

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

Кошельник Вадим Михайлович

УДК 536.24; 621.1.016.4; 666.1.031.2

**ЕНЕРГО- ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В ПРОМИСЛОВИХ АГРЕГАТАХ СКЛЯНОГО
ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ**

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Соловей Віктор Васильович, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, завідувач відділу термодинаміки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Маляренко Віталій Андрійович, Харківська національна академія міського господарства (ХНАМГ), професор кафедри електропостачання, науковий керівник Центру енергозберігаючих технологій ХНАМГ

доктор технічних наук, професор

Петраш Віталій Дем’янович, Одеська державна академія будівництва та архітектури, завідувач кафедри опалення, вентиляції та охорони навколишнього середовища

доктор технічних наук, професор

Семенишин Євген Михайлович, Національний університет “Львівська політехніка”, професор кафедри хімічної інженерії

Провідна установа: Національний технічний університет України “КПІ” Міністерства освіти і науки України, теплоенергетичний факультет, м. Київ

Захист відбудеться “16” листопада 2006 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування НАН України ім. А.М. Підгорного 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 “14” жовтня 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

кандидат технічних наук

О.Е. Ковальський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Промислові установки і комплекси, що реалізують високотемпературні теплотехнологічні процеси нагрівання та плавлення технологічних матеріалів, формують технічну базу енергоємних виробництв скла, металів, в яких паливні печі є основним технологічним ланцюгом. В Україні виробництво більшої частини промислової продукції, зокрема скла, здійснюється з підвищеними питомими витратами енергоресурсів, які суттєво перевищують показники промислово-розвинутих країн. У цих умовах енергозбереження є пріоритетним напрямком державної політики України.

Великі резерви економії мають підприємства скляної промисловості, які споживають значні матеріальні та паливно-енергетичні ресурси. Основна кількість скла на промислових підприємствах України, що нараховують понад 80 скловарних агрегатів, виплавляється в ванних печах, які опалюються природним газом. ККД печей не перевищує 30%, а при виробництві деяких сортів скла сягає усього 12-16%, що обумовлено значними втратами теплоти. Низька теплова ефективність агрегатів визначається також недостатньою стійкістю вогнетривів, які використовують для кладки стін варильної зони. Тому інтенсифікація теплотехнічних процесів скловаріння потребує підвищення стійкості вогнетривкої кладки печей та збільшення терміну їх експлуатації. Цю мету може бути досягнуто за рахунок використання більш стійких матеріалів, удосконалення систем примусового охолодження та інших заходів, які спрямовані на удосконалення режимних та конструкційних характеристик промислових скловарних агрегатів.

Проблема підвищення ефективності роботи скловарних печей пов'язана з необхідністю комплексного рішення теоретичних та прикладних задач теплофізичної та термодинамічної спрямованості, які забезпечують раціональне енерго- та тепловикористання при умові підвищення стійкості елементів печі, збільшення терміну їх експлуатації з одночасним вирішенням питань захисту навколишнього середовища від теплового забруднення. Більшість досліджень високотемпературних процесів, теплової ефективності установок і технологічних систем виконано в період відсутності обмежень на об'єми використання палива та низькій його вартості, що обумовило їх низьку енергоефективність. Аналізу спільної роботи промислових скловарних печей і теплоенергетичного обладнання для підвищення енергоефективності технологічного комплексу приділялося недостатньо уваги. Враховуючи значну енергоємність виробництва скла на підприємствах України, високу вартість природного газу і вогнетривких матеріалів, підвищення ефективності роботи промислових скловарних печей є актуальною науково-технічною проблемою і відповідає Закону України „Про енергозбереження”.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота зв'язана з науковими програмами і тематикою досліджень, що виконувались під керівництвом здобувача згідно: постанови Президії АН УРСР №210 від 20.05.1986 р. і Державної науково-технічної програми ДКНТ

„Ресурсозбереження”, тема 5.51.03/270–93, № ДР 0188.0018248 (1993-1995 рр.); Державному контракту з Міносвіти України № 4–9.4.95.162/89–95 від 17.07.1995 р. (1995-1996 рр.); держбюджетних тем МОН України по напрямку 7 „Енергетика, енергозбереження”, №Д/Р 0102U000984 (2002-2004 рр.), №Д/Р 0105U000574 (2005-2006 рр.).

Дисертаційна робота виконувалась також в межах госпдоговірних тем з НПО „Енергосталь” (№ ДР 0183.0077282; № ДР 01850054280); з ПМаш НАН України (№ ДР 01850075859); з Мереш’янським склозаводом (№ ДР 0189.0060921); з МКП „Домна” - МСЗ (№ ИА0101631–632 Р) та іншими.

Мета дослідження і задачі дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування і розробка енерго- та ресурсозберігаючих заходів на базі удосконалення теплофізичних процесів і теплоенергетичного обладнання високотемпературних агрегатів в промисловому виробництві скла.

Задачі дисертаційної роботи:

–термодинамічний аналіз процесів у теплотехнологічних агрегатах, що використовуються в промисловому виробництві скла;

–розробка на основі положень системного аналізу загальної методики дослідження теплотехнології виробництва скломаси в агрегатах ванного типу, визначення пріоритетних напрямків енерго- та ресурсозбереження;

–теоретичні дослідження променистого теплообміну в варильній зоні реактора, встановлення впливу режимних і геометричних параметрів факелу на роботу скловарних печей та розробка удосконалених конструкцій палинкових систем з регульованою довжиною і формою факелу;

–дослідження системи регенеративного нагріву повітря горіння з урахуванням особливостей експлуатації скловарних печей та розробка рекомендацій щодо підвищення їх ефективності;

–аналіз теплофізичних характеристик вогнетривкої кладки варильного басейну та математичне моделювання теплових процесів, ідентифікація параметрів теплообміну при застосуванні повітряного та випарного охолодження печей;

–розробка пропозицій щодо практичної реалізації енерготехнологічного комбінування та удосконалення систем охолодження шляхом використання теплоутилізаційних установок, упровадження заходів по підвищенню енергоефективності теплоенергетичного обладнання та агрегатів ванного типу в виробництві скломаси.

Об’єкт дослідження – високотемпературні теплотехнологічні агрегати ванного типу для промислового виробництва скла.

Предмет дослідження – теплофізичні процеси тепломасообміну в високотемпературних елементах скловарних печей та супутнього теплоенергетичного обладнання.

Методи дослідження. Математичне моделювання термодинамічних і теплофізичних

процесів виконано з використанням численних методів вирішення задач математичної фізики, методів оптимізації та математичної статистики. Експериментальні дослідження проведено на фізичних моделях, на дослідно-промислових агрегатах та натурних об'єктах, що дозволило оцінити адекватність розроблених математичних моделей і підтвердити достовірність результатів, які узгоджено також порівнянням з даними інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні на підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень актуальної прикладної науково-технічної проблеми зниження витрат енергетичних і матеріальних ресурсів в високотемпературних агрегатах в промисловому виробництві скла:

1. Вперше сформульовано методологічний підхід стосовно рішення проблеми енергозбереження в високотемпературних агрегатах для промислового виробництва скла з використанням положень системного аналізу, визначено рівні ієрархії, що дозволило виділити об'єкти і напрямки енергозбереження в виробництві скла, включаючи всі стадії теплотехнології.

2. Вдосконалено методики математичного моделювання процесів теплотехнологічних агрегатів ванного типу шляхом створення уточнених математичних моделей, які більш повно враховують реальні умови експлуатації агрегатів при виробництві скломаси, в тому числі:

–методику розрахунку променистого теплообміну в варочній зоні реактора з використанням зонального методу;

–математичну модель для прогнозування температурних режимів нових елементів системи випарного охолодження на основі методу кінцевих елементів з урахуванням динаміки процесу руйнування вогнетривкої кладки;

–розроблено уточнену математичну модель для розрахунку і прогнозування теплотехнічних параметрів і оцінки ефективності роботи системи регенеративного нагріву повітря в процесі її експлуатації;

– методику розрахунку періоду стійкості стінового огороження варильної зони скловарної печі з використанням залежності швидкості корозії вогнетривких матеріалів, а також з урахуванням інтенсивності примусового охолодження.

3. Вперше на дослідно-промисловій печі з запропонованою в роботі системою випарного охолодження (СВО) отримано нові дані щодо температурних режимів парогенеруючих елементів СВО, включаючи усі стадії роботи агрегату.

4. Вперше визначено закон зміни оптимальної витрати повітря для дискретно-струминного та струминно-каналного способів охолодження вогнетривкої кладки варильного басейну при умові мінімізації експлуатаційних витрат на роботу системи охолодження.

5. Для утилізації теплового потенціалу пари СВО запропоновано ширококанальний пластинчатий випарник з плоскими і гофрованими каналами, для якого встановлено закономірності

теплопереносу, отримано і узагальнено нові експериментальні дані щодо інтенсивності теплообміну в діапазоні режимних параметрів, які характерні для роботи СВО.

Практичне значення роботи.

1. Створено алгоритми і програмні продукти для діагностики і прогнозування в режимі реального часу параметричних характеристик елементів високотемпературних установок (ВТУ) ванного типу.

2. Отримано шляхом математичного моделювання розрахункові дані про температурний стан елементів ВТУ в залежності від зміни конструктивних і режимних параметрів, які забезпечують можливість розробки і впровадження енергозберігаючих заходів стосовно скловарних печей.

3. Розроблено і досліджено на промисловому агрегаті удосконалену конструкцію пальникового пристрою з регульованою довжиною та кутом розкриття факелу. На базі ванної скловарної печі з СВО вперше створено оригінальний енерготехнологічний комплекс, на якому досліджено роботу елементів СВО басейну в умовах промислової експлуатації. Відпрацьовано технологію виготовлення, монтажу і експлуатації СВО з плоскими парогенеруючими елементами. Розроблено і впроваджено конструкцію датчика контролю за температурним режимом парогенеруючих панелей. Експериментально доведено доцільність використання СВО для підвищення енергоефективності скловарних печей і стійкості варильного басейну. Визначено рівень економії палива, електроенергії та вогнетривких матеріалів при використанні СВО для ванних печей.

4. Визначено вплив режимних параметрів на роботу регенеративних повітрянагрівачів, знайдено можливий рівень економії палива в агрегатах при виробництві скла. Розроблено рекомендації по підвищенню ефективності їх роботи, що має практичне значення при проектуванні та експлуатації промислових агрегатів.

5. Виконано діагностику теплових режимів системи повітряного охолодження промислових скловарних печей при використанні різних способів охолодження. Встановлено закон оптимальної витрати повітря для охолодження агрегатів при умові мінімізації експлуатаційних витрат в процесі робочої компанії печі.

6. На основі термодинамічного аналізу системи регенерації і системи охолодження запропоновано використання оригінальних теплоутилізаційних і металогідридних установок в промисловому виробництві скла, розроблено ряд рішень по удосконаленню елементів систем охолодження агрегатів, що підтверджено отриманими патентами.

Результати дисертаційної роботи впроваджено: на Мерэф'янському склозаводі (Харківська область) створено дослідно-промисловий агрегат з СВО, модернізовано пальникові пристрої; на Московському кришталевому заводі впроваджено прилад для діагностики шихтових матеріалів; на

ВАТ "СКЛЮ" використано рекомендації по розробці теплових режимів регенераторів в проекті реконструкції скловарної печі; в ДНДПІМП „Діпросталь” в проекті реконструкції регенеративних повітрянагрівачів доменної печі; в ВАТ „УкрДНДХіммаш” при розробці пластинчатого випарника; на ВАТ „Завод газорозрядних ламп” при удосконаленні систем опалення і повітряного охолодження печі, що підтверджено відповідними актами.

Матеріали дисертаційної роботи використано у навчальному процесі Національного технічного університету „ХПІ” при підготовці інженерів-теплоенергетиків та при написанні 2 навчальних посібників з грифом МОН України.

Особистий внесок автора. Основні ідеї і положення дисертаційної роботи розроблені автором особисто. В навчальному посібнику [1] автор підготував і написав розділи 3.4 і 4.5, в навчальному посібнику [2] – розділ 9.7, розробив методичні підходи і обрав напрямки реалізації заходів з енергозбереження в скляному виробництві [5, 11, 21, 23, 33, 37, 38], розробив математичні моделі теплообмінних процесів в елементах і системах ВТУ [4, 7, 8, 19, 36], забезпечив впровадження енерго- та ресурсозберігаючого теплообмінного обладнання, проведення і обробку даних експериментальних досліджень, які виконані на стендах [15, 35] і промислових скловарних печах [31, 33, 34], розробив методику і виконав аналіз результатів дослідження теплообмінних процесів в пластинчатому випарнику [14, 16], обрав напрямки і методи досліджень, визначив оптимальні параметри повітряного охолодження вогнетривкої кладки скловарних печей [14, 16, 24, 25], запропонував заходи по підвищенню ефективності теплоутилізаційного обладнання на основі використання металогібридних установок [3, 4, 26, 27], розробив рішення по удосконаленню систем випарного і водяного охолодження скловарних печей, виконав теплотехнічні розрахунки [11, 20, 22, 28-30, 39]. Роботи [9, 10, 33, 38] опубліковані самостійно.

Апробація результатів. Результати роботи доповідались на науково-технічних конференціях і семінарах, в тому числі на: Республіканській науково-технічній конференції „Питання удосконалення теплової роботи і конструкцій металургійних печей” (м. Дніпропетровськ, 1981 р.); 2-й Всесоюзній науковій конференції „Проблеми енергетики теплотехнології” (м. Москва, 1987 р.); Всесоюзній науково-технічній конференції із проблем енергетики теплотехнології „Інтенсивне енергозбереження в промисловій теплотехнології” (м. Москва, 1991 р.); Українській науково-технічній конференції „Проблеми інженерної екології” (м. Харків, 1992 р.); міжнародному семінарі „Наукові основи конструювання металургійних печей: теплотехніка і екологія”, (м. Дніпропетровськ, 1993 р.); міжнародній науково-технічній конференції „Проблеми ресурсо- і природозбереження в енергетиці” (м. Харків, 1994 р.); 2-й міжнародній науково-технічній конференції „Проблеми економії енергії” (м. Львів, 1999 р.); міжнародних науково-технічних конференціях „Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я ” (м. Харків, 1993, 1996, 1997, 1999, 2001-2005 рр.); міжнародній науково-технічній конференції

„Енергоефективність-2002”. (м. Київ, 2002 р.); міжнародній конференції „Ресурси і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд”, (м. Харків, 2004 р.); міжнародній науково-технічній конференції „Фізико-хімічні проблеми в технології тугоплавких неметалічних та силікатних матеріалів” (м. Харків, 2004 р.); міжнародній науково-практичній конференції „Інтегровані технології і енергозбереження” (Крим, с. Малий Маяк, 2004 р.), XIV міжнародній конференції „Теплотехніка і теплоенергетика” (Дніпропетровськ, 2005 р.); III, IV міжнародних конференціях „Проблеми промислової теплотехніки” (м. Київ, 2003, 2005 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 39 роботах, в тому числі в 2 навчальних посібниках, 24 статтях в фахових виданнях, у 8 тезах та матеріалах конференцій, по темі дисертації отримано 1 авторське свідоцтво і 4 патенти.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 223 найменувань та 9 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 336 сторінок, з яких 304 сторінки основного тексту, робота має 121 рисунок, 31 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, наведено загальну характеристику роботи.

Перший розділ присвячено аналізу теплових схем промислових високотемпературних теплотехнологічних установок, процесів і агрегатів скляного виробництва.

В Україні виробництво значної частини промислової продукції здійснюється з підвищеним рівнем витрат матеріальних і енергетичних ресурсів, що знижує конкурентоспроможність продукції. У цих умовах енергозбереження визначено одним із пріоритетних напрямків державної політики України. Дослідженням високотемпературних процесів з метою підвищення теплової ефективності ВТУ різного призначення присвячені роботи Гольдфарба Е.М., Губинського В.Й., Єринова А.Є., Ключникова А.Д., Лісієнка В.Г., Розенгарта Ю.Й., Семененка Н.А., Сороки Б.С., Щукіна А.А. та інших дослідників.

Використання системного підходу при аналізі теплових схем і процесів у ВТУ, який розроблено в роботах Ключникова А.Д., Коздоби Л.О., дозволяє на початку дослідження, не розглядаючи докладно їх особливості, виділити найбільш значущі фактори, які впливають на загальні характеристики систем. Характерним для ВТУ скляного і металургійного виробництва є наявність схожих робочих процесів, їх високий температурний рівень, складний тепло- і масообмін у робочій зоні технологічних реакторів, використання систем охолодження та регенерації тепла і т. д. Це дозволило застосувати загальний підхід для оцінки ефективності їх роботи з метою вибору перспективних напрямків енерго- та ресурсозбереження.

Вивчено досвід рішення різних теплотехнічних задач стосовно до скловарних печей, що

представлений у роботах Булавіна І.А., Волгіної Ю.М., Гінзбурга Д.Б., Гойхмана В.Ю., Губаря В.Ф., Дзюзера В.Я., Захарікова Н.А., Іл'яшенко І.С., Козлова А.С., Лісієнко В.Г., Матвєєва Г.М., Попова О.Н., Піоро Л.С., Руслова В.Н., Сезоненко Б.Д., Семікіна Е.І., Яшина Л.І. та інших дослідників.

Основним типом реакторів для промислового виробництва скловиробів залишаються регенеративні печі ванного типу безперервної дії з поперечним, підковоподібним і поздовжнім факелом. Їх робота характеризується низьким ККД, який у більшості випадків не перевершує 25-30 %, а питомі витрати теплової енергії для виробництва скла можуть становити від 7,5 до 45 ГДж/т. Робота промислових агрегатів характеризується значним споживанням матеріальних і енергетичних ресурсів, виходом великих обсягів вторинних енергоресурсів. Відзначено також недостатню стійкість вогнетривких матеріалів, відсутність ефективних систем охолодження і якісної ізоляції, що приводить до зменшення періоду експлуатації, зниження продуктивності агрегатів, погіршенню техніко-економічних показників. Ефективність використання палива, питомий вихід скломаси, тривалість кампанії печей на підприємствах України значно поступає характеристикам закордонних аналогів.

Аналіз умов експлуатації вогнетривких матеріалів у промислових скловарних печах показав, що термін їх експлуатації лімітується теплофізичними та фізико-хімічними властивостями вогнетривкої кладки стін варильного басейну, яка найбільш інтенсивно руйнується на рівні дзеркала розплаву скломаси. Швидкість руйнування залежить від багатьох факторів і може складати від 0,1 до 6 мм/добу. Тому для підвищення стійкості вогнетривів печей може застосовуватися повітряне, водяне, випарне охолодження. Повітряне охолодження застосовується на більшості підприємств, однак його використання не вирішує проблеми підвищення стійкості стін варильного басейну, при цьому мають місце додаткові витрати електроенергії. Водяне охолодження вимагає значних витрат води, характеризується складністю і ненадійністю роботи устаткування, не дозволяє використовувати відведену теплоту через її низький температурний потенціал. Використання систем випарного охолодження для скловарних печей, незважаючи на їх широке застосування на металургійних підприємствах, не одержало значного поширення на заводах для промислового виробництва скла.

Встановлено, що більша частина всіх енерговитрат припадає на робочі процеси в печах ванного типу, а низька ефективність агрегатів визначається недосконалістю теплотехнічного обладнання, недостатньою стійкістю вогнетривких матеріалів варильного басейну. Таким чином, підвищення ефективності роботи скловарних печей на підприємствах України пов'язане з необхідністю комплексного рішення питань ресурсозбереження, раціонального енерго- і тепловикористання за умови підвищення стійкості елементів печей, збільшення строків міжремонтного періоду. Виходячи з цього сформульовано мету і задачі дослідження.

Другий розділ дисертації присвячено розробці методики дослідження промислових агрегатів для виробництва скла. Обґрунтовано використання системного аналізу для постановки і рішення завдань енергозбереження в виробництві скла. До числа важливих науково-технічних проблем слід віднести розробку і освоєння методів розрахунку технологічних установок і агрегатів для виробництва скла, що є практичною основою створення ефективного енерго- і ресурсозберігаючого обладнання. Необхідними передумовами цього є також розробка комплексу технічних рішень і створення пристроїв, призначених для реалізації глибокого тепловикористання, керування тепловими режимами. Технологія виробництва скла включає операції, які реалізовані в певній послідовності поза робочим простором реактора, так і безпосередньо в робочому просторі. Виробництво скла здійснюється, як правило, в одному реакторі, що поєднує різні технологічні зони, де відбуваються складні фізико-хімічні процеси скловаріння при відповідних температурних умовах. Для більш повного використання енергії палива і теплових ВЕР до складу ВТУ включають елементи зовнішнього тепловикористання для одержання іншої технологічної продукції, наприклад гарячої води, пари, електроенергії (рис.1).

Питанням підвищення ефективності використання палива і удосконалення агрегатів для виробництва скла присвячена велика кількість досліджень. Однак, вони стосувалися рішення розрізнених завдань по дослідженню теплових режимів, удосконаленню окремих конструктивних елементів агрегатів, вибору теплової ізоляції, вирішенню питань екології.

У той же час дослідженням ефективності роботи всього технологічного комплексу виробництва скла приділялося недостатньо уваги. Це пояснюється тим, що робота теплоенергетичного обладнання ВТУ жорстко пов'язана зі складними процесами скловаріння, які реалізуються в робочому просторі агрегату. Крім того, у процесі експлуатації скловарних печей відбувається зміна режимних параметрів. Так, наприклад, через руйнування вогнетривкої кладки зменшується надійність роботи печей, збільшуються втрати теплоти через огороження, що компенсується збільшенням витрати палива. Винесення з реактора пилу шихти приводить до заростання насадки регенераторів, погіршення роботи теплоутилізаційного устаткування і газового тракту. Для підвищення стійкості вогнетривів застосовується повітряне, водяне примусове охолодження, що дозволяє знизити температуру поверхні вогнетривів варильного басейну, зменшити інтенсивність процесу руйнування. Аналіз публікацій показав, що у даний час відсутні науково обґрунтовані рекомендації з вибору оптимальних способів охолодження та їх параметрів.

Виходячи з цього, виникає необхідність у розробці методології і реалізації системного підходу до вибору напрямку дослідження для рішення задач енергозбереження з використанням методів математичного та фізичного моделювання роботи установок з урахуванням відповідних технологічних обмежень. Розгляд теплотехнології і агрегатів для виробництва скла з використанням положень системного підходу дозволив визначити рівні ієрархії і їх зв'язки за

допомогою “цибулинної діаграми” (рис. 2). У внутрішньому колі діаграми знаходиться об'єкт дослідження – високотемпературний реактор. Наступні шари діаграми включають систему генерації теплової енергії в реакторі паливними пристроями, систему охолодження елементів кладки варильного басейну, систему підігріву повітря горіння в регенераторах і систему утилізації теплоти.

Відповідно до розробленої методології обрано напрямок проведення теоретичних і експериментальних досліджень промислових установок з метою розробки та впровадження енергозберігаючих заходів для скловарних печей.

Обґрунтовано вибір об'єкту дослідження – ванних регенеративних печей безперервної дії з підково- та напівпідковоподібним факелом, які широко використовуються на промислових підприємствах для виробництва різних сортів скла. Таким чином, на основі аналізу публікацій і обстеження промислових агрегатів для виробництва скла з використанням положень системного аналізу була розроблена загальна методика досліджень, структуру якої наведено на рис. 3.

Третій розділ дисертації присвячено розробці математичних моделей теплових процесів, які реалізуються в скловарних печах і в теплоенергетичному обладнанні. Встановлено, що в більшості існуючих методик автори використовували ряд припущень, найчастіше не враховували динаміку руйнування вогнетривів, зміну витрат палива і повітря горіння в процесі експлуатації, зміну температурних режимів, запиленість продуктів горіння шихтовими матеріалами та інше. Сучасні можливості комп'ютерних технологій дозволяють створювати уточнені методики розрахунків, уніфіковані програмні блоки, реалізація яких дає можливість одержати більш повну інформацію про характеристики робочих процесів та об'єктів.

Стосовно до умов роботи скловарних печей розроблено методику розрахунку процесів горіння газу, що дозволила визначити температурні параметри і властивості продуктів горіння з урахуванням особливостей регенеративного підігріву повітря, зміни коефіцієнтів надлишку повітря по тракту. На основі теплового балансу розроблено методику розрахунку впливу підігріву повітря на температуру горіння і на економію палива в печі.

Для визначення максимально можливого рівня впливу температури нагріву повітря на температуру горіння визначали її в припущенні, що дисоціація газів і теплові втрати відсутні:

$$t_r = \frac{Q_n^c + Q_B + Q_r}{\int C_{pr}(t) \cdot V_r dt} \quad (1)$$

При спалюванні природного газу з теплотою згоряння Q_n^c без підігріву газу ($Q_r=0$) температура t_r залежить від теплоти, що внесена з нагрітим повітрям Q_n , і обсягу продуктів горіння V_r . При наявності присосів повітря по тракту скловарних печей загальна кількість теплоти, яка внесена повітрям у робочий простір, дорівнює:

$$Q_n = \alpha_p \cdot V^0 \cdot C_{pr}(t_{гв}) t_{гв} + (\alpha_n - \alpha_p) \cdot V^0 \cdot C_{pr}(t_{хп}) t_{хп} \quad (2)$$

Таким чином, підвищення температури горіння Δt_r за рахунок підігріву повітря в регенераторі від температури t_{xn} до температури t_{rn} складає:

$$\Delta t_r = Q_n(t_{rn}) - Q_n(t_{xn}) / V_r C_{pr}(t_{rn}). \quad (3)$$

Для визначення величини $Q_n(t_{rn})$ необхідно визначити температуру повітря на виході з насадки регенератора. З метою визначення параметрів роботи системи регенеративного підігріву повітря розроблено уточнену математичну модель регенератора. Алгоритм розрахунку температури насадки $t_{i,j}$, газів $\vartheta_{i,j}^r$ і повітря $\vartheta_{i,j}^n$ у відповідності з розрахунковою кінцево-різницевою схемою складено на основі рішення рівнянь енергобалансу для всіх n елементів для кожного моменту часу j з часовим кроком Δt ори заданій тривалості періодів нагрівання і охолодження насадки:

$$\sum_{i=1}^n Q_{i,j}^k = G_i C_n(t_{i,j}) t_{i,j+1} - t_{i,j} \quad (4)$$

$$G_i C_n(t_{i,j}) t_{i,j} - t_{i,j+1} = V_j^r \cdot C_r(\vartheta_{i,j}^r) \cdot \vartheta_{i,j}^r - \vartheta_{i+1,j}^r \cdot \Delta t; \quad (5)$$

$$G_i C_n(t_{i,j}) t_{i,j} - t_{i,j+1} = V_j^n \cdot C_n(\vartheta_{i,j}^n) \cdot \vartheta_{i,j}^n - \vartheta_{i-1,j}^n \cdot \Delta t. \quad (6)$$

Величину питомої витрати палива та економії палива ΔE_T в печі за рахунок нагрівання повітря горіння в регенераторі було знайдено шляхом порівняння роботи печі з однаковою продуктивністю $\Pi_1 = \Pi_2$ при використанні холодного і нагрітого повітря горіння, що відповідало значенням температур газів за піччю t_{or} , t_{yr} . Знаючи питомі витрати палива на одиницю продукції при роботі на холодному $b_1 = B_1 / \Pi_1$ та нагрітому в регенераторі гарячому повітрі $b_2 = B_2 / \Pi_2$, витрату продуктів згорання V_r визначимо як:

$$\Delta E_T = (1 - b_2 / b_1) \cdot 100 = \left[\frac{Q_n^c - V_r C_r t_{or}}{Q_n^c - V_r C_r t_{yx}} \right] \cdot 100. \quad (7)$$

Адекватність моделі доведена шляхом порівняння розрахункового розподілу температур газу і повітря по висоті насадки з експериментальними даними, які було отримано на промисловому регенераторі (рис. 4). При цьому розбіжність склала 7,3-12,1%.

На основі зонального методу з використанням рекомендацій, які описані в роботах Рафаловича І.М., Ключникова А.Д., розроблено алгоритм розрахунку променистого теплообміну в робочому просторі ванної скловарної печі.

Створена методика розрахунку кутових коефіцієнтів $\alpha_{k,j}$ між поверхнями робочої камери і факелом з урахуванням затінення їх факелом. Система рівнянь для визначення ефективних променистих потоків має наступний вигляд:

$$\sum_{j=1}^n \alpha_{k,j} \cdot E_{e\phi,j} = C_k, \quad (8)$$

де $j=1, 2, \dots, n$ – номери зон.

Коефіцієнти $\alpha_{k,j}$ і C_k розраховували для випадків, коли були відомі температура зони або її результуючий тепловий потік. Коефіцієнти $\alpha_{k,j}$ визначали при відповідних значеннях $\Phi_{k,j}$, що характеризують випромінювання з ділянки з індексом k на ділянку з індексом j . Після рішення рівняння (8) розраховували значення результуючих променистих потоків $E_{рез}$ для зон з номерами $1 \leq k \leq m$:

$$E_{рез} = \frac{A_k}{1 - A_k} \cdot (E_{эф.к} - \sigma \cdot T_k^4), \quad (9)$$

а також температури для зон з відповідними номерами $(m+1) \leq k \leq n$:

$$T_k = \frac{[A_k \cdot E_{эф.к} - (1 - A_k) \cdot E_{рез}]}{(A_k \cdot \sigma)^{0,25}}. \quad (10)$$

Алгоритм розрахунку променистого теплообміну у варильній зоні був реалізований стосовно до параметрів скловарної печі №2 МСЗ за допомогою пакету дослідницьких програм. На першому етапі проводився розрахунок невідомої температури відповідних зон при заданих результуючих потоках $E_{рез}$ або знаходили променисті потоки для зон з відомою температурою при заданих коефіцієнтах $\Phi_{k,j}$ і ступенях чорноти. Інша програма створена з метою визначення $\Phi_{k,j}$ між кладкою, дзеркалом ванни і факелом, що давало змогу провести розрахунки при зміні геометричних параметрів факелу. Створену модель було використано для дослідження процесів променистого теплообміну в робочій зоні печі, а отримані результати – при удосконаленні пальникових пристроїв.

Суттєвий вплив на ефективність роботи печей має стійкість вогнетривких матеріалів варочної зони. На даний час у літературі відсутні відомості про розробку універсальної методики і програмного забезпечення для визначення термохімічної стійкості вогнетривів, зокрема стінового бруса ванни печі. Для розрахунку корозійного руйнування вогнетривів варильного басейну на рівні скломаси розроблено уточнену інтегральну математичну модель стійкості з урахуванням залежності швидкості руйнування вогнетриву від температури і інтенсивності зовнішнього охолодження. При розробці моделі враховували рекомендації М.В.Захарікова і О.М.Попова для розрахунку служби вогнетривів у скловарних печах. Створена математична модель відрізняється використанням експоненціальної залежності швидкості корозійного руйнування вогнетривів від температури стінки басейну, в ній також врахована залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від температури.

Система рівнянь теплопередачі для визначення температури на внутрішній t_b і зовнішній t_n поверхнях вогнетривкого бруса ванни печі має вигляд:

$$\begin{cases} \lambda_e(t_a - t_n) = L\alpha_c(t_n - t_0) \\ K_c(t_c - t_b) = K(t_c - t_0). \end{cases} \quad (11)$$

Значення коефіцієнтів теплопередачі визначали як:

$$\begin{cases} K_c = \left[B_0 / \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{L}{\lambda_e} \right) \right]^{-1}, \text{ при } \frac{1}{\alpha_c} + \frac{L}{\lambda_e} \leq A_0; \\ K_c = B_0^{*-1}, \text{ при } \frac{1}{\alpha_c} + \frac{L}{\lambda_e} > A_0. \end{cases} \quad (12)$$

Рішення системи (11) реалізовано при заданих параметрах t_c, t_0 – температура скла і повітря; L_0 – товщина бруса; A_0, B_0, B_0^* – константи, що визначають термічний опір пристінного шару скла; α – коефіцієнт теплообміну на зовнішній поверхні бруса ванни. При визначенні t_b і t_n виконувалось ітераційне уточнення коефіцієнта теплопровідності λ_e і коефіцієнта променистого теплообміну α_d . Тривалість кампанії печі визначається стійкістю стінового огороження басейну, яка залежить від швидкості корозійного руйнування бруса товщиною L як $W = dL/d\tau$. Період стійкості T_{II} стінового бруса представлено як інтеграл:

$$T_{II} = \int_{L_{ocm}}^{L_0} W^{-1}(t_b) dL, \quad (13)$$

де L_0 і L_{ocm} – початкова і залишкова товщина стінового бруса.

Швидкість руйнування вогнетривів W визначається температурою внутрішньої поверхні стінки варильного басейну і описується рівнянням Арреніуса $W = e^{(A^* - B^*/t_b^*)}$ в залежності від констант A^*, B^* для вогнетривких матеріалів та сорту скла, поточної температури $t_b^* = t_b + 273$ і температури внутрішньої поверхні стінки t_b . Тривалість кампанія печі визначається періодом стійкості стінового бруса (13), у якому поточна температура t_b може бути знайдена з системи рівнянь (11). Інтеграл стійкості (13) представлено як:

$$T_{II} = \Delta L \sum_i^N W^{-1}(t_{Bi}), \quad (14)$$

де t_{Bi} – температура внутрішньої поверхні стінки басейну при відомому режимі теплопередачі відповідає поточній товщині стінки L_i . Результати розрахунку періоду стійкості (14) були порівняні з опублікованими даними Фервонера О., Берндта К. (рис. 5). Розбіжність склала від 6 до 20%, що свідчить про можливість застосування моделі для розрахунків руйнування вогнетривів.

Для визначення працездатності панелей СВО і діагностики температурних режимів на основі методу кінцевих елементів, розроблено методуку і створено пакет програм для рішення двомірної задачі теплопровідності. Диференційне рівняння теплопровідності в загальному виді представлено

в вигляді

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right] = c \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (15)$$

з граничними умовами першого $t_n = f(x, y)$ і третього роду $\alpha \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} - t_p = \lambda \frac{\partial t}{\partial x}$ для розрахункового об'єкта, який складався із двох основних масивів – безпосередньо елемента панелі СВО і вогнетривкого бруса змінної товщини. Температура поверхні елемента, що контактувала з розплавом, приймалась відповідно сорту скла. Інтенсивність теплообміну в трубах панелі і з боку зовнішньої поверхні визначали по відповідним критеріальним залежностям. Панелі СВО являли собою конструкції, окремі елементи яких виготовлялись з чотирьох матеріалів з різними теплофізичними властивостями. Їх працездатність визначається розподілом і рівнем температур у бетоні панелі на різних стадіях експлуатації скловарної печі. Застосування розробленої програми забезпечило можливість проведення розрахункового експерименту для дослідження температурних полів в панелі СВО при відповідній товщині вогнетривкої кладки, яка змінює свої розміри в процесі експлуатації.

У четвертому розділі представлено результати досліджень робочих процесів в скловарних печах, зокрема променистого теплообміну, наведено дані по вдосконаленню паливних пристроїв та режимів роботи системи регенеративного підігріву повітря, які виконано з метою підвищення ефективності використання природного газу на опалення печі.

Відзначимо, що значна кількість скловарних печей обладнані пальниками, у яких розміри факелу не відповідають розмірам робочого простору варильної зони печі, що приводить до нераціональних витрат палива.

З використанням розробленої математичної моделі виконано дослідження променистого теплообміну в робочому просторі скловарної печі №2 МСЗ, визначено вплив зміни режимних параметрів і геометричних характеристик факелу. Встановлено залежність кутових коефіцієнтів при зміні ступеня чорноти кладки і факелу, температури факелу, геометричних розмірів і розташування факела у варильній зоні.

Визначено вплив зміни параметрів факелу на процеси променистого теплообміну у варильній зоні печі. Розрахунковим шляхом було отримано величини теплових потоків, що випромінювались факелом, а також потоків, що падали на дзеркало ванни. Розраховано значення температури склепіння, бічних і торцевих стін при зміні геометричних параметрів факелу. У розрахунках величина результуючих теплових потоків на кладку приймалася постійною, загальна кількість теплоти, яка випромінювалася на кладку, відповідала умовам роботи промислових печей. Відношення ширини факелу до максимальної розрахункової ширини змінювали в діапазоні

$0,25 < r/r_{\max} < 1$, що дозволило знайти раціональні розміри факелу. Визначено також вплив зміни ступеня чорноти ванни ϵ_v і факелу ϵ_ϕ на теплотехнічні параметри варильної зони скловарної печі, досліджено вплив ширини факелу. Виявлено, що при зміні r/r_{\max} від 0,25 до 0,75 доля теплоти на ванну збільшується від 0,812 до 0,912. Показано, що в реальних умовах зміну геометричних характеристик факелу можливо досягти шляхом оптимізації конструкції паливного пристрою.

Досліджено вплив зміни температури факелу від 1500°C до 1650°C на величину теплового потоку, що падає на ванну Q_v . Як свідчить характер кривих на рис. 6 (1- $T_\phi=1650^\circ\text{C}$; 2- $T_\phi=1600^\circ\text{C}$; 3- $T_\phi=1550^\circ\text{C}$; 4- $T_\phi=1500^\circ\text{C}$), температура факелу є важливим чинником, що суттєво впливає на нагрів ванни. Відносна кількість теплоти, що падає на ванну, $\eta=Q_v/Q_\phi$ збільшується при $0,75 < r/r_{\max} < 1$ на 5,5-7,0%.

Досліджено також вплив зміни геометричних параметрів і розташування факела на ККД варильного простору скловарної печі (рис. 7). Встановлено, що оптимум має місце при ширині факела, близькому до значення $r/r_{\max}=0,8$.

Отримано дані про зміну температури кладки варильної зони для досліджуваних параметрів. Визначено вплив зміни загальної поверхні факелу в діапазоні від 50 до 150 м^2 на інтенсивність променистої складової теплового потоку (рис. 8).

Результати розрахунків було використано при розробці рішень по вдосконаленню конструкції і режимів роботи пальників печі шляхом подачі стисненого повітря різного рівня тиску в газовий струмінь для регулювання розмірів факелу. На печі було змонтовано дві групи пальників та проведено дослідження їх роботи. Було зафіксовано зміну структури факелу, що привело до підвищення температури склепіння печі на $10-15^\circ\text{C}$. Отримані дані було використано для модернізації пальників, були поліпшені умови згоряння палива в робочому просторі печі за рахунок зміни кута розкриття, довжини і настильності факелу, досягнуто зменшення витрати природного газу до 5-7 % на піч при сталій продуктивності. За рахунок додаткового охолодження пальників стисненим повітрям втричі збільшено термін їх експлуатації.

Виконано дослідження режимів роботи регенераторів, визначено вплив зміни їх параметрів на температуру нагрівання повітря. Встановлено, що підвищення температури газів на вході в насадку на кожні 50°C приводить до підвищення температури повітря на виході з насадки приблизно до 30°C . Досліджено роботу регенераторів при зміні швидкості димових газів w_r і повітря w_n в насадці від 0,1 до 0,5 м/с та при зміні температури повітря на вході в насадку. З використанням методу математичної статистики шляхом обробки розрахункових даних отримана залежність середньої температури нагрівання повітря від вхідних параметрів

$$\bar{t}_n = 79,11 + 0,913 \cdot \bar{t}_r + 0,245 \cdot t'_n - 422 \cdot w_r - 234 \cdot w_n, \quad (16)$$

яка дає можливість визначити температуру повітря на виході з регенератора в залежності від значень температури газів і повітря на вході в насадку та швидкості теплоносіїв в каналах регенератора з різними розмірами.

Визначено вплив температури підігріву повітря на температуру горіння й економію палива ΔE_T в скловарній печі. Проведена оцінка динаміки зміни величини ΔE_T в залежності від параметрів регенераторів. У діапазоні зміни температур газів 1000-1200 °С значення ΔE_T може складати від 20 до 51% в порівнянні з роботою печі без підігріву повітря горіння. Визначено, що шляхом зміни режимних і конструктивних параметрів регенератора можливо забезпечити рівень економії палива до 5-7%. Проведені експериментальні дослідження на скловарній печі підтвердили достовірність результатів розрахунків температурних полів у насадці регенератора. На основі виконаних досліджень розроблено рекомендації з підвищення ефективності роботи печі і регенератора, які були використані при реконструкції печі №1 ВАТ “СКЛО”.

У п'ятому розділі обґрунтовано доцільність використання випарного охолодження для ванних скловарних печей, представлені результати щодо створення дослідно-промислової установки на базі ванної печі з СВО.

Як відзначалось, недостатня стійкість стін варильного басейну є обмежуючим чинником для збільшення тривалості кампанії скловарних печей, що приводить до значних капітальних витрат на їх ремонт. При цьому погіршуються техніко-економічні показники скляного виробництва.

Аналіз публікацій і досвіду експлуатації промислових агрегатів дозволив розглянути, узагальнити і сформулювати положення, які послужили науково-технічним обґрунтуванням для використання випарного охолодження скловарних печей. На основі цього було запропоновано для скловарної печі, що виплавляла алюмоборсилікатне скло, для підвищення стійкості ванни використати СВО з плоскими елементами з вмонтованими в них вертикальними трубчастими екранами.

Для оцінки рівня теплових втрат і визначення впливу випарного охолодження на витрачання палива були використані опубліковані дані по режимах роботи скловарної печі даного типу. Визначено теплові втрати через кладку стін басейну скловарних печі через руйнування вогнетривів. Для варіантів повітряного і випарного охолодження, використовуючи значення складових теплових потоків Q_i , з рівняння балансу знайдено додаткові витрати газу ΔB_T на компенсацію теплових втрат

$$\Delta B_T = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i / (Q_n^c + Q_n).$$

Для даної печі розрахункова величина ΔB_T при використанні СВО склала 5,8 % від витрати палива на піч. Відзначимо, що використання випарного охолодження замість повітряного може забезпечити значну економію електроенергії тому, що потужність електродвигунів вентиляторів може становити до 60-120 кВт. При повітряному охолодженні в робочий простір печі надходить

частина холодного повітря, що приводить до необхідності додатково збільшувати витрату палива. Рядом авторів відзначена загальна економія палива при роботі печі з випарним охолодженням на рівні 7% і економія електроенергії. Важливим аргументом на користь застосування випарного охолодження є можливість використання для потреб підприємств отриманої пари. Таким чином, використання СВО дає можливість збільшити міжремонтний термін при економії вогнетривких матеріалів для кладки стін печі. Виконані техніко-економічні розрахунки для застосування випарного охолодження стосовно даної промислової скловарної печі показали доцільність його використання для підвищення терміну експлуатації печі.

За допомогою створеної математичної моделі досліджено режими роботи панелі з вогнетривким брусом різної товщини, а також при руйнуванні жаростійкого бетону панелі. Визначено розподіл та перепади температур ΔT в панелі при температурі скла на поверхні бруса на рівні $T_{ск}=1100-1400$ °С. Виконані розрахунки свідчать про те, що при наявності перед елементом СВО вогнетривкого бруса зафіксовано температури на стику матеріалів 135-145°С. При руйнуванні бруса на 50% температура на стику вогнетривків і бетону панелі сягає 160-180°С. При повному руйнуванні бруса має місце контакт розплаву безпосередньо з поверхнею бетону елемента, температура бетону в міжтрубному просторі сягає 150-350°С (рис. 9). Установка ізоляції між бетоном і сталевим корпусом є доцільною тому, що температура корпусу стабілізується на рівні 40-60°С. Результати досліджень підтвердили працездатність запропонованої конструкції панелей СВО.

Викладено технологічні особливості створення оригінальної дослідно-промислової скловарної печі з СВО. Відпрацьовано методичні і технологічні питання виготовлення, монтажу і експлуатації СВО з елементами плоскої форми. Розроблено методику проведення промислових досліджень на дослідно-промисловій печі з СВО, виконані роботи з виготовлення і установки термодатчиків, розроблено вимірювальну схему.

Робочі елементи СВО після зборки, гідравлічних випробувань екранів і бетонування були встановлені із зовнішньої сторони кладки по периметру басейну (рис. 10). На рисунку цифрами визначено: 1 - скломаса; 2 - зона руйнування вогнетривків; 3, 4 - кладка стін; 5 корпус панелі СВО; 6 - шар термоізоляції; 7, 15 - верхній і нижній колектор; 8, 17 - патрубок; 9 - вихід пароводяної суміші; 10 - труби екрану 11, 13, 14 - термодатчики; 12 - наповнювач панелі; 16 - вхід води; 18 - подина. Два циркуляційних контури утворено системою опускних і підйомних труб, що з'єднують барабан-сепаратор, конденсатор і всі елементи панелі. Робота СВО передбачена при наявності споживачів пари і при їх відсутності, коли вся пара буде спрямована у конденсатор. Відпрацьовано технологію монтажу СВО з урахуванням наявних конструкцій і металевих каркасів печі. Таким чином, у результаті виконаного комплексу робіт була розроблена і уперше реалізована в промислових умовах технологія використання СВО з плоскими панелями для стін варильного

басейну скловарної печі.

Після проведення пуско-налагодочних робіт була введена в експлуатацію дослідно-промислова установка на базі ванної печі з СВО варильного басейну.

Виконано експериментальні дослідження температурних режимів роботи основних робочих елементів СВО і скловарної печі. У результаті проведеного обстеження з використанням дослідних даних і результатів розрахунку теплового балансу визначено основні показники роботи скловарної печі. На рис.11 наведені експериментальні дані, що характеризують динаміку прогріву панелей СВО в режимі пуску печі. Вони свідчать про вплив термічного опору бруса стін на режим прогріву панелей СВО. Причому характер зміни температурного режиму панелі відповідав рівню підйому температури у варильній зоні печі. Через сім діб після початку пуску температура з зовнішньої сторони панелі досягла 500С. Прогрів панелі, як видно з характеру кривих 3 і 4, завершився через 11-12 діб.

Визначено вплив роботи парогенеруючих елементів СВО на рівень температур в огороженні варильного басейну. Термопар, що розташовані на відстані 30 мм від зовнішньої поверхні панелі, стабільно показувала температуру в діапазоні 70-80°C. При проведенні вимірів під час експлуатації печі термопар на внутрішній поверхні панелей зафіксували температури на рівні 700°C. Для стаціонарного режиму роботи печі характерними для визначення теплового стану охолоджуваних панелей є показання від 300 до 560 °С для термопар, які розташовані у середині елемента. Відзначимо, що різний ступінь руйнування вогнетривів і матеріалу панелі сприяв локальному підвищенню температурного рівня для окремих елементів.

Для відпрацювання режиму останову дослідно-промислової печі практичний інтерес представляє динаміка зниження температури в елементах СВО при останові печі (рис. 12). Значення температур, що зафіксовані термопарами, показали, що через 12 годин максимальна температура панелей знизилася до рівня 400-480°C, мінімальний рівень температур складав менше 250°C. При всіх режимах показання термопар, розташованих біля зовнішньої стінки, становили близько 100 °С, тоді як температура зовнішньої стінки панелей залишалася на рівні 40-50 °С. Отримані розрахунковим шляхом максимальні рівні температур з різницею до 8-11% підтверджено даним експериментальних випробувань.

Експериментальні дослідження, які проведено на дослідно-промисловій установці, показали ефективність застосування СВО з плоскими панелями для стін варильного басейну скловарної печі, про що свідчать наведені в таблиці 1 техніко-економічні характеристики печі.

Шляхом використання плоских панелей СВО досягнуто підвищення стійкості стін варильної зони, також вдалося істотно знизити температуру зовнішньої поверхні стін печі, збільшити міжремонтний період.

Режимні параметри роботи печі з СВО

Найменування показника	Розмірність	Значення показника	
		Повітряне охолодження	Випарне охолодження
Продуктивність печі	т/добу	18,6	21,6
Витрата газу на опалення	м ³ /год	725	648
Теплова потужність печі	кВт	6661,3	5953,63
Питома витрата природного газу	м ³ /т	935,5	720,0
Питома економія палива	м ³ /т	–	215,5
Економія електроенергії	кВт·год / т	–	86
Загальна економія палива (період роботи 7 міс.)	м ³	–	977508
Економія електроенергії	кВт·год	–	390096

Використання плоских панелей для ванної печі дозволяє зменшити витрати вогнетривких матеріалів на кладку стінового огороження за рахунок зменшення їх товщини, можливого збільшення площі варильної зони. Зафіксовано утворення гарнісажу на поверхні труб екранів, товщина якого для алюмоборсилікатного скла складала від 8 до 13 мм, що дозволило підвищити маневреність агрегату, реалізувати неодноразово режими пуску і останову печі з мінімальними витратами вогнетривків. Була відпрацьована технологія виготовлення і монтажу в промислових умовах плоских панелей СВО для стін ванни без демонтажу металевого каркаса скловарної печі. Позитивним фактом є можливість зменшення витрати вогнетривких матеріалів для кладки варильного басейну при використанні СВО із плоскими панелями за рахунок зменшення товщини вогнетривкої кладки на 30-40%. Одночасно в 6-8 разів зменшились витрати електроенергії в порівнянні з використанням повітряного охолодження, досягнуто зниження питомої витрати природного газу на опалення агрегату на 215,5 м³/т скла. Таким чином, відкривається можливість створення енерготехнологічного комплексу для виробництва скла і водяної пари, який може бути використано на потреби підприємства. Отримані дані послужили основою для подальшого удосконалення систем охолодження скловарних печей.

У шостому розділі наведено результати досліджень по підвищенню ефективності роботи систем повітряного та випарного охолодження скловарних печей, розглянуто можливості енерготехнологічного комбінування на їх основі. Охолодження варильного басейну визначено як спосіб збільшення терміну експлуатації скловарної печі. Для дослідження режимів роботи повітряного охолодження варильного басейну скловарної печі використано розроблену математичну модель, яка дозволяє з урахуванням процесів теплопередачі і руйнування вогнетривків визначити період стійкості при різній інтенсивності охолодження. Про адекватність розробленої моделі свідчать дані, які представлено на рис. 13. Відхилення розрахункових даних від експериментальних даних В.М. Будова стосовно корозійного руйнування бакора-33 складало на рівні

4-8 %. Моделювали корозійне руйнування вогнетривів при температурі скла $t_{ск}=1400^{\circ}\text{C}$ і при обдуванні бруса струменем повітрям при ширині сопла $b=15-20$ мм.

Розрахунковим шляхом визначена стійкість різних стінових вогнетривів (бакор-33, бакор-41, ХАЦ-30) в залежності від інтенсивності повітряного охолодження. При природному і малоінтенсивних режимах охолодження ($\alpha < 75$ Вт/(м²К)) стійкість бруса лінійно залежить від коефіцієнта тепловіддачі. Застосування інтенсивного повітряного охолодження з $\alpha > 150$ Вт/(м²К) істотно підвищує стійкість вогнетривів. Визначено вплив вихідної товщини бруса L_6 (від 50 до 300 мм) на величину періоду стійкості вогнетривів для режимів з різною інтенсивністю охолодження (рис.14).

Встановлено, що інтенсивне повітряне охолодження приводить до підвищення періоду стійкості вогнетривів бруса в 3-5 разів. Використання понадінтенсивного режиму охолодження при рівні $\alpha > 300$ Вт/(м²К) (випарне охолодження) забезпечує підвищення стійкості в 10-12 разів у порівнянні з режимом без примусового охолодження.

Отримані результати свідчать про необхідність обґрунтованого вибору вогнетривких матеріалів і режимів охолодження з урахуванням техніко-економічних показників роботи скловарних печей і систем охолодження. На основі рішення задачі розрахунку періоду стійкості і теплопередачі сформульована та вирішена задача чисельного визначення оптимального режиму повітряного охолодження басейну і оптимальної тривалості кампанії скловарної печі з урахуванням питомих економічних показників. Розглянуто використання різних цільових функцій, що являють собою величину прибутку, повні і питомі додаткові фінансові витрати внаслідок застосування примусового охолодження з урахуванням вартості капітального ремонту печі. Задачу вибору оптимального режиму охолодження зведено до пошуку закону зміни коефіцієнта тепловіддачі, який мінімізує питомі витрати або максимізують питомий прибуток за повну кампанію печі.

Визначення питомих додаткових витрат за кампанію печі T_n+T_p , пов'язаних із застосуванням примусового охолодження і холодним ремонтом:

$$S_{II} = \left(\left(1 - \frac{T_p}{T_n} \right) \sum_{j=1}^5 S_j + S_6 \right) / (T_n + T_p), \quad (16)$$

$$\Pi = (\bar{S}_{II} P T_n - \sum_{j=1}^5 S_j) / (T_n + T_p), \quad (17)$$

де S_1 - вартість втрат теплоти, що відводиться системою охолодження за кампанію печі T_n ; S_2 - капітальні й експлуатаційні витрати на розробку, виготовлення, монтаж і експлуатацію системи охолодження; S_3 - інші додаткові експлуатаційні витрати за кампанію печі, безпосередньо не пов'язані з роботою системи охолодження (теплові втрати); S_4 - вартість холодного ремонту печі; S_5 - витрати, пов'язані з тепловими втратами при розігріві й зупинці печі; S_6 - непрямі витрати,

пов'язані із втратою прибутку через зупинку печі на ремонт. Прибуток може бути віднесено до робочої кампанії T_n або до повної кампанії T_n+T_p .

Реалізацію умов оптимізації режиму охолодження при $S_n \Rightarrow \min$ можливо забезпечити шляхом керування коефіцієнтом теплообміну в системі охолодження $\alpha_c = \alpha_c(\tau) \Rightarrow \text{opt}$. Питому потужність на одиницю площі охолоджуваної поверхні $N_2=N_2(\alpha)$ визначали в залежності від виду, конструкції та режиму роботи системи охолодження. Для рішення задачі оптимального керування роботою системи охолодження розроблено програмне забезпечення, що реалізує метод координатного спуску в сполученні з методом золотого перетину для визначення експлуатаційних характеристик системи.

Виконані чисельні розрахунки по оптимізації режимів роботи дискретно-струминної і струминно-канальної систем охолодження скловарної печі ванного типу. Система охолодження складається з ряду сопел прямокутного перетину, установлених із зовнішньої сторони вогнетривкої кладки стін варильного басейну. Ширина зони охолодження – 300 мм. Розрахунки виконані при коефіцієнтах теплообміну $11,6 \leq \alpha_i \leq 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Питому масову витрату повітря $G_i=f(\alpha_i)$ розраховували по рекомендаціям Б.П. Дибана та А.І. Мазура. Застосування функцій максимізації питомого чистого прибутку дозволило одержати оптимальне рішення на 5-6% краще, ніж при використанні інших цільових функцій. Оптимальна тривалість робочої кампанія печі склала $T_n=48,0$ місяців при питомих додаткових витратах $S_n=153$ грн/год, тоді як для інших цільових функцій ці параметри знаходяться на рівні $T_n=42,0$ місяці при $S_n=169-171$ грн/год.

На рис. 15 представлено характер знайденої оптимальної зміни витрати G_i і швидкості повітря при тривалості експлуатації $T_{\text{порт}}=48$ міс. Отримані результати свідчать про те, що відсутність охолодження басейну печі або застосування понадінтенсивного режиму охолодження протягом всієї робочої кампанії економічно не доцільно.

Виконано оптимізаційні розрахунки для варіантів роботи системи охолодження з шириною сопла b від 5 до 18 мм. Визначено, що максимальна витрата повітря G_{max} склала від 0,4 до 0,91 $\text{м}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$, при цьому значення $T_{\text{порт}}$ зменшувалось від 48,0 до 29,0 місяців. Отримані дані по рівню інтенсивності охолодження підтверджують обґрунтованість вибору сопла ширини $b=5\text{мм}$. Встановлено, що при значній ширині сопла $b=18\text{мм}$ застосування понадінтенсивних режимів з витратою $G=1,5-2,0 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$ також економічно не виправдане.

Досліджено також струйно-канальну систему повітряного охолодження, де замість сопел використовується перфорована стінка короба. Для струминно-канальної системи охолодження знайдено оптимальне значення параметрів, що забезпечує мінімальну потужність на подачу теплоносія. Встановлено співвідношення між відносною площею соплових отворів $\bar{f} = f_o / f_t$ та їх відстанню до охолоджуваної поверхні h . Як цільову функцію використовували вираження для

питомого чистого прибутку. Оптимізаційні розрахунки проведені при $11,6 \leq \alpha_i \leq 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Отримано залежність оптимальної зміни коефіцієнта тепловіддачі і величини теплового потоку за робочу кампанію печі, знайдено оптимальний закон зміни витрати і швидкості повітря, що дозволяє реалізувати ці режими на скловарній печі.

Проведено порівняння двох способів повітряного охолодження. Для розглянутого варіанта розкладки вогнетривів відзначимо більшу ефективність системи струминно-каналного охолодження в порівнянні із системою дискретно-струминного охолодження (рис. 16).

Встановлено характер максимальної оптимальної витрати повітря за кампанію печі. Виходячи з результатів оптимізаційних розрахунків рекомендовано раціональну розкладку вогнетривів при оптимальній товщині стін кладки варильного басейну.

Для утилізації теплоти пари СВО запропоновано ширококанальний пластинчатий випарник з плоскими і гофрованими каналами, для якого виконано теоретичні і експериментальні дослідження процесів кипіння в умовах спрямованого руху потоку рідини в вертикальному каналі. Ці апарати мають високу ефективність, меншу металоемність, ніж традиційні апарати трубчастого типу і можуть бути використані в СВО для утилізації теплового потенціалу пари при умові визначення коефіцієнтів теплообміну і теплопередачі.

Процес випаровування рідини має циклічний характер, включає в себе утворення і зростання парового пузиря, відрив його від центра утворення пари і повторення процесу. Це сприяє пульсуючому руху суміші рідини і пари в каналі, який відіграє значну роль в інтенсивності процесу теплопереносу. Неврівноважений стан системи пара-рідина підтримує мінімальний перегрів рідини $\mathfrak{G}_{\text{тер}}$, що забезпечує умови для зародження і виживання парового пузиря, визначається з рівняння теплового балансу для границі розподілу фаз (пара-рідина):

$$dQ = V' \rho' c' dt = r \rho'' dV'', \text{ звідкіля } dt = \frac{r \rho''}{c' \rho'} \cdot \frac{dV''}{V'} = \mathfrak{G}_{\text{мер}} \frac{dV''}{V'}, \quad (18)$$

де r – теплота пароутворення; c – теплоємність, індекси “'” – рідка фаза, “''” – парова фаза.

Із рівняння Клапейрона-Клаузіуса для помірних значень перегріву маємо:

$$\mathfrak{G}_{\text{мер}} = \frac{T_n}{c' \rho'} \cdot \frac{dP}{dT} = \frac{r \rho''}{c' \rho'}, \quad (19)$$

де $\mathfrak{G}_{\text{тер}}$ – термодинамічний параметр, який має сталі значення для заданої рідини і тиску.

Система диференціальних рівнянь, що описує процеси кипіння рідини в щілинних каналах, містить рівняння енергії для двофазного потоку, рівняння руху потоку зі змінним змістом фаз, рівняння нерозривності потоку, рівняння теплообміну в пристінному шарі рідини, умови невірноваженого процесу фазового перетворення, імовірність утворення парових пузирів у

центрах пароутворення і їхнього відриву, умови механічної взаємодії на границі розподілу фаз, масштаб пазирів, що відірвалися, не має точного аналітичного рішення. Тому для рішення сформульованої задачі, яка полягала в знаходженні залежності для розрахунку коефіцієнтів теплообміну при кипінні рідини у вертикальному щілинному каналі з шириною 8-10 мм, використано метод аналізу розмірностей, який використовують для рішення задач теплообміну. Залежність для визначення коефіцієнта теплообміну при випаровуванні рідини в каналі можна представити у вигляді:

$$\alpha = f(d_{\text{кв}}, t, r, \rho', c', \lambda', \mu', \nu', \sigma, q, e^{\vartheta_{\text{мер}}}, \omega). \quad (19)$$

Рівняння містить фізичні величини, що характеризують процес кипіння рідини в каналі. Цю залежність можна звести до безрозмірної форми, одержавши ряд критеріїв. З використанням методу аналізу розмірностей було отримане критеріальне рівняння для визначення числа Нусельта $Nu = \alpha d_e / \lambda$ у вигляді:

$$Nu = c Re^{n_1} \cdot (We'')^{n_2} \cdot \omega^{n_3} Pr^{0.4}, \quad (20)$$

де $Re = \frac{w \cdot d_e}{\nu}$ – число Рейнольдса; $We'' = \frac{g \rho'' \vartheta''^2 d_0}{\sigma}$ – число Вебера; $\omega = e^{\vartheta_{\text{мер}}}$ – імовірність

утворення парової фази, $\vartheta_{\text{мер}} = \frac{r \rho''}{c' \rho'}$ – термодинамічна величина, що характеризує процес випарювання рідини.

В рівнянні (20) коефіцієнти c, n_1, n_2, n_3 визначали експериментальним шляхом. З цією метою було розроблено методику і на експериментальному стенді в ВАТ „УкрНДІХімаш” виконано дослідження теплообмінних процесів у випарнику з гофрованими пластинами 0,5 Г з розмірами щілинних вертикальних каналів $d = 8-10$ мм. Тиск пари змінювали в діапазоні $P = 0,036-0,156$ МПа, а температура пари складала $t = 72-112$ °С. Визначали загальне та питоме теплове навантаження на випарник, яке змінювалось від 10,01 до 70,01 кВт/м². Визначили значення коефіцієнтів теплообміну при кипінні в каналі і значення коефіцієнтів теплопередачі в досліджуваному діапазоні параметрів.

У результаті обробки і аналізу експериментальних даних з урахуванням того, що імовірність утворення парової фази $\omega = e^{\vartheta_{\text{мер}}}$, було знайдено нові коефіцієнти і показники степеня в критеріальному рівнянні, що описує теплообмін при випарюванні рідини у вертикальному гофрованому каналі:

$$Nu = 50,2 \cdot Re^{0,115(\vartheta_{\text{тер}})^{-0,1}} \cdot We^{0,055(\vartheta_{\text{тер}})^{-0,1}} \cdot (e^{\vartheta_{\text{тер}}})^2 \cdot Pr^{0,4}. \quad (21)$$

По розробленій методиці було оброблено експериментальні дані дослідження процесів випарювання рідини у вертикальному щілинному плоскому каналі, які було виконано в

ВАТ“УкрНДІХімаш”. Для плоских пластин отримано критеріальне рівняння аналогічне рівнянню (21), але з іншим значенням коефіцієнта $c=35,5$.

Критеріальні рівняння дійсні для пластин досліджуваного профілю в діапазоні зміни режимних параметрів: $q=5-70$ кВт/м²; $P=0,036-0,16$ МПа. Максимальний рівень похибки при розрахунку коефіцієнтів теплообміну по отриманим залежностям рівнянням склав 16-18%. На рис. 17 показана залежність коефіцієнта теплопередачі від питомого теплового навантаження q при кипінні рідини у вертикальному щілинному каналі теплообмінника при різному тиску.

Таким чином, на основі дослідження закономірностей тепломасопереносу в каналах для використання теплового потенціалу пари СВО та інших вторинних енергоресурсів у якості теплоутилізатора-випарника було рекомендовано використати ширококанальний теплообмінник з гофрованою пластиною, що характеризується високою інтенсивністю теплообміну.

В дисертації розглянуто перспективні напрямки енерготехнологічного комбінування на основі ширококорозповсюджених ванних скловарних печей безперервної дії.

На сучасному етапі значну роль у рішенні задач раціонального використання ресурсів і енергозбереження мають розробки, що пов'язані з енерготехнологічним комбінуванням, яке дозволяє одночасно, поряд з склом, виробляти пару, теплову енергію, стиснене повітря та електроенергію, які широко використовуються промисловими підприємствами.

Існують рекомендації щодо багатоступеневого використання теплоти газів, що відходять, шляхом установки окрім традиційних теплообмінників для підігріву повітря горіння інших агрегатів для підігріву палива, шихти і склобою, водяних економайзерів, котлів-утилізаторів і парових турбін. Але реалізація таких схем в даний час стримується їх високою вартістю і тривалим терміном окупності.

Стосовно скловарних печей при рішенні конкретних задач, пов'язаних з енерготехнологічним комбінуванням, необхідно вирішувати проблему підвищення стійкості стін варильного басейну скловарної печі. Прикладом такого комплексного підходу було створення промислового енерготехнологічного комплексу для виробництва скла і водяної пари з використанням СВО (рис. 18). Як вказувалось, застосування СВО забезпечило підвищення стійкості вогнетривкої кладки ванни печі, значну економію електроенергії та витрати палива на опалення скловарної печі до 15%.

В випадку використання на підприємстві теплового потенціалу водяної пари СВО в кількості D_n може бути отримана додаткова економія палива:

$$\Delta B_n = \frac{D_n \cdot \rho_n - I_{к-}}{Q_n^c \cdot \eta_k}, \quad (22)$$

де I_p , I_k – ентальпія насиченої пари і конденсату, Q_n^c – теплота згоряння палива, η_k – ККД котла.

Встановлено, що використання пари СВО у кількості $D_p=0,5$ т/ч протягом опалювального сезону забезпечить економію природного газу до 166 тис. м³/рік. Річна економія електроенергії за рахунок відключення вентиляторів системи повітряного охолодження скловарної печі сягає близько 390 МВт год/рік. Одночасно, за рахунок зменшення витрати палива знизилася теплове забруднення довкілля, викиди CO₂ і NO_x. Окрім того, за рахунок установки охолоджуваних панелей зменшилася витрата вогнетривких матеріалів на кладку стін варильного басейну. Промислова експлуатація створеного комплексу показала ефективність його використання для ванних агрегатів при промисловому виробництві скла. Отримані на дослідно-промисловому агрегаті дані підтвердили результати виконаних теоретичних досліджень у цьому напрямку і були використані в подальшому для удосконалювання елементів систем охолодження.

Було запропоновано ряд рішень щодо використання комбінованого випарного та водяного охолодження для ванни скловарних печей. Одним із рішень, є розробки, що забезпечують утилізацію витрат теплоти зовнішньої поверхні стін варильного басейну шляхом додаткового водяного охолодження зовнішньої поверхні панелей для одержання гарячої води (рис. 19). Це дозволяє знизити температуру поверхні і одночасно більш повно використати теплоту, що відводиться від поверхні огороження басейну на технологічні потреби підприємства, що також заощаджує паливо.

Розроблено оригінальну схему комбінованої системи охолодження стін варильного басейну скловарної печі, де відведена гаряча вода надходить у двухсекційний бак-акумулятор для нагрівання бою скла. Для цієї схеми виконані теплотехнічні розрахунки по використанню удосконалених елементів системи водяного охолодження при тепловому навантаженні, яке забезпечує можливість утилізувати теплові втрати для можливих режимів роботи печі.

Розглянуто перспективний напрямок утилізації теплоти в теплоенергетичних установках скляного виробництва з використання металогідридної технології. Проведено термодинамічний аналіз циклів теплоенергетичної установки на базі термосорбційного компресора, визначено параметри процесів та умови, що забезпечують отримання максимальної ефективності утилізації. Встановлено, що конструктивні особливості і технічні характеристики метало гідридних систем визначаються рядом рішень, що включають вибір металогідриду, розробку конструкцій вузлів, визначення оптимальних режимів роботи, що пов'язано з взаємодією гідридоутворюючого матеріалу з воднем.

Результати досліджень засвідчили, що енерготехнологічне комбінування надає можливість використати на технологічні потреби скляного виробництва додаткову кількість теплової і електричної енергії. Це дозволить забезпечити реальну економію палива, знизити рівень теплового

забруднення навколишнього середовища і зменшити викиди CO₂ і NO_x. За результатами розробок отримано авторське свідоцтво СРСР, патент Російської Федерації і три патенти України.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та новий підхід до рішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення енергоефективності промислових технологічних агрегатів для виробництва скла. Рішення даної проблеми пов'язано з розробкою і удосконаленням теплотехнологічних систем і енергозберігаючого обладнання регенеративних печей ванного типу, які формують технічну базу промислового виробництва скла. Теоретично обґрунтована і експериментально доведена реальна можливість економії енергетичних та матеріальних ресурсів. За результатами досліджень зроблені наступні висновки:

1. Обґрунтовано необхідність проведення досліджень, з використанням положень системного аналізу вперше сформульовано методологічний підхід до рішення комплексу актуальних задач енергозбереження у високотемпературних теплотехнологічних агрегатах ванного типу в промисловому виробництві скла. Виділено рівні ієрархії та внутрішні зв'язки з урахуванням основних стадій теплотехнології виробництва скла в агрегатах ванного типу, що дало можливість визначити пріоритетні напрямки енергозбереження.

2. Розширено область використання методів математичного моделювання для розрахунків параметричних характеристик і діагностики режимів роботи агрегатів ванного типу шляхом створення уточнених математичних моделей, які більш повно враховують реальні умови експлуатації агрегатів при виробництві скла:

- з використанням зонального методу створено математичну модель для дослідження променистого теплообміну при зміні режимних і геометричних параметрів факелу у варильній зоні скловарної печі;

- з урахуванням динаміки руйнування вогнетривкої кладки на основі методу кінцевих елементів розроблено математична модель для розрахунку і діагностики теплових режимів парогенеруючих елементів СВО ванної печі;

- розроблено математичну модель для оцінки ефективності роботи системи генерації теплової енергії з урахуванням особливостей експлуатації скловарних печей;

- запропонована і реалізована оригінальна методика розрахунку періоду стійкості і теплового стану вогнетривкої кладки варильного басейну із використанням залежності швидкості корозії і урахуванням інтенсивності повітряного охолодження.

3. Шляхом проведення чисельного експерименту визначено вплив зміни параметрів факелу на теплообмін випромінюванням у робочому просторі печі. Встановлено, що найбільший вплив на теплові процеси в варильній зоні має ширина і температура факелу. При підвищенні температури

факелу з 1500 до 1650°C і зміні ширини факелу в діапазоні $0.75 \leq r/r_{max} \leq 1$ доля теплового потоку, що падає на ванну, може збільшитися на 5,6-7,0 %. Розроблена і впроваджена на промисловому агрегаті конструкція пальника з регульованими розмірами факелу за рахунок подачі стислого повітря. Промислові випробування на діючій печі показали можливість регулювання довжини факелу до 20% при поліпшенні умов сумішоутворення і взаємодії факелу з розплавом скла, отримано економію природного газу на рівні 5-7%, збільшено термін експлуатації пальників.

5. Встановлено реальну можливість підвищення ефективності роботи системи регенеративного нагрівання повітря горіння. Визначено вплив зміни режимних параметрів регенератора на температурний режим печі і економію палива. Встановлено, що підвищення температури димових газів на вході в насадку на кожні 50°C забезпечує приріст температури нагріву повітря на 30 °C, тоді як попередній нагрів повітря перед регенератором дає приріст температури тільки на 13 °C. На основі промислових випробувань скловарної печі розроблено з урахуванням технологічних особливостей скловаріння практичні рекомендації з підвищення ефективності роботи регенераторів.

6. Представлено науково-технічне обґрунтування використання для скловарних печей СВО, виконано діагностику теплового стану парогенеруючих елементів, знайдено максимальний рівень температур при умові моделювання їх роботи з урахуванням руйнування вогнетривкої кладки варильного басейну печі. Запропоновано технічні рішення і заходи для розробки та впровадження випарного охолодження для ванних скловарних печей безперервної дії.

7. Створено оригінальну дослідно-промислову установку з випарним охолодженням варильного басейну, на якій вперше відпрацьовано технологічні питання виготовлення, монтажу і експлуатації СВО з плоскими панелями та парогенеруючими екранами із сталевих труб. Експериментально підтверджено практичну доцільність і теплотехнічну ефективність використання СВО для скловарних печей. В результаті цього досягнуто підвищення стійкості варильного басейну, поліпшена маневреність агрегату. Зменшено витрату палива в середньому до 15%, зменшено витрату вогнетривів, досягнуто економію електроенергії в шість разів, встановлено можливість додаткової економії палива за рахунок використання пари СВО на потреби підприємства.

8. Шляхом теоретичних і експериментальних досліджень встановлено закономірності процесів теплообміну у ширококанальному випарнику пластинчатого типу, отримані нові критеріальні залежності для розрахунку коефіцієнтів теплообміну при використанні гофрованих і плоских пластин. Встановлено, що випарники з збільшеною шириною каналу до 8-10 мм є працездатними в діапазоні тиску грючої пари $P=0,036-0,16$ МПа. Вони мають рівень коефіцієнтів теплопередачі на 35–40% вищий, ніж традиційні випарники, що свідчить про доцільність їх використання для утилізації теплової енергії пари СВО.

9. З використанням уточненої методики розрахунку стійкості корозійного руйнування вогнетривів визначено вплив режимних параметрів на тривалість кампанії печі, визначено закон зміни оптимальних параметричних характеристик систем повітряного охолодження басейну за умови мінімізації експлуатаційних витрат для різних способів охолодження. Теоретично обгрунтовані оптимальні режими повітряного охолодження, показано переваги струминно-канального охолодження, що забезпечує збільшення міжремонтного періоду печі.

10. Розглянуто перспективні напрямки енерготехнологічного комбінування на основі скловарних печей з метою підвищення ефективності використання потенціалу палива, підвищення ККД установок. Розроблено оригінальні рішення по вдосконаленню конструктивних елементів систем випарного охолодження агрегатів, що підтверджено отриманими патентами. Також розглянута можливість використання теплоутилізаційних металогідридних установок в теплових схемах скляного виробництва. Встановлено, що шляхом енерготехнологічного комбінування можливо реально зменшити витрату палива, електроенергії при виконанні основних технологічних умов процесів скловаріння.

11. В результаті виконаних в дисертаційній роботі досліджень вирішена важлива прикладна науково-технічна проблема підвищення енергоефективності промислових агрегатів та систем скляного виробництва шляхом удосконалення теплофізичних процесів і теплоенергетичного обладнання. Результати розробки є актуальними для удосконалення існуючого і створення нового теплотехнологічного обладнання та систем керування технологічними режимами в скляному виробництві. Результати дисертаційної роботи впроваджені на ряді підприємств, в тому числі: на Мереп'янському склозаводі, на Московському кришталевому заводі, на ВАТ "СКЛЮ", в ДНДПМП „ДПРОСТАЛЬ” УкрНТЦ „ЕНЕРГОСТАЛЬ”, в ВАТ „УкрДНІХімаш”, в ТОВ „Завод газорозрядних ламп”. Матеріали дисертаційної роботи використовуються в учбовому процесі на кафедрі теплотехніки НТУ „ХП” при підготовці інженерів-теплоенергетиків.

Основний зміст дисертації опубліковано у працях:

1. Левченко Б.А., Акмен Р. Г., Братута Э.Г., Волков Б.И., Воробьев В.М., Ефимов А.В., Ильченко О.Т., Капустенко П.А., Кошельник В.М., Мацевитый Ю.М., Павловский В.Г., Переселков А.Р., Рухлинский В.В., Соловей В.В., Тарасенко Н.А., Товажнянский Л.Л., Филипьев О.В., Фокин Ф.С., Шевелев А.А., Шульгин Ю.В. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных предприятий: Учебное пособие. В 2 т. / Под. ред. Б.А. Левченко. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Ч.1. – 387 с.

2. Левченко Б.А., Братута Э.Г., Ефимов А.В., Кошельник В.М., Соловей В.В., Тарасенко Н.А., Филипьев О.В., Шевелев А.А. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных

предприятий: Учебное пособие. В 2 т. / Под. ред. Б.А. Левченко. – Харьков: Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2000. – Ч.2. – 333 с.

3. Соловей В.В., Кошельник В.М., Ивановский А.И., Алексахин А.А. Способы улучшения теплотехнических показателей металлургических установок // Вопросы атомной науки и техники. – 1989. – Вып.1. – С.88 – 90.

4. Соловей В.В., Кошельник В.М., Алексахин А.А., Ена С.В. Анализ процессов теплопереноса в орбренном металлургическом модуле // Энергетическое машиностроение. – 1992. – Вып.52. – С. 56 – 61.

5. Кошельник В.М., Долженко Е.Ю., Кошельник А.В., Ивановский А.Ю. Экономическая эффективность внедрения энергосберегающих мероприятий для стекловаренных печей // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 13.– С. 33 – 36.

6. Кошельник В.М., Филиппев О.В., Кошельник А.В. О возможности применения опыта испарительного охлаждения металлургических агрегатов для стекловаренных печей // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ.– 1998. – Вып. 16. – С. 165 – 168.

7. Кошельник В.М., Тарасов А.И., Жуков Ю.М., Кошельник А.В. Исследование теплового состояния конструкций огнетехнических установок методом конечных элементов // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 36. – С. 3 – 8.

8. Кошельник О.В., Родіонова Т.Ф., Кошельник В.М. Математичне моделювання променистого теплообміну в скловарних печах на основі зонального методу // Вісник Державного університету „Львівська політехніка”. – Львів. – 1999. – № 2. – С. 97 – 100.

9. Кошельник В.М. Методика экспериментальных исследований теплового состояния элементов СИО ванн стекловаренных печей // Інтегровані технології та енергозбереження. – 1999. – №1. – С. 55 – 60.

10. Кошельник В.М. Экспериментальные исследования теплового состояния парогенерирующих панелей системы испарительного охлаждения стекловаренной печи // Інтегровані технології та енергозбереження. – 1999.– №3. – С.30 – 36.

11. Кошельник В.М., Долженко Е.Ю., Кошельник А.В., Киуила И.Г. Перспективные направления энерготехнологического комбинирования на основе стекловаренных печей // Інтегровані технології та енергозбереження.– 1999. – №2. – С. 31 – 39.

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

13. Кошельник В.М., Тарасенко М.О., Киуіла І.Г., Ковтун В.Б. Розробка та промислове впровадження на скловарній печі пальників з регульованою довжиною факелу // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ.– 2000. – Вып. 124. – С. 14 – 17.

14. Фокин В.С., Кошельник В.М., Збараз Л.И. К постановке и решению задачи переноса тепла при движении кипящих теплоносителей в щелевых каналах // Коммунальное хозяйство городов. – 2001. – Вып. 33. – С. 173 – 178.

15. Збараз Л.И., Кошельник В.М., Фокин В.С. Экспериментальные исследования кипения жидкости в щелевом канале пластинчатого теплообменника // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2001. – Вып. 15. – С. 86 – 94.

16. Фокин В.С., Кошельник В.М., Збараз Л.И. Особенности теплообмена при кипении жидкости в щелевых каналах // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2001. – № 7 – С. 261 – 266.

17. Кошельник В.М., Хавин В.Е., Хавина И.П. Расчет коррозионной стойкости огнеупоров варочного бассейна стекловаренной печи // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2002. – Т.12. – № 9. – С. 107 – 112.

18. Кошельник В.М., Хавин Е.В. Постановка задачи оптимизации режима охлаждения варочного бассейна стекловаренной печи // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2003. – Т.1. – №11. – С.73 – 78.

19. Кошельник В.М., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю. Исследование и разработка рекомендаций по повышению эффективности работы системы стекловаренная печь-регенератор // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2004. – №3. – С. 13 – 18.

20. Кошельник В.М., Селихов Ю.А., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю. Совершенствование конструктивных элементов системы охлаждения высокотемпературных агрегатов ванного типа // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2004. – №2. – С. 22 – 27.

21. Ефимов А.В., Долженко Е.Ю., Кошельник В.М., Кошельник А.В. Применение системного анализа при разработке энергосберегающих мероприятий при производстве стекломассы в реакторах ванного типа // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2004. – №33. – С.15 – 19.

22. Кошельник В.М., Селихов Ю.А., Кошельник О.В., Долженко О.Ю. Повышение энергоэкологических показателей высокотемпературных плавильных агрегатов на основе усовершенствования систем водяного охлаждения // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2004. – №4. – С. 51–56.

23. Мацевитый Ю. М., Кошельник В. М., Соловей В.В., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю. // Системный подход к решению задач энергосбережения в промышленных высокотемпературных теплотехнологических комплексах / Проблемы машиностроения. – 2004. – Т. 4. – №3 – 4. – С. 43 – 52.

24. Кошельник В.М., Хавин В.Е. Оценка точности модели коррозионного износа стеновых огнеупоров варочных бассейнов стекловаренных печей// Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2005. – Т. 1.– №52. – С.71 – 76.

25. Кошельник В.М., Кошельник А.В., Хавин В.Е. Оптимизация процессов струйно-воздушного охлаждения варочного бассейна реактора для производства стекломассы // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – 3/2(15). – С.115 – 121.

26. Соловей В.В., Кошельник В.М., Шмалько Ю.Ф., Кошельник А.В. Водород-гидридная техника и технология. Проблемы и перспективы // Экотехнологии и ресурсосбережение.– 2006. – №1. – С.31 – 37.

27. А.С. 1019188 СССР. Абсорбционная холодильная установка периодического действия / В.В. Соловей, В.А. Попович. Б.А. Левченко. В.М.Кошельник. – Оpubл. Б.И. – 1983. – № 19. – 4 с.

28. Патент № 2036169 Российской Федерации. Ванная стекловаренная печь / Зайцев Ю.С., Филиппев О.В., Кошельник В.М., Киуила И.Г.; Оpubл. Бюл. № 5. 1995. – 4 с.

29. Пат. 2003109378 України А 7 С03В5/237. Обладнання для охолодження регенераторів скловарних печей / Кошельник В.М., Селіхов Ю.А., Кошельник О.В.; Заявл.17.10.2003; Оpubл.15.11.2004, Бюл. № 11. – 4 с.

30. Пат. 20031212106 України А 7 С03В5/04. Ванна скловарної печі / Кошельник В.М., Селіхов Ю.А., Кошельник О.В., Долженко О.Ю. Заявл.27.08.2003; Оpubл. 15.12.2004, Бюл. №12. – 4 с.

31. Пат. 2003088002 України А С 03В5-/04. Ванна для скловарної печі / Кошельник В.М., Селіхов Ю.А., Кошельник О.В.; Заявл.23.12.2003; Оpubл. 17.01.2005, Бюл. №1. – 3с.

32. Кошельник В.М., Тарасенко Н.А., Павленко Н.С., Киуила И.Г. Интенсификация работы горелочных устройств ванн стекловаренных печей / Тез. докл. 3-й Всесоюзной НТК по проблемам энергетики теплотехнологии “Интенсивное энергосбережение в промышленной теплотехнологии”. М.: МЭИ. – 1991. – С.160.

33. Кошельник В.М. Основные направления экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях стекольной промышленности.– Материалы 1 Украинской НТК „Проблемы инженерной экологии”. – Харьков: ХГПУ. – 1992. – С. 11 – 13.

34. Киуила И.Г., Кошельник В.М., Грицук Л.Д., Зайцев Ю.С., Филиппев О.В. Опыт применения испарительного охлаждения для стекловаренной печи на Мерефянском стекольном заводе. / Тезисы докл. Международного семинара НТО металлургов Украины “Научные основы конструирования металлургических печей: теплотехника и экология”. – Днепропетровск: Пороги. – 1993. – С. 20 – 21.

35. Кошельник В.М., Тарасенко Н.А. Температурный датчик для контроля за тепловым состоянием охлаждаемых панелей элементов ванн печей. – Труды международной науч.-техн. конференции „Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”.–

Харьков: ХГПУ. – 1996. – 64 с.

36. Кошельник В.М., Левченко Б.О., Кошельник А.В. Математическая модель регенератора стекловаренной печи с неподвижной огнеупорной насадкой // Труды международной науч.-техн. конференции „Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ. – 1997. – Ч. 2. – С. 108 – 111.

37. Кошельник В.М., Кошельник О.В., Долженко О.Ю. Розробка та впровадження енергозберігаючих заходів в теплотехнологію промислового виробництва скломаси // Тези доповіді міжнародної НТК „Енергоефективність – 2002”. – Київ: НАН України. – 2002. – С. 57 – 58.

38. Кошельник В.М. Выбор эффективных энергосберегающих мероприятий для стекловаренных печей на основе системного анализа // Тезисы докл. III международной конференции „Проблемы промышленной теплотехники”. Промышленная теплотехника. – Т. 25. – №4. – Киев: ИТТФ. – 2003. – С. 142 – 144.

39. Кошельник В.М., Селихов Ю.А., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю. Теплоутилизационный комплекс на основе системы охлаждения высокотемпературного агрегата ванного типа // Тезисы докл. IV международной конференции „Проблемы промышленной теплотехники”. – Киев: ИТТФ. – 2005. – С. 96 – 98.

АНОТАЦІЯ

Кошельник В. М. Енерго- та ресурсозбереження в промислових агрегатах скляного виробництва на основі удосконалення теплоенергетичного обладнання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика і промислова теплоенергетика. Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України: Харків, 2006.

Дисертація присвячена рішенню прикладної науково-технічної проблеми енерго- та ресурсозбереження в промисловому виробництві скла в агрегатах ванного типу. З використанням положень системного аналізу розроблено концепцію і методику досліджень, що спрямовані на удосконалення процесів, систем і теплоенергетичного обладнання з урахуванням технологічних особливостей виробництва скла.

Виконано теоретичні та експериментальні дослідження по підвищенню ефективності роботи скловарних печей шляхом комплексного вирішення задач ресурсозбереження, раціонального тепловикористання при умові підвищення стійкості елементів печі, збільшення терміну експлуатації. Розроблено і впроваджено енерго- та ресурсозберігаючі заходи по удосконаленню теплових режимів та конструкцій теплотехнічного обладнання скловарних печей, створення ефективних систем охолодження і генерації теплової енергії Відпрацьовано технологію використання випарного охолодження для ванних скловарних печей і представлені результати

випробувань дослідно-промислової установки. Підтверджена доцільність енерготехнологічного комбінування в промисловому виробництві скла. Результати дисертаційної роботи використані і впроваджені на ряді промислових підприємств, в науково-дослідних інститутах та використовуються в учбовому процесі при підготовці інженерних та наукових кадрів.

Ключові слова: виробництво скла, теплотехнологія, скловарні печі, моделювання, теплові режими, промислові випробування, енерго- та ресурсозбереження, ефективність.

Кошельник В. М. Энерго- и ресурсосбережение в промышленных агрегатах стекольного производства на основе усовершенствования теплоэнергетического оборудования. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.14.06–техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины: Харьков, 2006.

Диссертация посвящена решению актуальной прикладной научно-технической проблемы энерго- и ресурсосбережения в промышленном производстве стекла. С использованием основных положений системного анализа изучены и проанализированы теплотехнологические особенности стекольного производства. Разработана концепция и общая методология проведения исследований, реализация которых направлена на усовершенствование процессов, систем и теплоэнергетического оборудования промышленных агрегатов с учетом технологических особенностей стекольного производства. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по повышению эффективности работы стекловаренных печей путем комплексного решения задач ресурсосбережения, рационального энерго- и теплоиспользования при условии повышения стойкости элементов печи, увеличении сроков межремонтного периода.

Разработаны алгоритмы и уточненные математические модели для исследования тепловых режимов элементов печей, динамики разрушения огнеупоров с учетом характерных особенностей производства стекломассы в агрегатах ванного типа. Выполнены исследования лучистого теплообмена в варочной зоне, разработаны рекомендации по совершенствованию работы горелочных устройств. Исследовано влияние регенеративного подогрева воздуха горения на работу агрегата. Экспериментальные исследования подтвердили реальную возможность экономии природного газа в промышленных стекловаренных печах путем совершенствования конструкций горелок и режимов работы системы регенеративного подогрева воздуха.

Отработана технология использования испарительного охлаждения с плоскими панелями и трубчатыми экранами для ваннных стекловаренных печей при создании опытно-промышленной установки. Экспериментальные исследования показали, что при работе печи с испарительным охлаждением варочного бассейна повысилась стойкость ограждения варочной зоны печи, снизился расход топлива, получена экономия электроэнергии и огнеупорных материалов.

Разработана уточненная математическая модель износа огнеупоров, которая была использована для проведения оптимизационных расчетов воздушных способов охлаждения, установлен характер оптимальной зависимости скорости и расхода воздуха за кампанию печи при условии минимизации приведенных затрат на эксплуатацию системы воздушного охлаждения.

Установлены закономерности теплообмена в ширококанальном испарителе пластинчатого типа в диапазоне параметров, соответствующих режимам работы систем испарительного охлаждения. Получены новые критериальные уравнения, которые описывают теплообмен в гофрированных и плоских вертикальных каналах шириной 8-10 мм при кипении жидкости. Установлено влияние тепловой нагрузки на интенсивность теплообмена.

Применительно к стекловаренным печам исследованы вопросы энерготехнологического комбинирования и представлены результаты исследований по совершенствованию систем охлаждения с целью энерго- и ресурсосбережения в промышленном производстве стекла.

Результаты диссертационной работы использованы и внедрены на ряде промышленных предприятий, в научно-исследовательских институтах и используются в учебном процессе при подготовке инженерных и научных кадров.

Ключевые слова: стекольное производство, теплотехнология, стекловаренные печи, моделирование, тепловые режимы, промышленные испытания, энерго- и ресурсосбережение, эффективность.

Koshelnik V.M. Power and Resources Saving in the Industrial Installations of Glass Production on the Basis of Heat Power Equipment Improvement. – Manuscript.

A dissertation for submitting for the scientific degree of Dr. 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, 2006.

The thesis is devoted to solving the applied scientific and technical problem of power and resources saving in the industrial production of glass in tank glass melting installations. Using the system analysis postulates the concept and the research technique directed to the processes, systems and heat power equipment of the industrial installations improvement, taking into account the glass production technology are worked out. Theoretical researches and experiments in the glass furnaces efficiency increase through the comprehensive resources saving and judicious heat energy consumption resulting the furnaces durability and service life elevation are carried out. Power and resources saving techniques in optimization of heating regimes and heat engineering equipment design of glass furnaces and in creation of the effective cooling and power generation systems are worked out and brought into practice. The results of the industrial tests of the installation on the basis of the tank glass melting furnace with evaporative cooling system are presented. The advantage of power techniques combining in the industrial glass production is

proved. The results obtained are used and brought into practice in the industrial factories, research institutes and in education of engineers and scientists.

Key words: glass production, heat power technology, glass melting furnaces, simulation, heating regimes, industrial tests, power and resources saving, effectiveness.

Підписано до друку 29.08.2006 р. Формат видання 60x90/16.

Гарнітура Таймс. Папір офсетний. Друк – ризографія.

Ум.-друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам.№ 695206

Надруковано у ФО-П Ізраїлев Є.М.

Свідоцтво № 04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10