димових газів і повітря в процесі роботи регенератора при використанні різних типів насадок і вогнетривких матеріалів. Таким чином, реалізація сформульованих задач потребує створення програмного комплексу для проведення розрахункових досліджень.

В розділі викладена методика проведення експериментальних досліджень на промисловій скловарній печі. Мета експерименту – перевірка результатів комп'ютерної діагностики теплових режимів регенераторів, визначення реальних умов їх промислової експлуатації. При проведенні досліджень використані загальновизнані методики вимірювання експлуатаційних параметрів, що характерні для паливних промислових печей. Крім штатних вимірювальних приладів було використано додаткові прилади для визначення витрати повітря через регенератор, встановлено термомпари по висоті насадки регенератора. Наведені дані оцінки похибок вимірів основних режимних параметрів.

В **третьому розділі** представлена методика розрахунку коефіцієнтів теплообміну в каналах насадки регенераторів скловарних печей, для яких характерним є низька швидкість руху теплоносіїв від 0,1 до 0,7 м/с, значні коливання температури від 100 до 1300⁰С та високий рівень запиленості газового потоку шихтовими матеріалами 450–530 мг/м³.

Виконані розрахунки коефіцієнтів конвективного теплообміну в каналах насадки α_k для

ламінарного і перехідного режиму з використанням критеріальних рівнянь Нуссельта, Хаузена, Граммате і Хорака, В.Н. Тимофеева та інших авторів показали значне розходження в значеннях α_k . Тому в дисертації були використані критеріальні залежності, одержані на основі опублікованих експериментальних даних Лянганса і Кістнера:

для насадок Каупера з суцільними вертикальними каналами

$$Nu = 0,237 \cdot Re^{0,61}; \quad (4)$$

для насадок Сіменса з переривчастими каналами з горизонтальними проходами

$$Nu = 0,322 \cdot Re^{0,605}, \quad (5)$$

що дало змогу отримати реальний рівень значень коефіцієнтів конвективного теплообміну.

Уточнена методика розрахунків коефіцієнтів променистого теплообміну α_n в регенераторах скловарних печей з застосуванням методу Елгеті, який більш точно, в порівнянні з іншими методами, враховує власне випромінювання газів та складне випромінювання поверхнями каналів з використанням приведених характеристик газів $\bar{\epsilon}$ та стінки $\bar{\epsilon}_n$ при відповідних температурах T і $T_{ст}$. З урахуванням цього формула для розрахунку коефіцієнтів випромінювання має вигляд

$$\alpha_n = \frac{C_s}{T - T_{ст}} \cdot \left[\bar{\epsilon} \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \bar{\epsilon}_n \cdot \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]. \quad (6)$$

Одержані кореляційні залежності характеристик ϵ_{CO_2} і ϵ_{H_2O} для продуктів горіння природного газу при відповідних коефіцієнтах надлишку повітря і температурах.

Вперше для регенераторів скловарних печей з використанням рекомендацій Г.П. Іванцова і А.Д. Ключникова здійснено розрахунок α_n для запиленого газового потоку. З урахуванням характеристик запиленних газових потоків (питома концентрація пилу, дисперсний склад, питома вага), які залежать від конструкції агрегату та сорту скломаси, знайдена розрахункова залежність коефіцієнту послаблення променів в каналах регенератора запиленим газовим потоком K_n від концентрації часток пилу μ_n , величини поверхні часток з середнім діаметром F_n .

Для розрахунків регенератора печі при виробництві тарного скла ця залежність при знайденому середньому діаметрі часток пилу приведена до виду

$$K_n = C_n \cdot \sqrt[3]{T}, \quad (7)$$

де C_n – коефіцієнт, що залежить від виду палива, середнього розміру пилових часток; T – температура випромінювача.

З використанням рівнянь (4)–(7) розроблено математичну модель та виконано розрахунки коефіцієнтів теплообміну конвекцією та випромінюванням в каналах насадки регенератора з метою визначення їх залежності від температури. Встановлено, що в газовий період коефіцієнти теплообміну конвекцією змінюються від 10,07 до 20,97 Вт/(м² К), а діапазон сумарного коефіцієнта тепловіддачі склав 13,99–122,38 Вт/(м² К) при зміні температури газу від 100 до 1300⁰С.

Визначено вплив запиленості газового потоку на променистий теплообмін в каналах регенератора. Значення коефіцієнта K_p в діапазоні температур від 300 до 1500⁰С зростає по нелінійному закону від 0,02218 до 0,0548. При максимальній запиленості газового потоку її врахування приводить до збільшення коефіцієнтів променистого теплообміну (рис.3). Як свідчать результати моделювання, приріст коефіцієнтів тепловіддачі при цьому може складати для верхніх ярусів насадки від 10 до 35%, що приводить до підвищення середньої температури нагріву повітря на 3–5⁰С. Але для інших конструкцій печей та регенераторів цей вплив може бути більш значним.

В четвертому розділі представлені матеріали стосовно розробки математичної моделі системи регенерації скловарної печі і програмного обчислювального комплексу для моделювання їх параметричних характеристик.

З використанням розробленої методики створено алгоритм розрахунку теплових режимів регенератора з використанням методу елементарних теплових балансів. У якості розрахункового елемента обрано вертикальний канал, який було створено по осям симетрії перерізу насадки в горизонтальній площині. На рис.4 подана кінцево-різницева схема насадки регенератора з суцільним каналом прямокутної форми. Визначення температури кожного розрахункового елемента з відповідними характерними геометричними розмірами пов'язано з упорядкуванням і рішенням системи енергобалансу послідовно для всіх елементів з $i=1$ до $i=n$ для кожного часового інтервалу з вибраним часовим кроком $\Delta\tau$

$$\sum_{i=1}^n Q_{i,j}^k = G_i \cdot C_H(t_{i,j}) \cdot (t_{i,j+1} - t_{i,j}) \quad (8)$$

Ліва частина рівняння (8) є сумою теплових потоків $Q_{i,j}^k$ через усі поверхні розрахункового елемента

$$Q_{i,j}^1 = \alpha_{i,j} \cdot (t_{i,j} - t_{i,j}) \cdot F_T \Delta\tau; \quad Q_{i,j}^2 = \alpha_{i,j} \cdot (t_{i,j} - t_{i,j}) \cdot F_0 \Delta\tau; \quad Q_{i,j}^3 = \lambda_H (t_{i,j} - t_{i+1,j}) \cdot F_T \Delta\tau / \Delta x. \quad (9)$$

Вирішуючи рівняння (8) з урахуванням (9) стосовно температур $t_{i,j+1}$ для i -го елемента в наступний момент часу ($j+1$), одержимо

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \frac{\alpha_{i,j} F_T \Delta\tau}{G_i C_H(t_{i,j})} \cdot (t_{i,j} - t_{i,j}) + \frac{\alpha_{i,j} F_0 \Delta\tau}{G_i C_H(t_{i,j})} \cdot (t_{i,j} - t_{i,j}) + \frac{\lambda_H F_T \Delta\tau}{G_i C_H(t_{i,j})} (t_{i,j} - t_{i+1,j}) \quad (10)$$

Температуру теплоносіїв при нагріві насадки $\vartheta_{i,j}^r$ (газ) і охолодженні $\vartheta_{i,j}^n$ (повітря) у відповідний період часу визначали для кожного розрахункового елемента із рівнянь балансу теплоти між теплоносієм і зміною тепловмісту елемента насадки. Тоді при розрахунку періоду нагріву насадки температуру газів для елемента ($i+1$) знаходили як

$$\vartheta_{i+1,j}^r = \vartheta_{i,j}^r + \frac{G_i C_H(t_{i,j})}{V_j^r C_r(\vartheta_{i,j}^r) \Delta\tau} (t_{i,j} - t_{i,j-1}) \quad (11)$$

а для періоду охолодження температуру повітря, яке нагрівається

$$\vartheta_{i,j}^n = \vartheta_{i,j}^n + \frac{G_i C_n(t_{i,j})}{V_j^n C_n(\vartheta_{i,j}^n) \Delta \tau} (t_{i,j-1} - t_{i,j}) \quad (12)$$

Розрахункові залежності одержані для всіх характерних елементів, розташованих на вході $i=1$, виході із насадки $i=n$, або в середині масиву ($2 \leq i \leq n-1$). Величину розрахункового кроку $\Delta \tau$ обрано із умов, що забезпечували стійкість реалізації чисельного рішення. Нерівномірність зміни поля температур по товщині цегли в процесах нагріву і охолодження врахована введенням коефіцієнта масивності.

Для моделювання теплових процесів в системі регенерації був створений обчислювальний програмний комплекс на мові програмування Turbo Pascal з використанням об'єктно-орієнтованої оболонки Turbo Vision. Початковий розподіл температур по висоті насадки задавали приблизно, в подальшому розподіл температур у кінці кожного періоду приймали як початковий при розрахунках наступного періоду. Розрахунки проводили до установлення квазістаціонарного режиму. По закінченню моделювання роботи регенератора визначали значення параметрів, що характеризують ефективність роботи системи регенерації теплоти – коефіцієнт регенерації теплоти і величину економії палива.

Створений програмний комплекс може бути також використаний при розробці САУ, а також для розрахунків двох- і трьохоборотних регенераторів з використанням різних вогнетривів і типів насадок.

В п'ятому розділі дисертації представлені результати розрахункового дослідження системи регенерації скловарної печі №1 ВАТ “Скло” з використанням насадки Сіменса з каналом 270x150 мм. Витрата палива відповідала заданому тепловому навантаженню печі. Поряд з температурними полями насадки та теплоносіїв визначали загальну кількість теплоти, яке передавалось повітрю в регенераторі за період.

Моделювали теплові режими при постійних значеннях температури газів на вході в насадку $t_r' = 1000, 1100, 1200, 1300^\circ\text{C}$. Встановлено, що підвищення температури димових газів t_r' на кожні 100°C приводить до збільшення середньої температури нагріву повітря на 60°C . При цьому одночасно спостерігається і підвищення температури газів на виході із насадки до 66°C при практично сталому рівні коефіцієнта регенерації теплоти η на рівні 35–36%.

Чисельний експеримент виконано також при різних значеннях температури повітря на вході в насадку $t_n' = 100, 150, 200, 250^\circ\text{C}$. При збільшенні t_n' , на кожні 50°C приріст температури нагріву повітря складає в середньому 26°C при підвищенні температури димових газів на виході із насадки на $13-14^\circ\text{C}$. В той же час, кількість теплоти на нагрів повітря зменшується на 10,2%.

Практичне значення для оцінки ефективності роботи регенератора має визначення впливу зміни витрат теплоносіїв, що мають місце в реальних умовах експлуатації печі. На першому етапі

був проведений чисельний експеримент при різній витраті повітря з постійною витратою продуктів горіння через насадку. Для базового режиму витрата повітря відповідала значенню $W_{\text{п}}=0,191$ м/с. На другому етапі моделювали роботу регенератора з різною витратою димових газів при незмінній витраті повітря. Аналіз розрахункових даних показав, що при збільшенні $W_{\text{г}}$ у каналах з 0,2 до 0,5 м/с для різної температури газів на вході відбувається підвищення середньої температури газів на виході із насадки на 205–250⁰С, а середня температура нагріву повітря також зростає на 70–80⁰С. Збільшення $W_{\text{п}}$ в каналах регенератора з 0,1 до 0,4 м/с приводить до зниження середньої температури газів до 300⁰С при різних початкових температурах газів і до зменшення середньої температури газів на виході із насадки на 290–330⁰С.

Виконано діагностику теплових режимів при використанні різних типів насадок, які практично можуть бути застосовані для даної скловарної печі. Було досліджено чотири різних варіанта насадки: Каупера з каналом 120x120 мм (розмір цегли 300x150x65 мм) та 140x140 мм (розмір цегли 345x150x65 мм); насадка Сіменса з аналогічними розмірами без зміщення каналів в вертикальній площині. При обмежених розмірах насадочної камери доцільно використовувати насадку з меншою товщиною цеглини і розміром каналів.

На основі результатів дослідження оцінена ефективність регенеративного тепловикористання в системі “регенератор-скловарна піч”. Визначено вплив режимних параметрів регенератора на економію палива в скловарній печі за рахунок підігріву повітря горіння (рис.5). При відповідному підборі параметрів можна досягти економії палива до 25-30%. Визначено вплив температури підігріву повітря на приріст температури в робочому просторі печі. Встановлено, що при температурі нагріву повітря 600–1000⁰С приріст температури горіння $\Delta t_{\text{г}}$ може складати від 350 до 665⁰С при коефіцієнті надлишку повітря 1,15–1,35 без урахування теплових витрат.

З використанням програми Statistika оброблені дані числового експерименту і отримані залежності середньої температури нагріву повітря та економії палива для системи регенерації як функції основних режимних параметрів:

$$\bar{T}_{\text{п}} = 224 + 0,897\bar{T}_{\text{г}} + 0,2279T'_{\text{п}} - 846W_{\text{г}} - 843W_{\text{п}} + 638W^2_{\text{г}} + 1142W^2_{\text{п}}. \quad (14)$$

$$\Delta E_{\text{п}} = -32,2164 + 0,1184T''_{\text{г}} - 0,0705\bar{T}_{\text{г}} - 0,0822(\bar{T}_{\text{п}} - T''_{\text{п}})W_{\text{п}},\%. \quad (15)$$

Результати перевірки значущості коефіцієнтів регресійних рівнянь (14)– (15) за критерієм Ст'юдента і адекватності моделей за критерієм Фішера показали, що вони можуть бути використаними з високим ступенем надійності (0,98–0,99). Їх використання дозволить прогнозувати роботу системи, обминаючи стадію виконання громіздких теплотехнічних розрахунків.

В шостому розділі представлені результати експериментального дослідження системи

регенерації промислової ванної скловарної печі №1 ВАТ "СКЛЮ", що були проведені в період з вересня 1999 р. по червень 2000 р. з використанням штатної і додаткової вимірювальної апаратури. Були виконані виміри витрати газу, температур теплоносіїв на вході і виході із насадки, витрати, температура і тиск повітря на вході в регенератор, значення коефіцієнта надлишку повітря в печі та за регенератором, розподіл температур по висоті насадки регенератора.

Після введення в експлуатацію (вересень 1999 р.) піч працювала з перемінною продуктивністю. Витрата природного газу на опалення складала 610–630 м³/г, температура у варочній зоні підтримувалася на рівні 1510–1530⁰С, температура газів на вході в регенератор сягала 1050–1120⁰С, а в димову трубу – 430–480⁰С. В подальшому максимальна температура у варочній зоні печі складала 1430–1460⁰С, а витрата газу збільшилась до 730–820 м³/г.

Отримані експериментальні дані було використано для порівняння їх з результатами комп'ютерної розрахунки теплових процесів у регенераторі. Результати порівняння розподілу температури газу і повітря по висоті насадки регенератора подані на рис. 6. Розрахункові та експериментальні дані при однакових витратах газу і повітря відрізняються на 32–46⁰С, максимальне розходження склало 6,14 % з урахуванням нерівномірності розподілу теплоносіїв по перерізу насадки. Задовільний збіг результатів порівнянь свідчить про адекватність розроблених моделей і можливість застосування програмного комплексу для діагностики роботи регенераторів скловарних печей.

Експериментальні дані, які отримані при різних тривалостях періодів підтвердили результати моделювання теплових режимів, що для насадки, яка складена з цеглин товщиною 85 мм, зменшення тривалості періодів практично не впливає на рівень температури нагріву повітря у регенераторі. Виконано аналіз експериментальних даних теплових режимів регенератора на протязі тривалого періоду його експлуатації. На підставі вимірів параметрів і шляхом візуального огляду насадки встановлено, що в процесі експлуатації відбувається збільшення витрати природного газу в печі на 18–26%, зафіксовано інтенсивне забруднення насадки пилом шихтових матеріалів.

На основі результатів промислового експерименту запропоновано заходи по підвищенню ефективності роботи системи "скловарна піч-регенератор". Рекомендовано схему завантаження шихтових матеріалів з урахуванням форми факелу та режиму роботи пальників; укладено графік очищення насадки; наведені рекомендації щодо контролю співвідношення газ–повітря. В результаті цього досягнуто підвищення температури нагріву повітря на 28⁰С. При реконструкції печі в 2001р. запропоновано використати двоходовий регенератор, для цього необхідно збільшити переріз насадочної камери за рахунок переносу задньої стінки регенератора, замінити насадку на більш ефективну з меншою товщиною цегли 55–65 мм, що забезпечить збільшення поверхні теплообміну і підвищення температури нагріву повітря.

Результати досліджень і рекомендації по підвищенню ефективності системи регенерації використані в проекті реконструкції скловарної печі №1 ВАТ “СКЛЮ”. Економічний ефект – 43,7 тис. грн./рік.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертації наведено теоретичне узагальнення і вирішення актуальної науково-технічної задачі – підвищення ефективності системи регенерації теплоти скловарної печі на основі удосконалення параметричних характеристик регенераторів. Теоретично обгрунтована і експериментально доведена реальна можливість економії палива в скловарній печі при відповідному виборі параметрів системи. По результатам досліджень зроблені наступні висновки:

1. Відсутні математичні моделі для дослідження роботи системи регенераторів скловарних печей. Значний вплив температури підігріву повітря на підвищення потенціалу палива і ефективність виробництва скломаси свідчить про необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

2. Розроблена загальна методика проведення теоретичних і експериментальних досліджень системи регенеративного нагріву повітря в ванних скловарних печах. Запропонована методика оцінки ефективності підігріву повітря в регенераторі шляхом визначення економії палива в печі. З урахуванням сучасних тенденцій математичного моделювання високотемпературних процесів розроблена концепція створення обчислювального програмного комплексу, обгрунтовано вибір методу моделювання.

3. Уточнено методику розрахунку коефіцієнтів конвективного і променистого теплообміну в каналах насадок регенераторів скловарних печей з урахуванням зміни променистої здатності продуктів горіння, впливу додаткових випромінювань і поглинань в системі поверхня каналу–димові гази, запиленості газового потоку шихтовими матеріалами. Обгрунтовано вибір критеріальних рівнянь, виконано розрахункове дослідження конвективного і променистого теплообміну в каналах насадки регенератора.

4. Розроблена уточнена кінцево–різницева математична модель теплообміну в насадці регенератора на основі методу елементарних теплових балансів з урахуванням зміни інтенсивності теплообміну, залежності теплофізичних характеристик димових газів, повітря і вогнетривких матеріалів від температури.

5. З використанням модульного компонування вперше створено обчислювальний комплекс для моделювання роботи системи регенерації теплоти скловарної печі з використанням програмної мови Turbo Pascal та об'єктно–орієнтованої оболонки Turbo Vision. Комплекс також може бути використаний в АСУ скловарних печей.

6. На прикладі одного агрегату визначено вплив зміни комплексу режимних параметрів на його роботу при сталих розмірах насадочної камери регенераторів. Чисельний експеримент виконано при зміні температури димових газів від 1100 до 1400⁰С та повітря від 100 до 250⁰С на вході в насадку, а також при зміні швидкостей газу та повітря в каналах 0,1–0,6 м/с. Досліджено роботу регенераторів з різними насадками.

8. Виконано розрахункове дослідження ефективності системи регенерації і встановлено вплив зміни режимних параметрів регенератора на величину економії палива в скловарній печі та на рівень температури в робочій зоні агрегату за рахунок нагрівання повітря горіння. Шляхом статистичної обробки результатів отримані нові залежності, що описують рівень температури нагріву повітря та економії палива в печі від комплексу основних режимних параметрів. При відповідному виборі параметрів додаткова величина економії палива на печі може складати понад 25 – 30%.

9. У промислових умовах проведені експериментальні дослідження теплових режимів системи “скловарна піч–регенератор”. Результати досліджень підтвердили дані чисельних розрахунків, як по температурному рівню нагріву повітря, так і по коливанням температури в насадці регенераторів. Задовільний збіг результатів свідчить про адекватність математичних моделей та можливість використання програмного комплексу для дослідження теплових режимів системи регенерації.

10. Розроблені та впроваджені на ВАТ “СКЛЮ” рекомендації по підвищенню ефективності роботи системи “регенератор–скловарна піч”, що дозволить підняти рівень температури нагріву повітря і забезпечити зниження витрати природного газу. Економічний ефект складає 43,7 тис. грн./рік. Результати дисертаційної роботи використовуються в учбовому процесі на кафедрі теплотехніки НТУ “ХПІ” при підготовці інженерів–теплоенергетиків.

Основний зміст дисертації опубліковано у працях:

1. Кошельник А.В. Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах насадок регенераторов плавильных печей // Вестник ХГПУ.– Харьков: ХГПУ.– 1998.– Вып.13.– С. 45–48.

2. Характеристики современных типов насадок регенераторов промышленных печей / А.В. Кошельник, В.М. Кошельник, Б.А. Левченко, Е.Ю. Долженко // Вестник ХГПУ.– Харьков: ХГПУ.– 1999.– Вып.29.– С. 76–79.

3. Кошельник А.В. Математическая модель регенератора стекловаренной печи и ее численная реализация // MicroCAD'99. Сб. научных трудов ХГПУ. Часть 3.– Харьков.– 1999. – Вып. 7.– С.48–53.

4. Кошельник А.В. Универсальный вычислительный комплекс для моделирования тепловых режимов регенераторов стекловаренных печей // Интегровані технології та енергозбереження.– 1999.–№1.–С.88–95.

5. Экспериментальные исследования тепловых режимов регенераторов ванной стекловаренной печи / А.В.Кошельник, В.М.Кошельник, В.Б.Ковтун, Ю.В.Дьяченко, В.Е.Пашков // Вестник ХГПУ.– Харьков: ХГПУ.– 2000.– Вып. 104.– С.6–10.

6. Кошельник А.В., Долженко Е.Ю. Повышение эффективности топливоиспользования в теплотехнологических установках на основе моделирования системы регенерации тепла // Проблемы машиностроения.– 2000.– Том 3. №3–4.– С. 90–93.

7. Кошельник А.В., Левченко Б.А. Исследование влияния режимных параметров на эффективность работы регенераторов стекловаренной печи // MicroCAD'2001. Сб. научных трудов ХГПУ. Часть 3.– Харьков. –2001.– Вып. 10.– С. 48–53.

8. Кошельник А.В. К расчету коэффициентов теплообмена в каналах регенераторов стекловаренных печей / Труды межд. научно-техн. конференции MicroCAD'97. Часть вторая.– Харьков.– 1997.– С.103–107.

9. Кошельник О.В., Родіонова Т.Ф., Кошельник В.М. Математичне моделювання променистого теплообміну в скловарних печах на основі зонального методу / 2-а Міжнародна науково-практ. конференція “Проблеми економії енергії” // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". –Львів. –1999.– № 2.– С. 97–100.

АНОТАЦІЯ

Кошельник О.В. Підвищення ефективності тепловикористання на основі удосконалення параметричних характеристик системи регенерації скловарної печі.– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06–технічна теплофізика і промислова теплоенергетика. Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України, Харків, 2001.

Дисертація присвячена питанням удосконалення роботи системи регенерації скловарних печей з метою підвищення ефективності використання палива. Уточнена методика розрахунку коефіцієнтів теплообміну в насадці регенераторів з урахуванням особливостей їх роботи. З використанням удосконаленої математичної моделі створено обчислювальний програмний комплекс та виконано дослідження теплових режимів регенераторів, визначено вплив зміни комплексу режимних параметрів на ефективність роботи системи регенерації. Експериментальні дослідження на промисловому агрегаті підтвердили адекватність моделі. Виконана діагностика теплових режимів, визначено вплив параметричних характеристик системи на роботу скловарної печі, визначена величина економії палива. Розроблено рекомендації по підвищенню ефективності роботи системи. Результати роботи використані при розробці теплових режимів регенераторів промислових скловарних печей та в учбовому процесі при підготовці інженерів–теплоенергетиків.

Ключові слова: скловарна піч, система регенерації, математична модель, обчислювальний

комплекс, промислові випробування, теплові режими, ефективність.

Кошельник А.В. Повышение эффективности теплоиспользования на основе совершенствования параметрических характеристик системы регенерации стекловаренной печи.—Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06—техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика.—Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины: Харьков, 2001.

Диссертация посвящена вопросам усовершенствования режимов работы системы регенерации стекловаренной печи и определения влияния её параметров на эффективность теплоиспользования. Разработана методика расчетно—теоретического, экспериментального исследования системы регенерации, представлена методика оценки эффективности работы системы с использованием коэффициента регенерации теплоты и величины относительной экономии топлива в печи.

Сформирован банк данных характеристик насадок регенераторов стекловаренных печей. Уточнена методика расчета коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена в каналах насадки регенераторов, в которой учтено изменение температур насадки и теплоносителя в процессе нагрев—охлаждение, запыленность газового потока шихтовыми материалами, выполнено исследование теплообмена в каналах насадки в реальном диапазоне температур.

Представлена уточненная конечно—разностная математическая модель для исследования тепловых процессов в насадке регенератора. Создан программный вычислительный комплекс, обеспечивающий возможность моделирования работы регенератора с использованием различных типов насадок. Адекватность моделей доказана путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных на промышленном агрегате.

В диссертации на основе численного эксперимента исследовано влияния режимных параметров на работу системы “регенератор—стекловаренная печь”, путем статистической обработки результатов получены новые зависимости для определения величины относительной экономии топлива и температуры нагрева воздуха. Определено влияние изменения режимных параметров на работу системы, уровень температуры в рабочей зоне печи при использовании различных типов насадок. Представлены рекомендации по повышению температуры нагрева воздуха и эффективности работы регенераторов.

Проведен промышленный эксперимент на действующей стекловаренной печи, результаты эксперимента подтвердили данные расчетных исследований и позволили разработать практические рекомендации по повышению эффективности работы регенераторов.

Результаты работы использованы при разработке тепловых режимов регенераторов

промышленных стекловаренных печей и в учебном процессе при подготовке инженеров–теплоэнергетиков.

Ключевые слова: стекловаренная печь, система регенерации, математическая модель, вычислительный комплекс, промышленные испытания, тепловые режимы, эффективность.

Koshelnik A.V. Increase of Heat Use Effectiveness on the Basis of Ascertaining of Parametric Performance of Glass Furnaces Waste Heat Recovery System. – Manuscript.

Thesis for submitting for the scientific degree of Master of Technical Sciences in speciality 05.14.06 – Technical Thermal Physics and Industrial Heat Power Engineering. – Institute for Machine Building Problems of National Academy of Sciences of Ukraine: Kharkov, 2001.

The thesis is devoted to the problems of glass–melting furnaces waste heat recovery system improvement in order to increase the fuel use efficiency. The methods of calculating of heat exchange coefficients in regenerators checkerworks taking into account the operating characteristics is ascertained. On the basis of the ascertained mathematical model the computational complex is created and the research of regenerators heating regimes is carried out. The influence of change in operating parameters on regeneration system effectiveness is determined. The mathematical model adequacy is proved by the experiments on the industrial installations. The heating regimes diagnostics is carried out and the influence of parametric performance and the quantity of fuel saved is determined. Suggestions as for regeneration system effectiveness increase are developed. The results obtained were used during glass–melting furnaces regenerators heating regimes development and in education of power engineers.

Key words: glass–melting furnace, regeneration system, mathematical model, computational complex, production tests, heating regimes, effectiveness.