

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

за тему Аналіз впливу радіаційних характеристик
покриїв на роботу напівпровідникових

Виконав: студент 2 курсу, групи ТЕ-18-1мг
спеціальності Теплоенергетика
(код і назва спеціальності)

освітньої програми Теплоенергетика
(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

А.О. Гапон

(ініціали та прізвище)

Керівник доц. к.т.н. І.А. Казаренко
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент доц. д-р Р.О. Нуров
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

культет енергетики, електроніки та інформаційних технологій
федра теплоенергетики та гідроенергетики
ень вищої освіти другий магістерський
ціальність 144 Теплоенергетика
(код та назва)
вітня програма Теплоенергетика
(код та назва)
ціальзація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____
« _____ » _____ 20 _____ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Ганону Андрію Олександрівну
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проекту) Аналіз впливу радіаційних
характеристик покриттів на роботу напівпровідникових
цифр

рівник роботи Назаренко Ірина Анатолівна,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

тверджені наказом ЗНУ від « 10 » вересня 2019 року № 1536-с

Строк подання студентом роботи _____


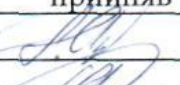
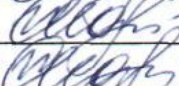



Вихідні дані до роботи Оброблений матеріал: шпалот ШН-5 ($Al_2O_3 - 32,29\%$);
температура пелі: 200°C; 300°C, 400°C, 500°C; досліджуване покриття:
дифракція заліза (Fe)

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
зробити) Загальна характеристика радіаційного теплообміну; Огляд
можливих з розробки покриттів, проведення дослідів та окребні результати

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Графік впливу температури на ширину спектра випромінювання; 2. Радіаційні характеристики
металічних бетонів; 3. Радіаційні характеристики керамічних бетонів;
4. Радіаційні характеристики хромітових бетонів; 5. Схема устаткування, 6. Результати дослідів

Консультанти розділів роботи _____

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Назаренко І.А. доц. к.т.н		
2	Назаренко І.А. доц. к.т.н		
3	Назаренко І.А. доц. к.т.н		

7 Дата видачі завдання 02 вересня 2019р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальна характеристика об'єкту дослідження	02-29.09.19	виконано
2	Дослідження міри горючості та горючості матеріалів	30.09-04.11.19	виконано
3	Охорона праці	05.11-22.11.19	виконано
4	Вистовки оформлення роботи	25.11.-24.12.19	виконано

Студент  (підпис) А.О. Гайди (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)  (підпис) І.А. Назаренко (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  (підпис) Каюков Ю.М. (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Гапон А.О. Аналіз впливу радіаційних характеристик покриттів на роботу нагрівальних печей

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник І.А. Назаренко. Запорізький національний університет. Інженерний інститут. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2020.

В роботі наведений огляд експериментів дослідників в області розробки покриттів з високою випромінювальною здатністю для теплових агрегатів. Представлені основні залежності, отримані в результаті цих дослідів. Розроблено експериментальний стенд для дослідження міри чорноти покриттів. Наведені результати експериментів з використанням сульфату заліза як зачорнюючого покриття на розробленому стенді при різних температурних режимах.

Ключові слова: РАДІАЦІЙНИЙ ТЕПЛООБМІН, ІНТЕГРАЛЬНА МІРА ЧОРНОТИ, СПЕКТРАЛЬНА МІРА ЧОРНОТИ, ЗАЧОРНЮЮЧІ ПОКРИТТЯ, ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА.

ABSTRACT

Hapon A.A. Analysis influence of radiation characteristics of coatings on heating furnaces operation.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in higher education by specialty 144 - Thermal Power Engineering, scientific supervisor I.A. Nazarenko. Zaporizhzhya National University. Engineering Institute. Faculty of Energy, Electronics and Information Technology, Department of Thermal Power Engineering and Hydropower Engineering, 2020.

The paper provides an overview of the experiments of the researchers in the field of high-emissivity coating for thermal power aggregates. The main dependencies obtained as a result of these experiments are presented. The experimental stand was developed to investigate the emissivity of coatings. The results of experiments using iron sulfate as a blackening coating on the developed stand at different temperature conditions are presented.

Keywords: RADIATION HEAT EXCHANGE, INTEGRAL EMISSIVITY, SPECTRAL EMISSIVITY, BLACKENING COATINGS, STEPHAN-BOLTSMAN LAW.

АННОТАЦИЯ

Гапон А.А. Анализ радиационных характеристик покрытий на работу печей

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель И.А. Назаренко. Запорожский национальный университет. Инженерный институт. Факультет энергетики, электроники и информационных технологий, кафедра теплоэнергетики и гидроэнергетики, 2020.

В работе приведен обзор экспериментов исследователей в области разработки покрытий с высокой излучательной способностью для тепловых агрегатов. Представлены основные зависимости, полученные в результате этих опытов. Разработан экспериментальный стенд для исследования степени черноты покрытий. Приведенные результаты экспериментов с использованием сульфата железа как зачерняющего покрытия на разработанном стенде при различных температурных режимах.

Ключевые слова: РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН, ИНТЕГРАЛЬНАЯ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ, СПЕКТРАЛЬНАЯ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ, ЗАЧЕРНЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ, ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1 Термодинамічні основи роботи нагрівальних печей	9
1.2 Теплообмін у робочій зоні печі	12
1.3 Радіаційний теплообмін у печах	16
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МІРИ ЧОРНОТИ ЗАЧОРНЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ	29
2.1 Аналіз праць дослідників у розробці покриттів	29
2.2 Обладнання та матеріали для дослідів	37
2.3 Проведення експерименту і схема установки	39
3 ОХОРОНА ПРАЦІ	48
3.1 Пожежна безпека при проведенні дослідів	48
3.2 Безпека при роботі з хімічними препаратами	53
3.3 Безпека при роботі з електроустановками	56
ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	63

ВСТУП

Актуальність роботи. Підвищення вартості різних видів палива та необхідність знижувати собівартість продукції металургійних підприємств викликає необхідність пошуку різних методів підвищення ефективності роботи металургійних печей та інших теплових агрегатів. Оскільки печі є високотемпературними агрегатами, домінуючу роль в їх тепловому режимі роботи відіграє променистий теплообмін. Тому одним з найвигідніших способів інтенсифікації теплообміну у печах є покращення радіаційних характеристик футеровки нанесенням на неї спеціальних покриттів.

Об'єкт дослідження – процеси радіаційного теплообміну у високотемпературних агрегатах.

Предмет дослідження – вплив нанесення зачорнюючого покриття на радіаційні характеристики вогнетривів.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- аналіз літературних джерел за тематикою досліджень;
- дослідження впливу різноманітних зачорнюючих покриттів на випромінювальну здатність вогнетривів;
- розробка лабораторного стенду для дослідження та випробовування зачорнюючи покриттів.

Методи та засоби дослідження. Поставлені задачі вирішувались шляхом проведення фізичного експерименту на основі розробленого лабораторного стенду. В роботі використані основні теоретичні положення і закони теплового випромінювання.

Наукова новизна отриманих результатів. Визначено вплив покриття шамотної цегли розчином сульфату заліза на його випромінюючу здатність.

Практична цінність роботи полягає в наступному – розроблена лабораторна установка для дослідження радіаційних характеристик зачорнюючи покриттів.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні дослідження, виконані безпосередньо автором спільно зі співробітниками Інженерного інституту Запорізького національного університету. Автору належать основні ідеї роботи, постановка завдання, обґрунтування основних припущень, теоретичні відомості та аналіз отриманих результатів експериментів і формулювання висновків за результатами проведених досліджень.

Апробація роботи. Матеріали роботи викладені на XXIII науково-технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів Запорізької державної інженерної академії «Енергетика, електроніка та інформаційні технології» (м. Запоріжжя, 2018).

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань з 45 позицій. Загальний обсяг складає 67 сторінок, у тому числі 17 ілюстрацій та 5 таблиць.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Термодинамічні основи роботи нагрівальних печей

В металургійному виробництві широко використовуються печі для нагріву та виплавки металу.

Піч - огорожене від навколишнього простору теплове технологічне обладнання, в якому відбувається генерація тепла з того чи іншого первинного виду енергії і передача тепла матеріалу, що піддається тепловій обробці в технологічних цілях (плавлення, нагрівання, сушіння, випалу і т.д.)

В основному їх класифікують за принципом теплогенерації та за призначенням і конструктивними ознаками.

Класифікація за принципом теплогенерації залежить від джерела отримання теплоти. Виділяють три типи таких джерел: хімічна енергія палива (паливні печі); хімічна енергія оброблювального матеріалу – металу або шихті; електрична енергія (електричні печі). Існують також і печі, в яких джерелом тепла виступає і хімічна енергія палива, і хімічна енергія рідкого металу. Яскравим прикладом такого симбіозу є мартенівські печі.

За технологічним принципом печі поділяють на плавильні і нагрівальні. Плавильні печі призначені для отримання сплавів з руд, і переплавки металу для надання йому необхідних властивостей. Нагрівальні ж печі використовують для випалу або сушки матеріалів, а також для надання матеріалу пластичності перед обробкою.

Основні елементи печей:

- робочий простір, що представляє собою камеру тієї чи іншої конфігурації, огорожену вогнетривкою футеровкою;
- пристрої, що забезпечують генерацію теплової енергії (топки, пальники, форсунки, електронагрівачі і т.д.);
- пристрої для відведення відпрацьованих газів (димові канали, запірні клапани, димові труби та ін.);

- пристрої для використання тепла відхідних газів (регенератори, рекуператори, котли-утилізатори і ін.);

- механічне обладнання (пристрої завантаження, транспортування і вивантаження матеріалу, відкриття і закриття робочих вікон і т.д.).

Піч як тепловий агрегат складається з двох зон: зони технологічного процесу (ЗТП) і зони генерації тепла (ЗГТ).

Температурний і тепловий режими, коефіцієнт корисного тепловикористання і продуктивність – найбільш важливі показники, що характеризують роботу печі.

У паливних печах у стані взаємного теплообміну знаходяться полум'я (розжарені гази), метал, кладка, що мають різну температуру. Температура усієї печі не визначається якимось одним з цих значень, а являє собою усереднену величину, стосовно якої зазвичай і використовують термін «температура печі».

Температура залежить від декількох факторів:

- температури горіння палива;
- характеру споживання тепла;
- теплових втрат, притаманних даній конструкції печі.

Орієнтовно визначити дійсну температуру печі T_d можна за наближеним співвідношенням

$$T_d = \eta T_k, \quad (1.1)$$

де T_k – калориметрична температура горіння палива;

η – пірометричний коефіцієнт, що залежить від конструкції печі та змінюється в межах 0,65...0,8.

Зміну температури печі з часом називають температурним режимом. Печі з постійною температурою – печі постійної дії (методичні печі). Печі, в яких температура змінюється з часом – печі періодичної дії.

Якщо температура печі у всьому об'ємі однакова – такі печі являються камерними. Якщо ж температура змінюється по довжині, така піч називається методичною.

Теплове навантаження печі – кількість тепла, що підводиться до печі в кожний момент часу. Зміна теплового навантаження в часі і є тепловий режим. Тепловий режим має пряму залежність від температурного режиму.

Залежно від характеру технологічного процесу і умов його здійснення (періодичний або безперервний) можливі різні поєднання температурного і теплового режимів:

- практично постійні в часі температурний і тепловий режими ($T_{п}(t) = \text{const}$, $Q_{Т.М.}(t) = \text{const}$) – печі безперервної дії, наприклад, методичні нагрівальні печі в сталому режимі;

- змінний температурний і постійний в часі тепловий режими ($T_{п}(t) \neq \text{const}$, $Q_{Т.М.}(t) = \text{const}$), наприклад, деякі камерні печі періодичної дії

- змінні в часі температурний і тепловий режими ($T_{п}(t) \neq \text{const}$, $Q_{Т.М.}(t) \neq \text{const}$), наприклад, нагрівальні колодязі для злитків.

- практично постійний в часі температурний і змінний тепловий режими ($T_{п}(t) = \text{const}$, $Q_{Т.М.}(t) \neq \text{const}$). Цей варіант зустрічається при несталому режимі роботи печей, наприклад, при зміні параметрів заготовок або продуктивності. Тоді система автоматичного управління підтримує задану температуру печі саме за рахунок зміни теплової потужності.

Аналіз роботи печей з точки зору термодинаміки дає можливість встановити деякі загальні положення, що характеризують підсумкові результати роботи печей, які, безумовно, повинні враховуватися при аналізі теплової роботи, розрахунку і конструювання нових печей.

Енергетична оцінка дозволяє судити про повноту використання енергії в даному тепловому агрегаті і нічого не говорить про працездатність переданої енергії, навпаки, ексергетична оцінка дозволяє судити про безповоротні втрати енергії і про якісну характеристику переданої енергії і не дозволяє судити про повноту використання енергії в цьому агрегаті.

При однаковій витраті енергії процес переносу тепла загалом тим ефективніше, чим вище температура середовища, що приймає тепло, оскільки при цьому знецінення енергії має менше значення. При однаковій ексергії гріючого середовища використання енергії в тепловому пристрої погіршується в міру збільшення необхідної з технологічних міркувань температури поверхні нагріву, тому є принципово неправильним зіставлення результатів роботи різнотипних теплових пристроїв. Чим вище необхідна температура поверхні нагрівання, тим вище повинна бути ексергія гріючого середовища і тим вище вимоги до якості палива і умов його спалювання. Навпаки, при низькій температурі поверхні нагрівання або середовища, що нагрівається, застосування гріючого середовища з високою ексергією недоцільно, так як все одно відбувається процес знецінення енергії.

Обмін теплом у печах залежить від багатьох факторів: способу підведення теплоти; характеру середовища, у якому протікає процес (нагрів з дефіцитом кисню, нагрів у середовищі інертних газів, продування киснем та ін.); властивостей огорожуючих конструкцій (випромінююча здатність, теплопровідність стін печі і т.д.); температури робочого простору (чим вище температура, тим більшого значення набуває радіаційна складова теплообміну); характеру руху газів у робочій камері печі. Роздивимося нижче особливості теплообміну у печах.

1.2 Теплообмін у робочій зоні печі

Теплообмін у металургійних печах являє собою досить складний процес, що складається з тепловіддачі випромінюванням і конвекцією. У високотемпературних печах, з температурою від 750 °С і вище, переважає променистий теплообмін. При температурі нижче 450 °С переважає конвекція. В проміжній області температур ці дві складові відіграють однаково важливу роль для теплообміну.

Великий вплив на теплообмін в нагрівальних полум'яних печах має взаємний характер руху розжарених газів (полум'я) і теплоспоживаючого металу. Тут можливі два випадки: рух теплоносіїв за прямотечею або протитечею. Протитечія є найбільш досконалою схемою взаємного руху теплоносіїв, оскільки холодний теплоносій може нагрітися до температури, що перевищує кінцеву температуру більш нагрітого теплоносія. Подібне становище при прямотечії неможливе.

У плавильних печах і печах для нагріву металу перед обробкою тиском переважним видом теплообміну є випромінювання. В металургійних печах його доля складає (60...100) %. В процесі передачі тепла випромінюванням в робочому просторі таких печей беруть участь три компоненти: полум'я (розпечені гази), кладка і матеріал, що нагрівається (проплавляється). Усім їм властиві свої температури і радіаційні характеристики.

Залежно від того, яка складова відіграє більшу роль в теплообміні існують радіаційні режими роботи печей і конвективні. Оскільки об'єкт дослідження даної роботи – саме променистий теплообмін, роздивимося основні радіаційні режими роботи.

Характер теплообміну в системі газ-кладка-метал може бути різним, оскільки і полум'я, і кладка, і матеріал, що нагрівається можуть мати різні температури, розміри і радіаційні характеристики.

Виділяють три основні радіаційні режими роботи: прямий направлений режим, непрямий направлений режим і рівномірно-розподілений режим.

1.2.1 Прямий направлений режим

Прямий направлений режим теплообміну можливий за умови, коли падаючий потік від полум'я на метал більше потоку, падаючого від полум'я на кладку.

Ця умова виконується, якщо високотемпературне полум'я, що сильно світиться, буде максимально наближене до поверхні нагрівання оброблюваного

матеріалу. При цьому шар газів, що розташовується між полум'ям і склепінням печі, як основний елемент кладки, буде поглинати частину теплового потоку і забезпечувати тим самим умови існування прямого направлено теплообміну. Створити таке полум'я, яке мало б несиметричний відносно осі полум'я розподіл температури і міри чорноти, доки ще практично неможливо, тому створення режиму прямого направлено теплообміну можливо лише одним шляхом – розміщенням полум'я в безпосередній близькості від теплоспоживаючої поверхні.

Для забезпечення такого режиму теплообміну необхідно використовувати паливо, що має високу температуру горіння і значну світність полум'я.

Для утримання полум'я в безпосередній близькості від поверхні нагрівання необхідно використовувати пристрої для спалювання палива, що забезпечують високі швидкості витікання палива і окислювача. В цих умовах полум'я має порівняно невелику товщину, тому висока випромінювальна здатність полум'я повинна створюватися і підтримуватися за рахунок відповідних радіаційних характеристик факела. При цьому режимі треба прагнути уникати зайвої циркуляції газів, оскільки може бути знижена швидкість руху газів в факелі і збільшений його поперечний розмір, що в свою чергу тягне порушення умов прямого направлено теплообміну.

1.2.2 Непрямий направлений режим

При режимі непрямого направлено теплообміну падаючий потік від полум'я на кладку більше потоку, падаючого від полум'я на метал. В даному випадку необхідно розвивати власне випромінювання кладки, прагнучи збільшити її ефективне випромінювання. Для цього потрібно, збільшити температуру кладки.

Непрямий направлений режим теплообміну можна отримати практично при будь-якому паливі, якщо забезпечити його методи дистанційного спалювання в безпосередній близькості від поверхні кладки. Найбільш доцільне

застосування такого режиму теплообміну при спалюванні бідного палива (суміші коксового і доменного газів), яке в умовах іншого режиму теплообміну не може забезпечити високу ефективність нагріву.

Непрямий направлений режим теплообміну може мати місце, коли випромінювання кладки грає вирішальну роль. Це досягається, перш за все, при стельовому опаленні, а також при газовому торцевому опаленні з використанням безполуменевий пальників і в нагрівальних електричних печах опору, заповнених променевопрозорим середовищем.

1.2.3 Рівномірно-розподілений режим

Однакове за величиною випромінювання полум'я на метал і кладку може мати місце при рівномірному або симетричному розподілі температури по висоті печі (рівномірно розподілений режим) за умови приблизно аналогічного зміни міри чорноти полум'я. Для створення такого режиму необхідно застосовувати таке паливо, яке при використанні відповідних методів спалювання може забезпечити значну величину міри чорноти полум'я, наприклад, мазут або природний газ.

Головним фактором, що впливає на радіаційні режими, є ступінь чорноти полум'я, оскільки визначає як випромінюючу, так і поглинальну здатність полум'я.

Для забезпечення рівномірно-розподіленого режиму теплообміну необхідно вибирати такий метод спалювання мазуту або природного газу, який забезпечує високі і рівномірні температуру і міру чорноти полум'я в робочому просторі. Подібний розподіл температури може бути досягнуто при розосередженому підводі палива і дуже розвиненою циркуляції газів в робочому об'ємі печі

1.3 Радіаційний теплообмін у печах

Оскільки домінуюча більшість печей в металургії є високотемпературними, радіаційна складова теплообміну відіграє важливу роль в ефективності роботи печі. Підвищити радіаційний теплообмін можна за рахунок міри чорноти матеріалу, полум'я чи кладки. Враховуючи те, що змінити міру чорноти матеріалу зазвичай неможливо, бо це може вплинути на його якість, а міра чорноти полум'я обмежується використанням паливом, доцільним заходом є збільшення міри чорноти кладки печі.

Роздивимося вплив зміни міри чорноти кладки на щільність теплового потоку від кладки до приймача тепла при наявності послаблюючого газового шару. Джерелом тепла виступають продукти згорання палива, тепловий потік від яких спрямований як на метал ($q_{\text{пг}}^{\text{М}}$), так і на кладку ($q_{\text{пг}}^{\text{К}}$).

Припустимо, що футеровка печі є адіабатною, тоді падаючий на неї від продуктів згорання тепловий потік частково відбивається (прямо пропорційно величині $(1 - \varepsilon_{\text{к}})$), а частково, після поглинання, виходить за рахунок власного випромінювання (пропорційно мірі чорноти кладки $\varepsilon_{\text{к}}$). Ці залежності можна записати у вигляді:

$$q_{\text{отр}} = q_{\text{пг}}^{\text{К}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{к}}); \quad (1.2)$$

$$q_{\text{соб}} = q_{\text{пг}}^{\text{К}} \cdot \varepsilon_{\text{к}}. \quad (1.3)$$

Відбитий кладкою тепловий потік приходиться на довжини хвиль смуг поглинання (і випромінювання) продуктів згорання. Тому цей тепловий потік буде послаблюватись газовим шаром, і до металу дійде частка, пропорційна $(1 - \varepsilon_{\text{г}})$, цьому відповідає наступна формула

$$q_{\text{отр}}^{\text{М}} = q_{\text{отр}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{г}}) = q_{\text{пг}}^{\text{К}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{к}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{г}}). \quad (1.4)$$

Тепловий потік власного випромінювання від футеровки розподіляється по всьому діапазону довжин хвиль, які припадають на довжини хвиль смуг

поглинання і вікон прозорості. Частина цього теплового потоку, що проходить крізь вікна прозорості, досягне металу, не послабляючись. Та частина, що буде припадати на смуги поглинання, буде послаблятися і до металу дійде частина, пропорційна величині $(1 - \varepsilon_{\Gamma})$.

Нехай частка власного випромінювання від футеровки, що припадає на спектр смуг поглинання газу буде прямо пропорційна мірі чорноти газу, а частка, що припадає на спектр вікон прозорості – прямо пропорційна $(1 - \varepsilon_{\Gamma})$, тоді отримаємо

$$q_{\text{соб}} = q_{\text{соб}} \cdot \varepsilon_{\Gamma} + q_{\text{соб}} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma}) = q_{\text{пг}}^{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\Gamma} + q_{\text{пг}}^{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma}). \quad (1.5)$$

Частка власного випромінювання кладки, що проходить через вікна прозорості

$$q_{\text{соб}}^{\text{ок-м}} = q_{\text{соб}} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma}) = q_{\text{пг}}^{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma}). \quad (1.6)$$

Частка власного випромінювання, що припадатиме на смуги поглинання буде рівна

$$q_{\text{соб}}^{\text{пол-м}} = q_{\text{пг}}^{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\text{к}} \cdot \varepsilon_{\Gamma} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma}). \quad (1.7)$$

Сумарний тепловий потік власного випромінювання кладки на поверхню металу після взаємодії з продуктами горіння складатиме

$$q_{\text{к}}^{\text{м}} = q_{\text{отр}}^{\text{м}} + q_{\text{соб}}^{\text{ок-м}} + q_{\text{соб}}^{\text{пол-м}} = q_{\text{пг}}^{\text{к}} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma}) \cdot (1 + \varepsilon_{\Gamma} \cdot \varepsilon_{\text{к}}). \quad (1.8)$$

Після перетворення можна визначити частку променистого теплового потоку випущеного продуктами згорання, що досягає поверхні металу після взаємодії з внутрішньою поверхнею адіабатної футеровки камери без урахування геометричних особливостей поверхонь теплообміну (кутового

коефіцієнту випромінювання з футеровки на метал, що нагрівається) за наступною формулою

$$\frac{q_K^M}{q_{\text{ПГ}}^K} = (1 - \varepsilon_{\Gamma})(1 + \varepsilon_{\Gamma} \cdot \varepsilon_K). \quad (1.9)$$

Керуючись результатами сучасних експериментів [43], розрахунки за цією формулою показують, що збільшення частки теплового потоку випромінюванням від продуктів згорання на поверхню металу після взаємодії з футеровкою при зміні її міри чорноти з 0,5 до 0,9 складатиме: 7,3 % при $\varepsilon_2 = 0,2$; 8,9 % при $\varepsilon_2 = 0,25$; 10,4 % при $\varepsilon_2 = 0,3$; 11,9 % при $\varepsilon_2 = 0,35$. Також із зростанням ε_2 зменшується значення $\left(\frac{q_K^M}{q_{\text{ПГ}}^K}\right)$ і кількість тепла, падаючого з кладки на поверхню металу.

Загальний тепловий потік до металу з урахуванням теплового потоку від продуктів згорання палива і кладки, а також кутових коефіцієнтів системи буде дорівнювати

$$\begin{aligned} q_M^{\text{заг}} &= q_K^M \cdot \varphi_{K-M} + q_{\text{ПГ}}^M \cdot \varphi_{\Gamma-M} = \\ &= q_{\text{ПГ}}^K \cdot \varphi_{K-M} \cdot [(1 - \varepsilon_{\Gamma}) \cdot (1 + \varepsilon_{\Gamma} \cdot \varepsilon_M)] + q_{\text{ПГ}}^M \cdot \varphi_{\Gamma-M}, \end{aligned} \quad (1.10)$$

де φ_{K-M} – кутовий коефіцієнт «кладка-метал»;

$\varphi_{\Gamma-M}$ – кутовий коефіцієнт «гази-метал» (приймаємо $\varphi_{\Gamma-M} = 1$).

При рівномірно розподіленому режимі теплообміну $\left(\frac{q_K^M}{q_{\text{ПГ}}^K} = 1\right)$

$$q_M^{\text{заг}} = q_{\text{ПГ}}^K \cdot [\varphi_{K-M} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma}) \cdot (1 + \varepsilon_{\Gamma} \cdot \varepsilon_M) + \varphi_{\Gamma-M}]. \quad (1.11)$$

Відношення загального променистого теплового потоку, що падає на метал від кладки і продуктів згорання палива, до теплового потоку від

продуктів згорання до кладки (відносний тепловий потік до металу), складатиме

$$\frac{q_M^{\text{заг}}}{q_{\text{ПГ}}^{\text{к}}} = \varphi_{\text{к-м}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{Г}}) \cdot (1 + \varepsilon_{\text{Г}} \cdot \varepsilon_{\text{М}}) + \varphi_{\text{Г-м}}. \quad (1.12)$$

Зростання відносного теплового потоку до металу при зміні степені чорноти кладки з 0,5 до 0,9 складе: 1,7 % при $\varepsilon_2 = 0,2$; 1,95 % при $\varepsilon_2 = 0,25$; 2,21 % при $\varepsilon_2 = 0,3$; 2,39 % при $\varepsilon_2 = 0,35$.

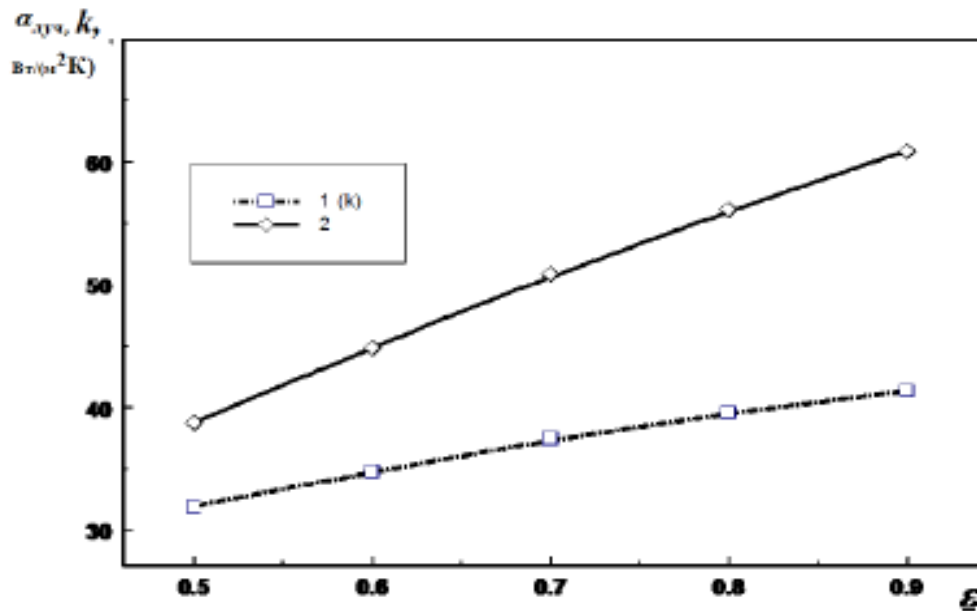
Підвищення міри чорноти внутрішньої поверхні кладки дозволяє збільшити тепловий потік до поверхні металу тільки від кладки, але це збільшення може становити, без урахування променистого потоку тепла від розжарених газів до металу, 11,9 %. Збільшення відносного теплового потоку до металу складатиме лише 2,39 %.

При непрямо направленому радіаційному режимі роль кладки у теплообміні зростає, так як $\left(\frac{q_{\text{к}}^{\text{м}}}{q_{\text{ПГ}}^{\text{к}}} \right) > 1$. Як наслідок цього збільшується і вплив збільшення степені кладки на відносний тепловий потік до металу. Наприклад при $\left(\frac{q_{\text{к}}^{\text{м}}}{q_{\text{ПГ}}^{\text{к}}} \right) = 2$ значення відносного теплового потоку до металу при зміні степені чорноти з 0,5 до 0,9, становитиме 4 % замість 2,39 % при рівномірно розподіленому режимі.

Інше дослідження доцента МДТУ ім. Н.Е. Баумана Чернова В.В. та старшого викладача МДМУ Кленіної О.В. у 2015 році описує вплив міри чорноти на променистий теплообмін теплових агрегатів [1]. У даному дослідженні з метою проведення кількісної оцінки ефективності використання покриттів з високою мірою чорноти на трубчатих радіаційних рекуператорах була розроблена програма для розрахунків параметрів їх роботи.

Користуючись цією програмою були проведені розрахунки параметрів роботи трубчатого радіаційного рекуператора для методичної підігрівальної печі сортопрокатного цеху. В печі спостерігалась температура продуктів згорання палива на рівні 900 °С. При збільшенні міри чорноти труб

рекуператора з 0,5 до 0,9 виявлено збільшення коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням від розжарених газів на 57 %, а загального коефіцієнту теплопередачі на 30 %. Ця залежність показана на рисунку 1.1.



Рисунку 1.1 - Залежність коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням (2) від продуктів згорання до труб рекуператора та коефіцієнта теплопередачі в рекуператорі (1) від степені чорноти труб

Дослідження також проводились для струменевого рекуператора секційної печі при температурі продуктів згорання на виході з робочої зони близько 1450 °С. Температура підігрітого повітря при мірі чорноти теплосприймаючої стінки $\epsilon = 0,6$ дорівнювала 538 °С. Збільшення міри чорноти поверхні стінки до 0,8, при незмінних інших параметрах, призвело до інтенсифікації теплообміну. Для порівняльного аналізу у таблиці 1.1 викладені значення деяких параметрів роботи рекуператора при $\epsilon = 0,6$ і $\epsilon = 0,8$.

Проаналізувавши дані таблиці можна зробити висновок, що збільшення міри чорноти стінок труб рекуператора з боку продуктів згорання дає наступні ефекти:

- коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від розжарених газів до стінок труб зростає на 24,5 %;
- тепловий потік від продуктів згорання до повітря в трубках збільшився на 10,8 %;
- температура підігрітого повітря в рекуператорі збільшується на 8,6 %.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика роботи струменевого рекуператора при змінній степені чорноти його стінок

Параметри	Степінь чорноти стінки	
	0,6	0,8
Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від продуктів згорання до стінки, Вт/(м ² ·К)	118,2	147,1
Сумарний коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання, Вт/(м ² ·К)	122,2	151,1
Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·К)	66,6	74,7
Тепловий потік від продуктів згорання до повітря, кВт/м ²	79,9	89,6
Температура підігріву повітря, °С	538	584

Розглянуті вище дослідження доводять доцільність збільшення міри чорноти для інтенсифікації теплообміну в теплових агрегатах. Але при модернізації поверхонь теплообміну треба звертати велику увагу на модель теплообміну.

Дослідники Великодний В.А. і Пікашов В.С [2], систематизувавши свої дослідження зобразили найтипівіші моделі теплообміну у печах та вплив зміни радіаційних характеристик кладки на ефективність теплообміну. Ці моделі зображені на рисунку 1.2.

На рисунку: $q_{\text{тепл}}$ – підведення (відведення) теплоти теплопровідністю; $q_{\text{пот}}$ – втрати теплоти теплопровідністю; $q_{\text{вн}}$ – внутрішнє виділення теплоти; $q_{\text{кон}}$ – конвективний тепловий потік; штрихові лінії E_c – сіре випромінювання; $E_{\text{л}}$ – селективне випромінювання; суцільні – теплопровідність; індекси «пад» -

падаюче, «эф» - ефективне випромінювання; T_K , T'_K – температури кладки внутрішньої і зовнішньої поверхонь.

За видом теплообміну з випромінюючої сторони можна виділити випадки чисто радіаційного теплообміну і радіаційно-конвективного. За селективністю випромінювання розрізняють моделі, в яких падаюче і ефективне випромінювання вважається сірим, і моделі, в яких враховується селективність падаючого, ефективного і власного випромінювання поверхні.

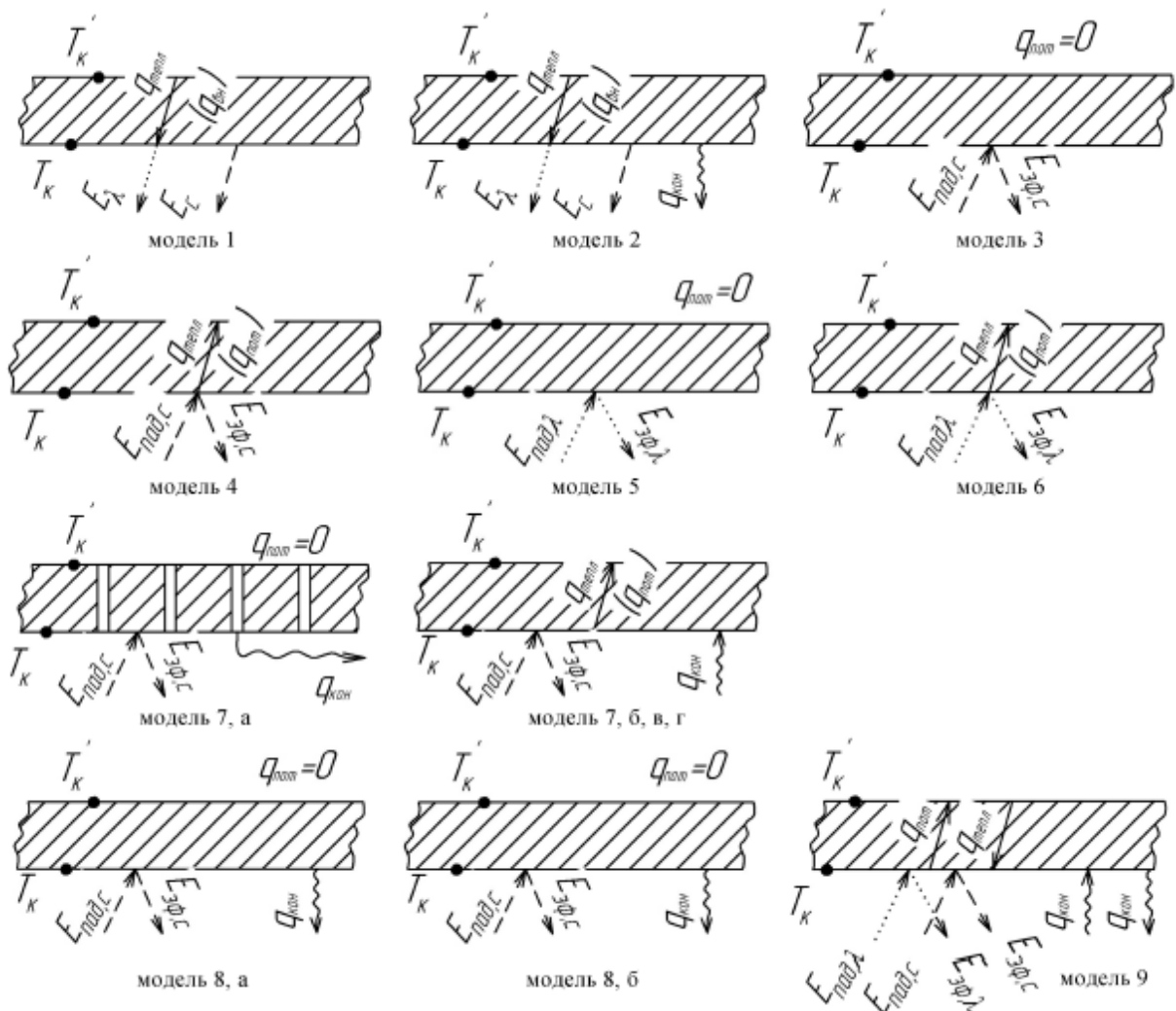


Рисунок 1.2 – Типові моделі теплообміну у металургійних печах

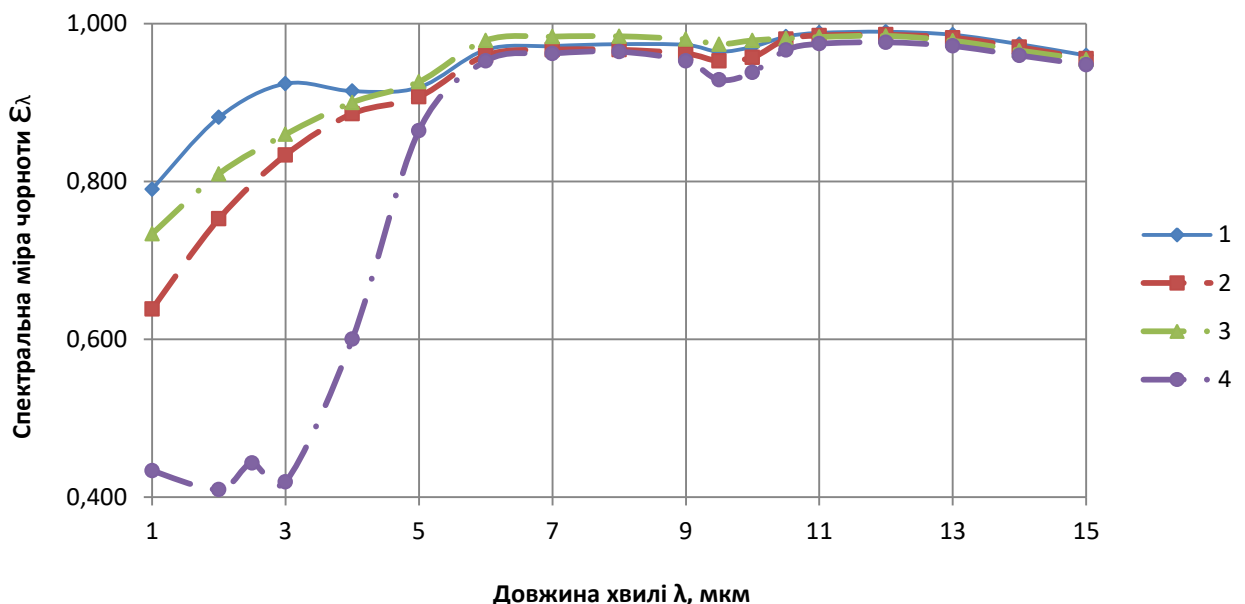
Інформація щодо впливу підвищення випромінюючої здатності кладки на процес теплообміну зібрана у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Вплив міри чорноти кладки на теплообмін у металургійних

печач

№	Підведення теплоти	Вид теплообміну	Селективність випромінювання	Ефективність	Практична реалізація
1	$T_k < T'_k$	радіаційний	сіре або селективне	підвищує	електропіч опору, радіатор, газова радіаційна труба
2	$T_k < T'_k$	радіаційно-конвективний	сіре або селективне	підвищує	радіаційні сушильні установки
3	$T_k \geq T'_k$	радіаційний	сіре	не впливає	полум'яні печі з доброю теплоізоляцією, що працюють у чисто радіаційному режимі (прямого направлено і рівномірно розподіленого теплообміну)
4	$T_k \geq T'_k$	радіаційний	сіре	знижує	полум'яні печі з поганою теплоізоляцією, або ті, що навмисно охолоджуються
5	$T_k \geq T'_k$	радіаційний	селективне	підвищує	полум'яні печі, що працюють в режимі чисто радіаційного нагрівання (непрямого направлено і рівномірно розподіленого)
6	$T_k \geq T'_k$	радіаційний	селективне	підвищує або знижує	полум'яні печі, що працюють в режимі чисто радіаційного нагрівання (непрямого направлено і рівномірно розподіленого)
7	$T_k \geq T'_k$	радіаційно-конвективний	сіре	а)підвищує б)підвищує в)не впливає г)знижує	а) випромінюючі пальники с перфорованою решіткою, сіткою, пористою керамікою; б) полум'яні печі з непрямим радіаційно-конвективним режимом теплообміну, нагрівальні печі з плоско факельними або струменевими пальниками; в) печі з радіаційними режимами роботи; г) високо-температурні печі із зовнішнім охолодженням кладки: мартенівські, стекловарні та ін.
8	$T_k \geq T'_k$	радіаційно-конвективний	сіре	а)знижує б)знижує	а) камери згорання з ефузіонним охолодженням, полум'яні печі в режимі прямого направлено теплообміну, відбивальні печі
9	$T_k < T'_k$ $T_k \geq T'_k$	радіаційно-конвективний	сіре або селективне	-	-

В роботі Сєрова В.В., Кузнецової Н.П. та Кривандіна В.А. [44] досліджено також залежність радіаційних характеристик вогнетривів в залежності від їх терміну служби (рисунок 1.3). Досліди показали, що нові вогнетриви мають доволі низьку спектральну міру чорноти в діапазоні коротких хвиль (1-4 мкм). Але зі збільшенням строку служби спектральна міра чорноти в цьому діапазоні суттєво збільшується. Таким чином після двох років експлуатації міра чорноти у діапазоні усіх довжин хвиль має приблизно однакове значення.

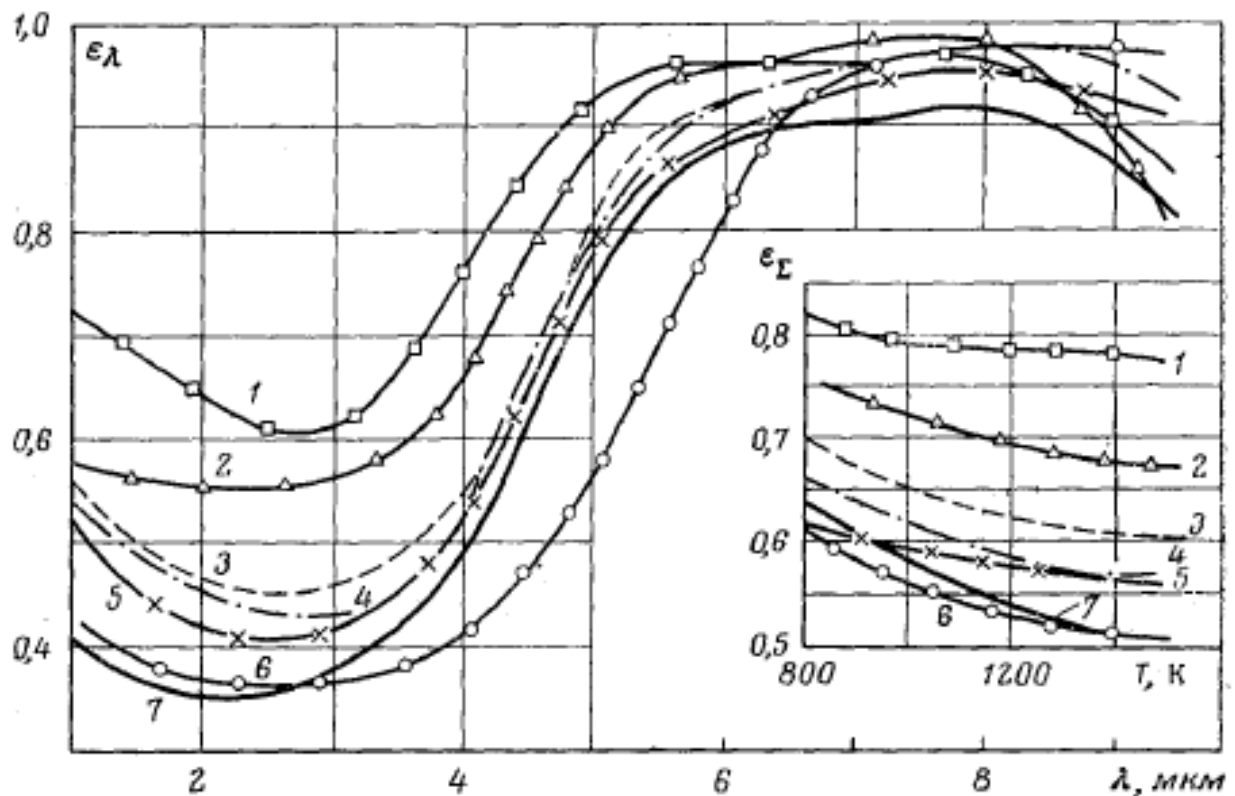


1, 2 – високоглиноземний після 2,5 років і 8 місяців служби відповідно;
3 – шамотний після року служби; 4 – новий вогнетрив.

Рисунок 1.3 – Залежність спектральної міри чорноти вогнетривів від терміну служби

Такий процес зумовлений тим, що під час роботи печі поверхня кладки змінює свій вигляд під дією атмосфери робочого простору. Так, наприклад, деякі вогнетриви після року служби мають на поверхні шар товщиною 5 мм коричневого кольору, а після двох років – 10 мм чорного кольору.

Дослідження Майструкова Б.С., Шутова О.П. і Кузнецова М.П. [13] про радіаційні характеристики вогнетривких бетонів також підтверджують, що спектральна міра чорноти інших вогнетривків в діапазоні коротких хвиль являється набагато нижчою. У їх роботі були досліджені динасовий бетон, шамотні бетони, високо глиноземний бетон, магнезитові бетони, бетони з кремнеземними і алюмосилікатними заповнювачами та хромітові бетони. Дані їх експериментів, а саме спектральна і інтегральна міри чорноти зображені на рисунках 1.4 – 1.8.



1 - динасовий бетон (рідке скло + Na_2SiF_6); 2 - шамотний бетон (рідке скло + портландцемент); 3 - шамотний бетон (рідке скло + сієніт шлам); 4 - шамотний бетон (портландцемент); 5 - шамотний бетон (глиноземний цемент); 6 - високоглиноземний бетон (глиноземний цемент); 7 - шамотний бетон (рідке скло + Na_2SiF_6)

Рисунок 1.4 – Радіаційні характеристики вогнетривких бетонів з кремнеземистим і алюмосилікатних наповнювачами в повітряному середовищі

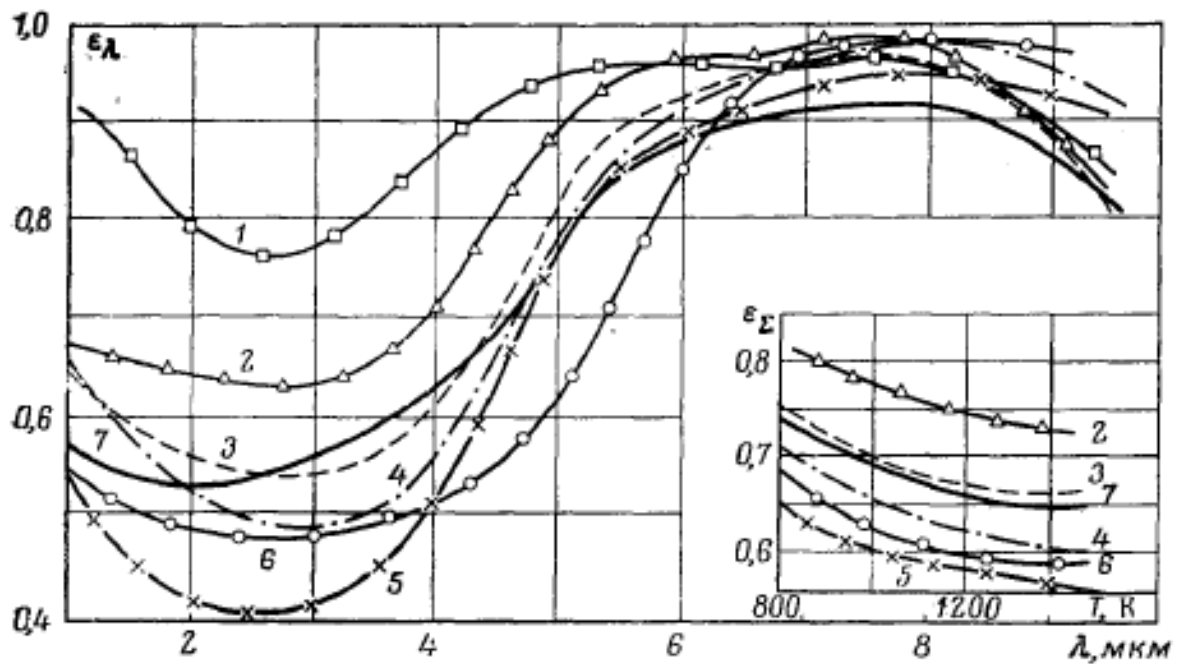
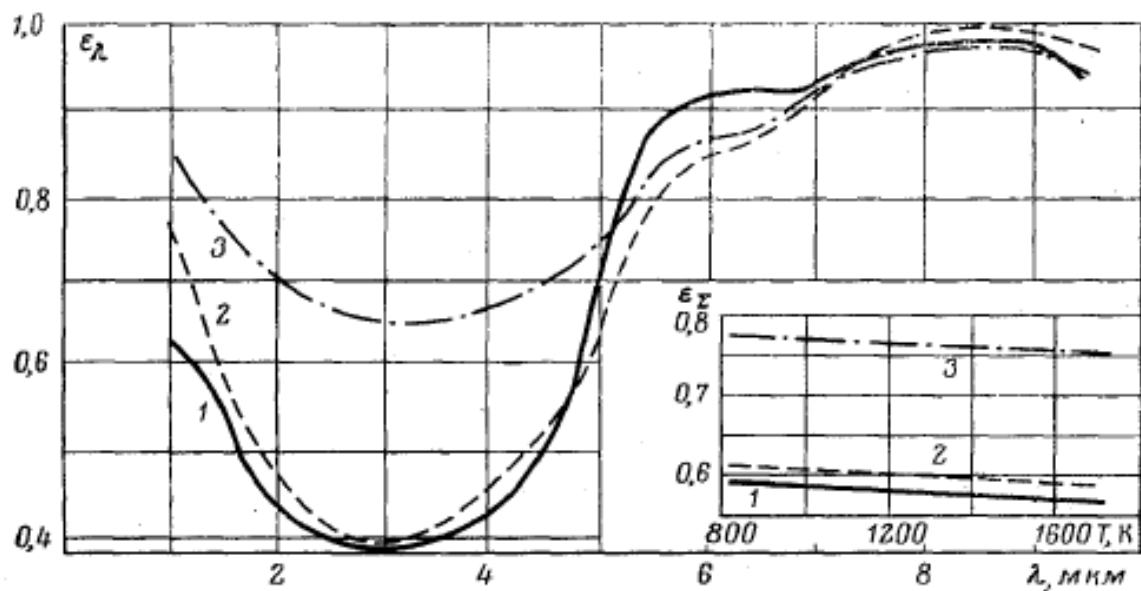


Рисунок 1.5 – Радіаційні характеристики вогнетривких бетонів з кремнеземистим і алюмосилікатними наповнювачами в нейтральному середовищі (Позначення ті ж, що і на рис. 1.4)



1 - магнезитовий бетон (рідке скло + Na_2SiFe); 2 - магнезитовий бетон (рідке скло + сієніт шлам); 3 - магнезитовий бетон (портландцемент)

Рисунок 1.6 – Радіаційні характеристики магнезитових бетонів в повітряному середовищі

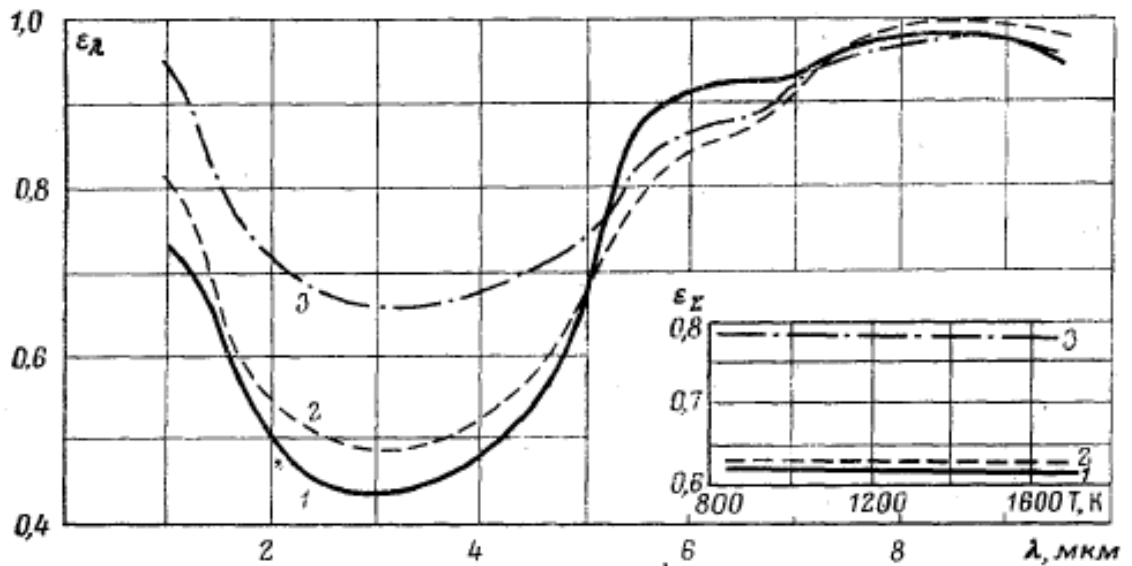
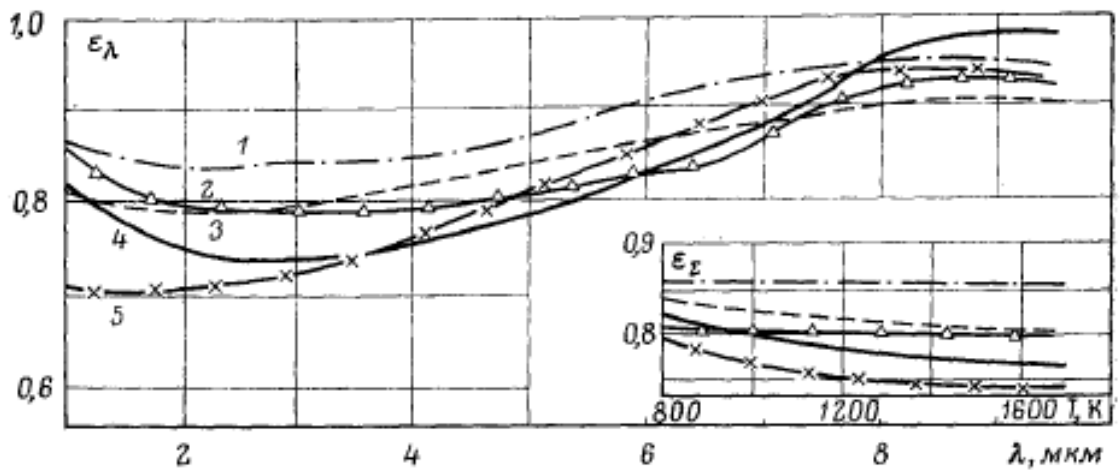


Рисунок 1.7 – Радіаційні характеристики магнезитових бетонів в нейтральному середовищі. (Позначення ті ж, що і на рис. 1.6)



1 - хромітовий бетон (портландцемент); 2 - хромомагнезитовий бетон (портландцемент); 3 - хромітовий бетон (рідке скло + сієніт шлам); 4 - хромітовий бетон (рідке скло + Na_2SiFe); 5 - хромітовий бетон (високоглиноземний цемент)

Рисунок 1.8 – Радіаційні характеристики хромітових бетонів

Ці дослідження нашоувують на ідею створення штучного покриття для футеровки, що буде збільшувати спектральну міру чорноти у проблемній зоні

спектру ((1...4) мкм) від початку експлуатації. Це дозволить інтенсифікувати теплообмін та значно зекономити енергетичні ресурси.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МІРИ ЧОРНОТИ ЗАЧОРНЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ

2.1 Аналіз праць дослідників у розробці покриттів

Ідея нанесення спеціальних зачорнюючих покриттів на футеровку теплових агрегатів – не нова і дає вченим підґрунтя для роздумів ще з 70-х років минулого століття. У багатьох роботах відмічається також, що такий технічний захід не тільки підвищує ефективність роботи агрегату, а й знижує температуру футеровки, що подовжує термін її експлуатації.

Чисельні експерименти з покриттями показують, що вони мають представляти собою щільний неруйнівний шар на поверхні кладки. Що важливо, склад цих покриттів відрізняє вміст окислів заліза, і покриття з більшим його відсотком мають вищу міру чорноти.

Таймаровим В.М. та Таймаровим М.А. [31] було досліджено випромінюючу здатність алюмосилікатних та магнезитохромітових вогнетривів при їх нагріванні на відкритому повітрі. Були взяті зразки вогнетривкої продукції підприємств СНГ (хімічний склад наведено у таблиці 2.1), що нагрівались в експериментальній трубчатій печі в діапазоні температур (600... 2000) °С.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад зразків вогнетривів для експерименту Таймарова В.М. і Таймарова М.А.

Найменування вогнетриву (ГОСТ або ТУ)	Вміст компонентів, % та показники шорсткості Ra, мкм та Sm, мм	Місце відбору зразка
1	2	3
Шамот	SiO ₂ = 55; Al ₂ O ₃ = 40; Fe ₂ O ₃ = 1,9; MgO = 1; CaO = 0,4;	Боровичевський вогнетривний комбінат (БВК)
Шамот ШБ	Al ₂ O ₃ = 28; Ra = 13, Sm = 0,56	Красногорівський вогнетривний завод (КВЗ)
Шамот ШБ-6 (ГОСТ 390-83)	Al ₂ O ₃ = 31,86; Ra = 30, Sm = 2,82	Казанська ТЕЦ-1 (КТЕЦ-1)

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Шамот 40-30 (ГОСТ 15635-70)	$Al_2O_3 = 35$; $Ra = 22$, $Sm = 0,76$	Семилуцький вогне-тривний завод (СВЗ)
Глина вогнетривка	$Al_2O_3 + TiO_2 = 35$; $Fe_2O_3 = 1,3$; $Ra = 5$; $Sm = 0,31$	Часово-Ярське місце народження (Ч.Я)
Шамот ШАВ (ГОСТ 3272-71)	$Al_2O_3 = 36$; $Ra = 17$, $Sm = 0,7$	(ККЗ) Казанський компресорний завод
Шамот ШБ-2	$Al_2O_3 + TiO_2 = 30,9$; $Ra = 13$; $Sm = 0,56$	Казанська ТЕЦ-2 (КТЕЦ-2)
Шамот ПШКБ (ГОСТ 390-54)	$Al_2O_3 = 35$; $Ra = 22$; $Sm = 0,91$	Семилуцький вогне-тривний завод (СВЗ)
Шамот ША (ГОСТ 8691-73)	$Al_2O_3 = 30$; $Ra = 6$, $Sm = 0,3$	Всесоюзний інститут вогнетривів (ВІВ)
Алюмосилікат (ГОСТ 11586-73)	$Al_2O_3 = 28$; $Ra = 22$, $Sm = 1,08$	Запорізький вогне-тривний завод (ЗВЗ)
Торкрет (ГОСТ 969-41)	Шамот мелений ПШКБ – 70 %; Глина вогнетривка – 15 %; Цемент глиноземний М400 – 15 %; $Ra = 16$, $Sm = 0,54$	Казанська ТЕЦ-2 (КТЕЦ-2)
Периклаз ПХС	$MgO = 70$; $Cr_2O_3 = 10$; $Ra = 14$, $Sm = 0,36$	Запорізький вогне-тривний завод (ЗВЗ)
Хромпериклаз ХМ	$MgO = 46$; $Cr_2O_3 = 22$; $SiO_2 = 6$; $\rho = 2,95$; $Ra = 13$, $Sm = 0,38$	Запорізький вогне-тривний завод (ЗВЗ)
Хромпериклаз ХПКК	$MgO = 55$; $Cr_2O_3 = 19$; $Ra = 20$, $Sm = 0,39$	Запорізький вогне-тривний завод (ЗВЗ)

Дослідження показали загальну тенденцію зменшення інтегральної міри чорноти вогнетривів зі зростанням температури при нагріванні у середовищі повітря. Дані дослідів наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Дані експерименту Таймарових В.М і М.А

Марка вогнетриву	ε при температурі Т, К							
	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Шамот ШБ (КВЗ)	0,91	0,75	0,66	0,61	0,59	0,58	0,57	0,56
Алюмосилікат (ЗВЗ)	0,89	0,78	0,66	0,61	0,57	0,55	0,54	0,53
Шамот (БВК)	0,86	0,71	0,63	0,58	0,56	0,5	0,47	0,45
Шамот 40-30 (СВЗ)	0,85	0,74	0,63	0,57	0,5	0,47	0,44	0,41
Шамот ШАВ (ККЗ)	0,84	0,76	0,72	0,7	0,69	0,68	0,67	0,66
Шамот ШБ-6 (КТЕЦ-1)	0,8	0,73	0,65	0,6	0,56	0,54	0,53	0,52
Шамот ШБ-2 (КТЕЦ-2)	-	0,8	0,68	0,65	0,63	-	-	-
Шамот ПШКБ (СВЗ)	-	0,79	0,67	0,66	0,59	0,56	-	-
Торкрет (КТЕЦ-2)	-	0,75	0,66	0,63	0,61	-	-	-
Глина вогнетривка (Ч.Я)	-	0,71	0,68	0,66	0,64	-	-	-
Шамот ША (ВЮ)	0,78	0,66	0,6	0,56	0,54	0,53	0,52	0,51
Хромпериклаз ХМ (ЗВЗ)	0,88	0,86	0,83	0,81	0,78	0,76	0,74	0,72
Хромпериклаз ХПКК (ЗВЗ)	0,86	0,82	0,72	0,75	0,73	0,71	0,7	0,69
Периклаз ПХС (ЗВЗ)	0,84	0,79	0,74	0,7	0,67	0,64	0,63	0,62

Ця робота проводилась з метою дослідити радіаційні характеристики вогнетривів, в залежності від їх хімічного складу для вибору найперспективніших складів для розвитку і застосування. Але у нашому випадку ця праця доводить доцільність використання покриттів, які будуть мати більш стабільне значення міри чорноти, та захищатимуть футеровку від хімічної дії середовища.

Щоб обрати необхідний склад зачорнюючого покриття, необхідно керуватись рядом критеріїв. Окрім основної характеристики – інтегральної міри чорноти поверхні – слід звертати увагу на термічну стійкість, стійкість до хімічної корозії та ерозії, та особливо собівартість такого покриття. Звісно для цього треба проводити ряд експериментів за різних умов експлуатації.

Скористаємось досвідом попередніх дослідників та роздивимось деякі варіанти покриттів з високою мірою чорноти.

В наш час найбільш чорним покриттям вважається спеціально розроблений британською компанією Surrey Nanosystems матеріал під назвою Vantablack [45]. Цей матеріал являє собою масиви з вертикально розташованих вуглецевих нанотрубок. Коефіцієнт поглинання цього матеріалу становить 0,9996, завдяки чому він занесений до книги рекордів Гінеса. Цей матеріал може мати широке застосування, але як було згадано вище, один з основних критеріїв для підвищення ефективності роботи печі – собівартість. Оскільки ця сучасна розробка є дуже дорогою, розглянемо більш доступні варіанти покриттів.

Для енергозбереження промислових печей зазвичай використовуються такі покриття як карбіди (в основному SiC), оксиди перехідних металів (MnO_2 , Fe_2O_3 , ZrO_2 , Cr_2O_3 , NiO , TiO_2 , Co_3O_4 та ін.), а також кераміка та скло застосовуються для приготування покриттів.

У дослідженні вчених Гуангуй Гао, Ін Лі, Дань Ху та Чженпін Сі [25] наводиться приклад створення покриттів на поверхні сплаву TC4 на основі K_2ZrF_6 за допомогою технології мікродугового окислення. Це передова технологія в нанесенні захисних покриттів яка дозволяє створити більш щільні зносостійкі покриття з кращою стійкістю до корозії та високою адгезією між покриттям та основою. Під час нанесення покриття K_2ZrF_6 додавався у електроліт у різних концентраціях. Досліджувався вплив цієї добавки на фазовий склад, мікроструктуру, хімічний склад та випромінюючу здатність.

Сплав TC4, на який наносили покриття складався з Fe < 0,30 %, C < 0,10 %, N < 0,05 %, H < 0,015 %, O < 0,20 %, Al: (5,5...6,8) %, V: (3,5...4,5) %

(відсоток від маси). Зразки TC4 30 x 30 x 2 мм виступали як анод, а електролізер з нержавіючої сталі служив катодом. Електроліт складався з Na_2SiO_3 (10 г/л), $(\text{NaPO}_3)_6$ (6 г/л), NaOH (0,8 г/л), з K_2ZrF_6 0 г/л, 3 г/л, 6 г/л, 9 г/л відповідно. Під час досліду було виявлено, що при збільшенні концентрації речовини, товщина покриття зменшувалась, а поверхня покриття ставала більш гладкою.

Після нанесення покриття вчені виміряли величину випромінюючої здатності чотирьох зразків на довжинах хвиль (7...20) мкм. Графік вимірювань зображено на рисунку 2.1.

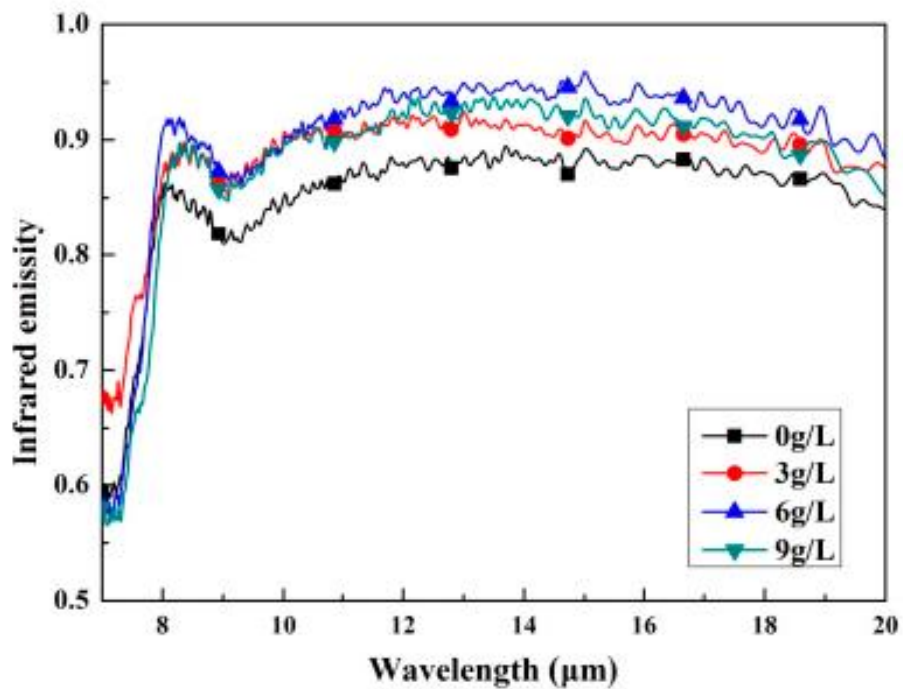


Рисунок 2.1 – Спектральна випромінююча здатність покриттів з додаванням K_2ZrF_6 у діапазоні хвиль (7...20) мкм

Помітно, що значення міри чорноти стабілізуються у діапазоні > 8 мкм. Очевидним є те, що покриття з додаванням K_2ZrF_6 показують вищі значення випромінюючої здатності. Але тенденція не лінійна, максимум випромінюючої здатності спостерігається при концентрації K_2ZrF_6 в електроліті 6 г/л, середнє значення при цьому – 0,89.

Загалом на значення випромінюючої здатності впливає ряд факторів: товщина, шорсткість поверхні, хімічний склад та структура. Зменшення товщини і шорсткості покриття має негативно впливати на випромінюючу здатність, але результати експериментів не виявили цієї закономірності, оскільки хімічний склад та структура мають набагато більший вплив.

Як висновок, нанесення такого покриття за допомогою мікродугового окислення дає щільний нерозривний шар з високим щеплення з поверхнею. Міра чорноти підвищується, це пояснюється легуванням Zr^{4+} та утворенням аморфної фази ZrO_2 , що посилює випромінюючу здатність.

Колеги вищезазначених дослідників – Хуэй Танг, Тячжу Сінь, Цю Сун, Чуангу Йі, Чжаохуа Цзянг, Фупінг Ванг – виконали схожий експеримент [30]. На сплав Ti_6Al_4V наносилось покриття тим самим методом, але з додаванням $FeSO_4$. Завдяки високій термостійкості, стійкості до окислення та низькій теплопровідності оксиди феруму можуть використовуватись у промислових печах як матеріал для інтенсифікації випромінювання, оскільки оксид феруму також має високу випромінюючу здатність.

Під час цього експерименту як основу для нанесення використовували диски з Ti_6Al_4V діаметром 30 мм і товщиною 6 мм. Поверхня їх була відшліфована до шорсткості $Ra = 0,2$ мкм. Електроліт був приготовлений з розчину Na_3PO_4 (7 г/л) та $FeSO_4$ 0 г/л, 2 г/л, 3 г/л, 5 г/л. Зразки були позначені як MAO0, MAO2, MAO3 та MAO5 відповідно.

На відміну від попередньо описаного досліджу, зі збільшенням концентрації залізного купоросу шорсткість поверхні зростала, що також є позитивним фактором для інтенсифікації випромінювання. Після нанесення також було визначено міцність зчеплення покриття з поверхнею диска за допомогою випробування на розрив. Хоча при збільшенні концентрації $FeSO_4$ міцність зменшувалась, але усі зразки продемонстрували міцність скріплення вище 30 МПа. Також зразки піддали випробуванню на термостійкість. Диски з покриттям нагрівались до 500 °С, витримувались 2 хвилини і різко

занурювались у холодну воду. Після 40 таких циклів не відбулося відшарування покриття, що свідчить і про високу стійкість до тепломін.

Щодо основного критерію – випромінюючої здатності, зразки продемонстрували успішний результат. Найбільш високі значення спостерігались у діапазоні хвиль (3...8) мкм. Результати вимірювань можна побачити на рисунку 2.2.

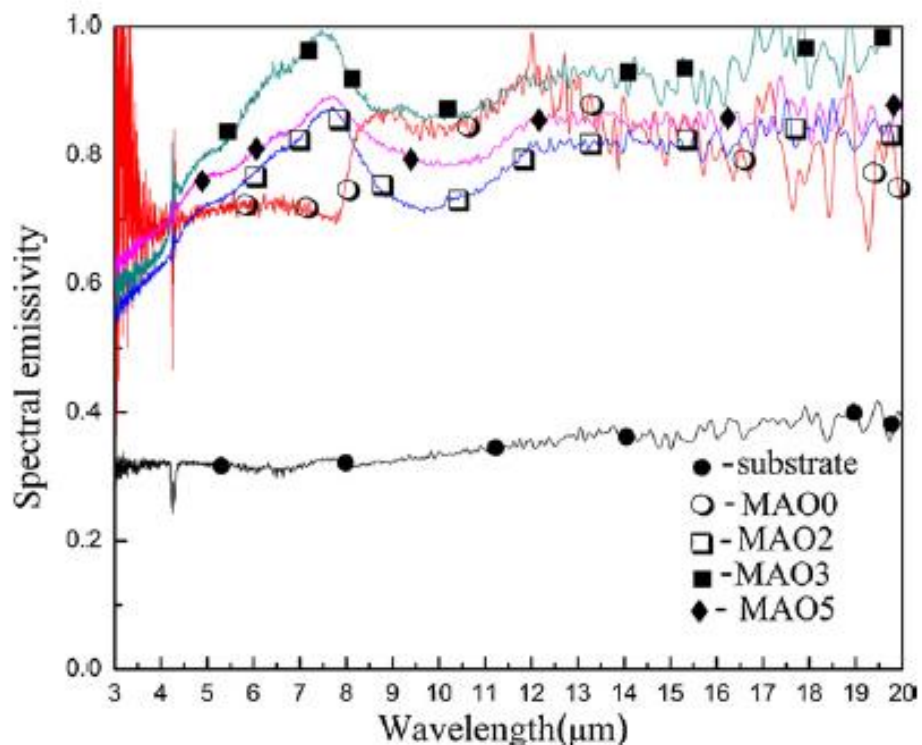


Рисунок 2.2 – Значення спектральної випромінюючої здатності зразків з покриттям FeSO_4

Найкращі показники продемонстрував зразок MAO3 (з додаванням 3 г/л FeSO_4). У діапазоні хвиль (3...8) мкм спектральна міра чорноти коливається у межах 0,8...1, середнє значення $\sim 0,91$. У межах всього вимірюваного діапазон (3...20) мкм середнє значення міри чорноти становить 0,87, що є найвищим серед усіх досліджених зразків.

Аналогічні експерименти проводились із додаванням до складу електролітів KMnO_4 [29]. Отримані залежності спектральної випромінюючої

здатності покриття при додавання у електроліт KMnO_4 наведені на рисунку 2.3. Найбільше значення було отримано при його концентрації 0,8 г/л при довжині хвилі 8 мкм.

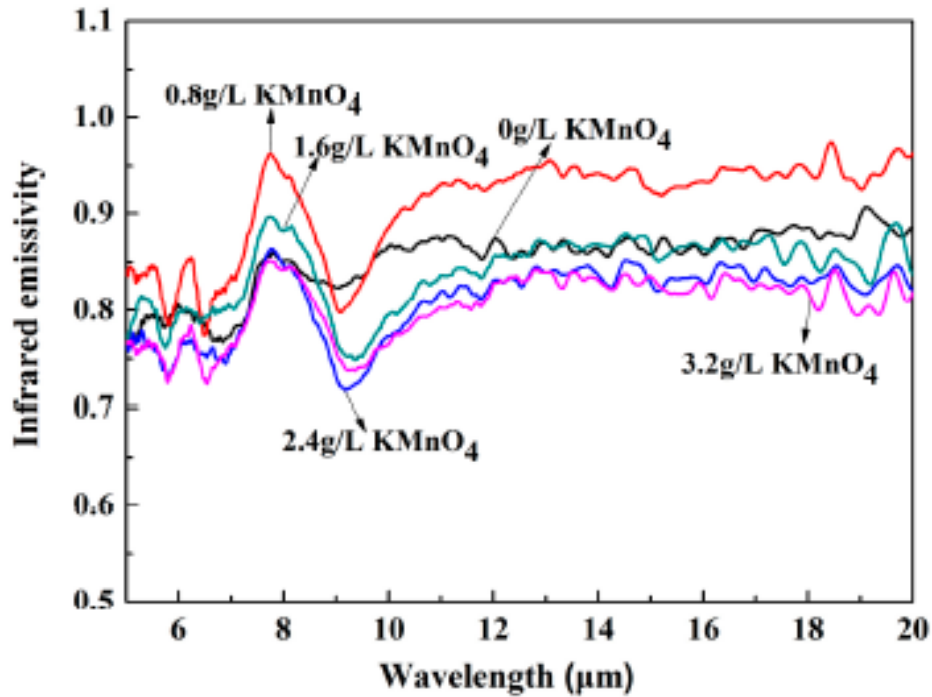


Рисунок 2.3 - Інфрачервоні криві випромінювання керамічних покриттів MAO з різною концентрацією KMnO_4 в діапазоні хвиль (5...20) мкм.

Всі ці досліді показували схожу тенденцію збільшення випромінюючої здатності, але при перевищенні певної концентрації речовини, що додавалась у електроліт спостерігався зворотній ефект. Найімовірніше це відбувалось через зменшення шорсткості покриття при збільшенні концентрації у даному методі обробки. Річ у тому, що при збільшенні їх концентрації зростав струм електролізу, а звідси і інтенсивність процесу. При кипінні електроліту бульбашки виривались з більшою силою, тому на оброблювальній поверхні утворювались більші за площею «кратери», але у значно меншій кількості, що і завдало негативного впливу на загальну характеристику шорсткості поверхні.

2.2 Обладнання та матеріали для досліду

В даній роботі для створення зачорнюючого покриття на поверхні вогнетриву було обрано залізний купорос ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Як основу для нанесення покриття вирішено обрати зразки шамотної цегли ША-5. Такий тип вогнетриву широко використовується у важкій промисловості (для укладання футеровки котельних агрегатів) та для побутових цілей (у печах, для цивільних опалювальних установок та ін.). Зразок для виконання даної роботи виготовлений на ПАО «Запоріжжвогнетрив» (м.Запоріжжя) за ГОСТ 390-96, ДСТУ ГОСТ 8691:2009

Зазначений зразок має наступні характеристики:

- температура початку розм'якшення – 1300 °С;
- межа міцності при стисненні – 41,1 Н/мм²;
- пористість відкрита – 17,8 %;
- вміст Al_2O_3 – 32,29 %;
- щільність – 1870 кг/м³;
- коефіцієнт водопоглинення – 7 %;
- коефіцієнт теплопровідності – 0,7 Вт/м*К;
- вогнетривкість – 1720 °С.

У якості речовини для створення покриття з високою випромінюючою здатністю обрано сульфат заліза (II), відомий як залізний купорос.

Сульфат заліза представляє собою неорганічне з'єднання – залізна сіль сірчаної кислоти. У безводному стані речовина не має кольору та запаху, непрозора та дуже гігроскопічна. Кристалогідрати, що зазвичай зустрічаються частіше, мають світле блакитно-зелене забарвлення та яскраво виражений металевий запах та присмак. На повітрі має властивість поступово вивітрюватись (втрачати кристалізаційну воду). Сульфат заліза (II) добре розчинний у воді, має порівняно низьку токсичність.

Для застосування потрібно приготувати водний розчин (приблизно 100 г FeSO_4 на 1 л води), добре його перемішуючи. У результаті першої ступені

гідролізу утворюється $(\text{FeOH})_2\text{SO}_4$ та сірчана кислота H_2SO_4 . Теоретично можлива друга ступінь гідролізу. Тоді утворюється гідроксид фуруму $\text{Fe}(\text{OH})_2$, що випадає у осад.

Спосіб нанесення – занурення та витримка зразку у водному розчин залізного купоросу. Рекомендується під час витримки перемішувати розчин механічним способом, або барботуючи повітрям. Таким чином буде здійснюватись осад, який має осісти на поверхні шамоту. Завдяки пористості шамоту очікується отримати добру адгезію покриття з поверхнею

Нагрівання зразків буде проводитись у муфельній печі типу СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1. Піч має наступні характеристики:

- ступінь вологозахисту: IP20;
- номінальний струм живлення: 220 В;
- номінальна потужність: 2,5 кВт;
- максимальна температура: 900 °С;
- діапазон регулювання температури: 150...900 °С.

Для вимірювання температури зразків буде використовуватись інфрачервоний пірометр Optris Laser Sight.

Характеристика Optris Laser Sight:

- ІЧ діапазон температури: -35...900 °С;
- Діапазон температури щупа: -35...900 °С;
- Одиниці вимірювання температури: °С/°F;
- Спектральний діапазон: 8...14 мкм;
- Оптична роздільна здатність: 75:1 (16 мм @ 1200 мм / 90 % енергії);
- Переключення на короткий фокус: 1 мм @ 62 мм / 90 % енергії;
- Мінімальний розмір крапки: 1 мм @ 62 мм;
- Роздільна здатність по температурі: 0,1 °С;
- ІЧ похибка: $\pm 0,75$ °С або $\pm 0,75$ % від ІВ;
- Похибка входу ТП: $\pm 0,75$ °С або $\pm 1,0$ % від ІВ;
- Відтворюваність: $\pm 0,5$ °С або $\pm 0,5$ % від ІВ;
- Коефіцієнт температури: $\pm 0,05$ К/К або $\pm 0,05$ %/К;

- Час реакції: 150 мс (сигнал 95 %);
- Лазер < 1 мВт, клас II, 630...650 нм СФ;
- Функції вимірювання: MAX, MIN, DIF, AVG, HOLD;
- Випромінююча здатність/ підсилення: 0,100...1,100;
- Вхід: термопара К-типу;
- Джерело живлення: 2xAA (Мігنون лужні) батареї або через кабель USB (якщо прилад підключений до комп'ютера);
- Температура оточуючого середовища: 0...50 °С;
- Температура зберігання: -35...65 °С;
- Відносна вологість: 10...95 %, без конденсації;
- ЕМП: 89/336/EWG;
- Маса: 420 г.

2.3 Проведення експерименту і схема установки

Експеримент буде проводитись за схемою, зображеною на рисунках 2.4 - 2.6. На схемі: 1 – муфельна піч; 2 – вогнетривка підставка; 3 – оброблений зразок шамоту; 4 – необроблений зразок шамоту; 5 – камера муфельної печі; 6 – мультикремнеземна трубка; 7 – досліджувані зразки шамоту; 8 – пірометр.

Для проведення досліду підготовлюються зразки з шамотної цегли діаметром 18 мм і товщиною 20 мм, що поміщуються у мультикремнеземні трубки з внутрішнім діаметром 20 мм і довжиною 225 мм. Зразки поміщуються у кінець трубки; оскільки випромінювання від шамоту буде багатократно відбиватись та перевипромінюватись за рахунок стінок трубки – це утворить модель чорного випромінювання і дозволить нам заміряти пірометром дійсну температуру зразка.

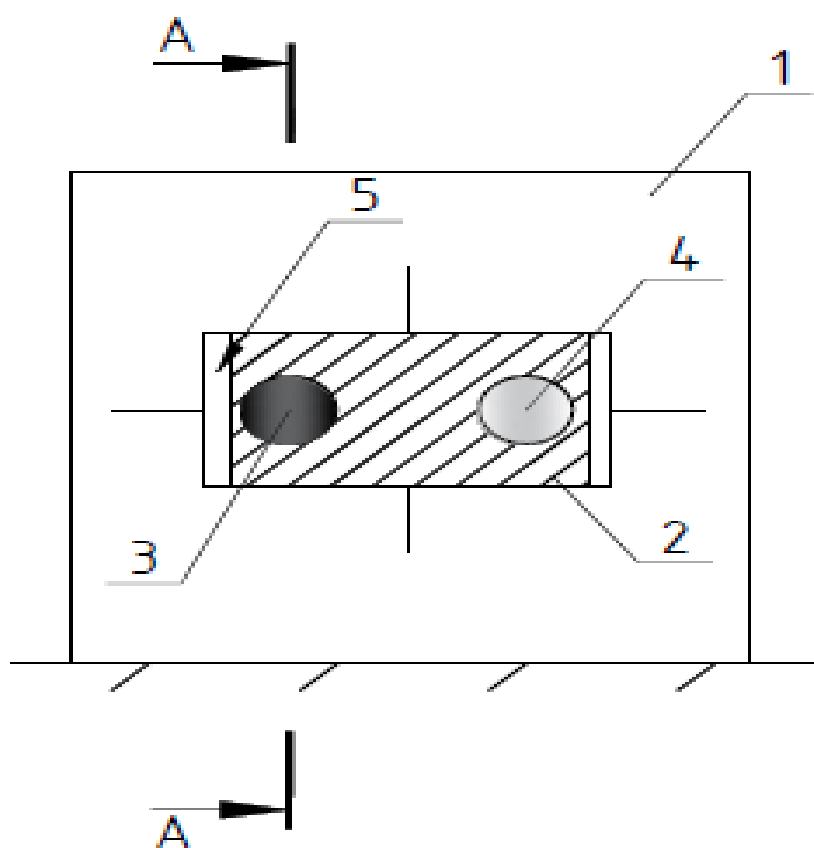


Рисунок 2.4 – Схема установки, вид спереду

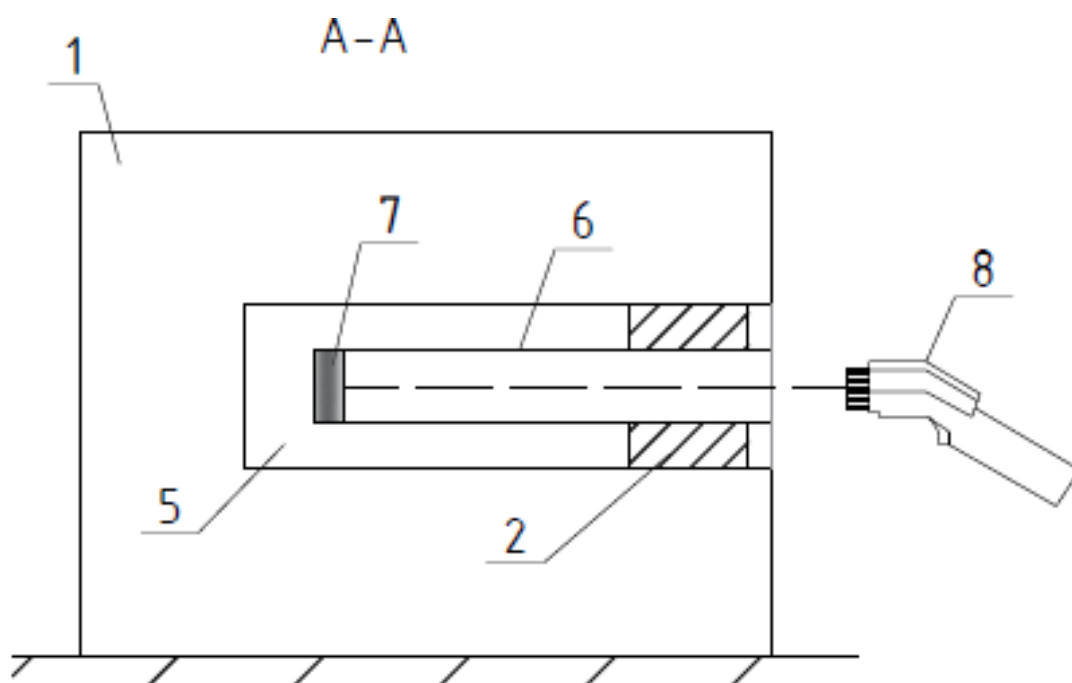


Рисунок 2.5 – Схема установки, замір чорного випромінювання

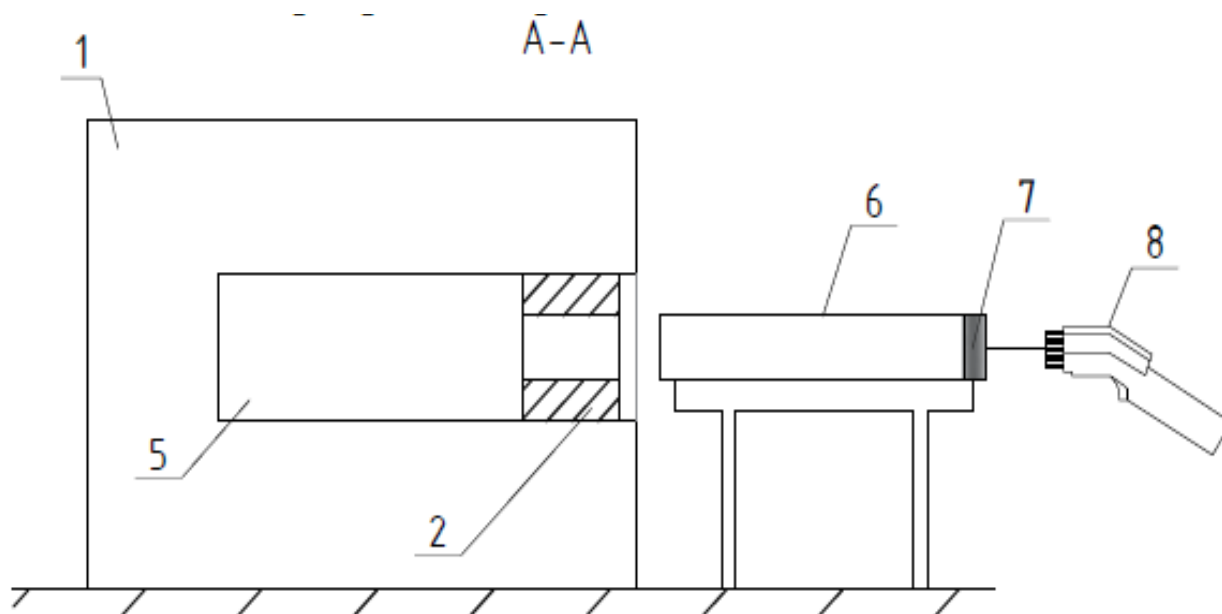


Рисунок 2.6 – Схема установки, замір сірого випромінювання

Для відстеження залежності міри чорноти від температури зразки будуть досліджуватись у декількох температурних режимах: 200 °С, 300 °С, 400 °С, 500 °С.

Щоб визначити вплив покриття на міру чорноти поверхні вогнетривів, дослід проводиться одночасно з обробленим і необробленим зразком.

Для вимірювання температури розжарених тіл застосовуватиметься радіаційний пірометр. Такі пірометри градууються за потоком випромінювання чорного тіла. Таке градуювання тісно зв'язує температурну шкалу приладу з температурою і відповідним тепловим потоком випромінювання чорного тіла. При направленні променя приладу на нагріте тіло, пірометр показуватиме температуру такого чорного тіла, яке випромінює такий самий тепловий потік, що і дане тіло.

Якщо температура тіла мало відрізняється від температури оточуючих стінок, як наприклад при нагріванні предмету у печі, то пірометр показуватиме температуру близьку до дійсної, так як поверхня тіла, оточеного предметами з такою ж температурою, посилає чорне випромінювання. Якщо ж нагріте тіло вийняти з печі, то воно буде випромінювати потік, рівний потоку власного випромінювання, що менше ніж чорне. В такому випадку радіаційний пірометр,

направлений на це тіло покаже радіаційну температуру, яка чисельно буде меншою за дійсну температуру.

Таким чином, виходячи з закону Стефана-Больцмана можна записати співвідношення для дійсної температури тіла і температури чорного тіла, що має такий самий тепловий потік випромінювання

$$\varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C_0 \left(\frac{T_p}{100} \right)^4, \quad (2.1)$$

де T – дійсна температура тіла, К;

T_p – температура чорного тіла, з таким самим тепловим потоком, К;

ε – міра чорноти нагрітого тіла.

Під час досліду на кожному етапі підвищення температури печі після витримки протягом деякого часу будуть фіксуватись температури зразків у печі, як дійсна температура тіла T . Далі зразки різко вийматимуться з печі і одразу ж заміряться їх температура з тильної сторони, як температура чорного випромінювання T_p . Маючи ці дані, спираючись на формулу (2.1) можна визначити випромінюючу здатність зразків шамоту наступним чином.

$$\varepsilon = \frac{C_0 \left(\frac{T_p}{100} \right)^4}{C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{T_p^4}{T^4}. \quad (2.2)$$

Слід зазначити, що при збільшенні температури нагрівання, різниця між радіаційною і дійсною температурою буде збільшуватись, через те, що за законами випромінювання тепловий потік знаходиться у прямо пропорційній залежності від температури у четвертій степені.

За довідковою літературою похибка визначення інтегральної міри чорноти складатиме $\pm 1,525$ %.

Результати проведення дослідів наведені у таблиці 2.3. Як видно з результатів, дійсна температура обробленого зразка була менша ніж чистого

шамоту. Це пояснюється тим, що поверхня обробленого шматка шамоту має більшу випромінюючу здатність, а тому й інтенсивніше віддає тепло.

Отримані результати показують, що за рахунок нанесення розчину сульфату заліза (II) все ж таки вдалося збільшити міру чорноти поверхні. Скоріше за все, це відбувається за рахунок наявності оксидів заліза у розчині.

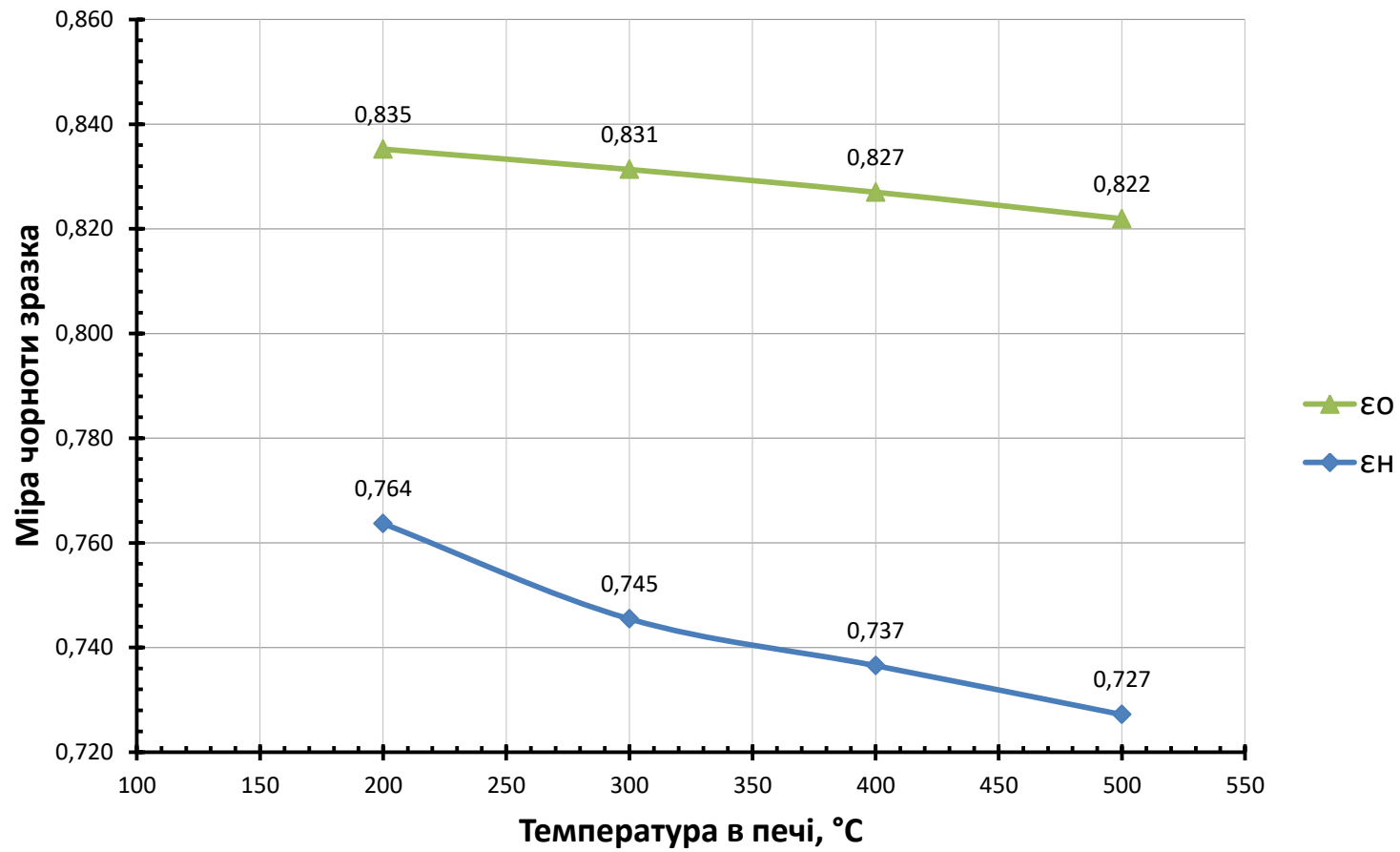
За результатами побудовані графіки, що зображені на рисунках 2.7 – 2.9. На них видно, що для обох зразків присутня тенденція зменшення міри чорноти при підвищенні температури. Це може пояснюватись хімічними процесами на поверхні вогнетриву, що змінюють його структуру та роблять поверхню більш гладкою. А, як відомо, зменшення шорсткості поверхні негативно впливає на випромінюючу здатність. За багатьма експериментальними даними зменшення міри чорноти шамоту різко поживлюється при нагріванні його вище 600 °С.

Але слід зазначити, що крива міри чорноти зразка обробленого залізним купоросом є більш пологою, тобто позитивний вплив хімічного складу покриття частково компенсує зменшення шорсткості поверхні.

Згідно з формулою, чим більше різниця між дійсною температурою і температурою чорного випромінювання (виміряної пірометром ззовні печі), тим менша міра чорноти поверхні. Графіки зміни температур та міри чорноти зображені на рисунках 2.7 – 2.9.

Таблиця 2.3 – Результати проведення експерименту

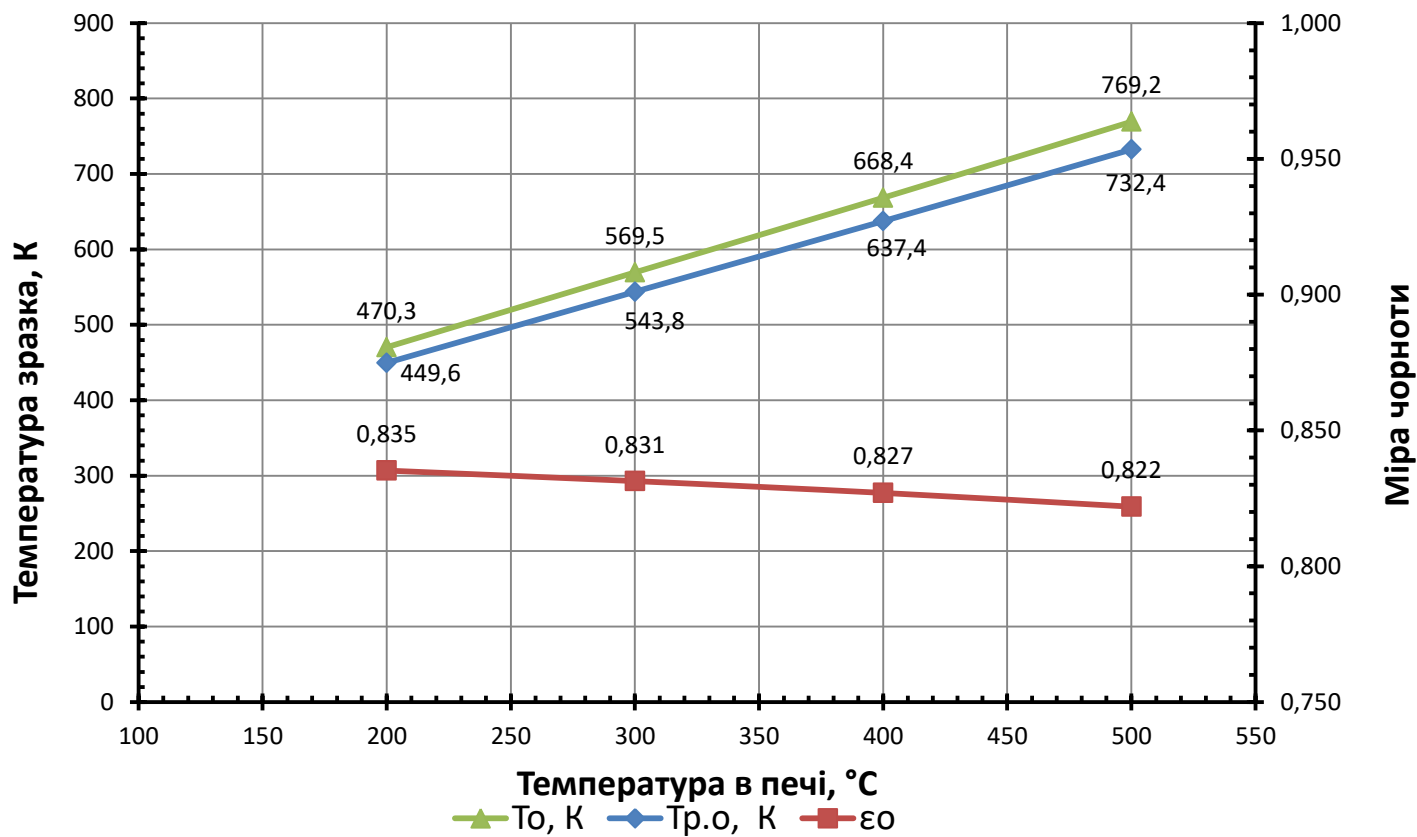
Температура в печі, °С	Оброблений зразок			Необроблений зразок		
	T_o, K	$T_{p.o}, K$	ϵ_o	T_n, K	$T_{p.n}, K$	ϵ_n
200	470,3	449,6	0,835	471,0	440,3	0,764
300	569,5	543,8	0,831	570,6	530,2	0,745
400	668,4	637,4	0,827	671,2	621,8	0,737
500	769,2	732,4	0,822	771,1	712,1	0,727



ϵ_0 – крива міри чорноти зразка, обробленого розчином;

ϵ_n – крива міри чорноти зразка, не обробленого розчином.

Рисунок 2.7 – Порівняння міри чорноти зразків

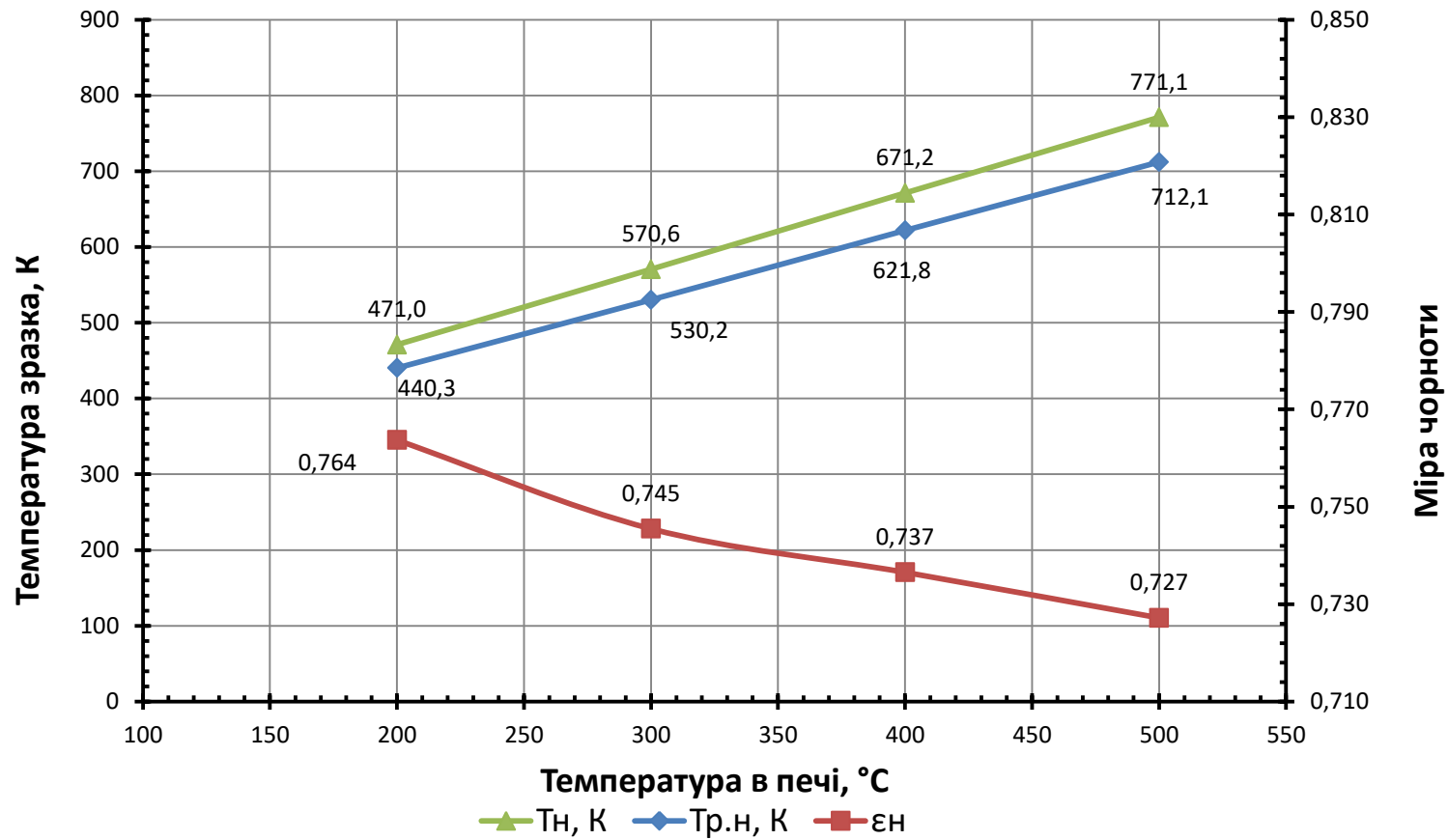


T_0 – дійсна температура обробленого зразка, К;

$T_{p.o}$ – радіаційна температура обробленого зразка, К;

ϵ_0 – крива міри чорноти обробленого зразка.

Рисунок 2.8 – Залежність міри чорноти обробленого зразка від температури



T_n – дійсна температура не обробленого зразка, К;

$T_{р.н}$ – радіаційна температура не обробленого зразка, К;

ϵ_n – крива міри чорноти не обробленого зразка.

Рисунок 2.9 – Залежність міри чорноти необробленого зразка від температури

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

Згідно Закону України «Про охорону праці» стаття 14 Обов'язки працівника щодо додержання вимог нормативно-правових актів з охорони праці, працівники та студента зобов'язані:

- дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку та здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт під час перебування на території навчального закладу;

- знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведінки з машинами та механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту;

- проходити у встановленому законодавством порядку попередні та періодичні медичні огляди;

- працівник несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог.

3.1 Пожежна безпека при проведенні дослідів

3.1.1 Загальні вимоги

Пожежна безпека при проведенні дослідів регламентується Кодексом цивільного захисту України, Правилами пожежної безпеки в Україні, затверджених наказом МВС України від 30.12.2014р. № 1417.

Перед проведенням дослідів у лабораторній аудиторії всі працівники та студенти, що приймають у ньому участь, мають пройти вступний протипожежний інструктаж та перевірку знань з питань пожежної безпеки.

В зоні проведення дослідів мають знаходитись лише ті прилади, моделі, меблі та устаткування, що необхідні для дослідів. Поблизу експериментального стенду не має знаходитись горючих та легкозаймистих речовин.

Електромережі, електроприлади і апаратура повинні експлуатуватись тільки у справному стані, з урахуванням вказівок та рекомендацій підприємства-виготовлювачів. Всі електроустановки та електроприлади мають бути приєднані до заземлюючого контуру та мати захист від струмів короткого замкнення.

У разі виявлення пошкоджень електромереж, вимикачів, розеток та інших електроприладів їх слід негайно вимкнути та вжити необхідних заходів, щодо приведення їх у пожежобезпечний стан.

У приміщенні, де проводиться дослід на видному місці мають висіти: табличка з прізвищем відповідального за пожежну безпеку, план евакуації, інструкція з пожежної безпеки, вогнегасник.

Меблі й обладнання слід розмішати так, щоб забезпечувався вільний евакуаційний прохід до виходу з приміщення. Навпроти дверного отвору необхідно залишати прохід, який повинен дорівнювати ширині дверей, але не менше 1,0 м.

Евакуаційні шляхи (проходи, коридори, вестибюлі, сходові марші тощо) й виходи слід постійно утримувати вільними, нічим загроможувати.

До користування електричними побутовими приладами допускаються особи, які мають першу та другу групу допуску з електробезпеки.

Силове й освітлювальне електроустаткування, електропроводка та інші споживачі електроенергії повинні виконуватися та експлуатуватися відповідно до ПБЕЕС та Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС).

Електропроводка, розподільні пристрої, апаратура, електрообладнання, вимірювальні прилади, а також запобіжні пристрої різного типу, рубильники та інші пускові апарати й пристрої слід монтувати на негорючих основах (текстоліт, гетинакс та інші матеріали).

Приєднання нових споживачів електричної енергії (електродвигунів та іншого електрообладнання) повинно проводитися з відома відповідального за експлуатацію електрогосподарства в академії.

Зіпсовані електроапарати та прилади, які можуть спричинити коротке замикання, слід терміново ремонтувати або замінити на інші.

Плавкі вставки запобіжників повинні бути калібровані із зазначенням номінального струму вставки (клеймо заводу-виробника або електричної лабораторії). Використання саморобних некаліброваних плавких вставок забороняється.

Настільні лампи, вентилятори, холодильники та інші електроприлади слід умикати в мережу тільки через справні штепсельні розетки й електрошнури.

Експлуатація тимчасових електромереж забороняється.

Студенти та працівники повинні знати місце розташування оповіщувачів пожежної сигналізації, первинних засобів пожежогасіння та вміти їх застосовувати.

По закінченню досліду необхідно прибрати робоче місце, відключити від мережі усе електрообладнання, закрити вікна, переконатись у пожежобезпечному стані приміщення, замкнути приміщення на ключ.

Забороняється:

- паління в аудиторії;
- загромадження приміщення зайвим устаткуванням, обладнанням, предметами;
- користування несправними електричними приладами і використовувати їх у побутових цілях;
- користуватись джерелами відкритого вогню;
- використовувати засоби пожежогасіння не за призначенням.

3.1.2 Можливі причини виникнення пожежі

Пожежа може виникнути:

- при необережному поводженні з відкритим вогнем та нагрівальними приладами;

- при порушенні правил застосування та зберігання легкозаймистих матеріалів;
- від несправної електропроводки, короткого замикання, перевантаження електромережі, використання несправних електроприладів та устаткування кустарного виробництва;
- від паління у невстановлених місцях;
- при порушенні правил пожежної безпеки під час роботи у лабораторній аудиторії.

3.1.3 Обов'язки та дії при виникненні пожежі

При виникненні пожежі в першу чергу дії мають бути спрямовані на забезпечення безпеки і евакуації людей.

При виявленні пожежі необхідно:

- негайно з'ясувати обставини і, якщо повідомлення чи сигнал про пожежу підтверджується, а займання ліквідувати підручними засобами пожежогасіння неможливо, негайно викликати пожежну охорону за телефоном 9-101, зазначити точну адресу і місце пожежі, що горить, наявність людей у приміщенні, своє прізвище та організувати зустріч пожежних машин.
- сповістити про пожежу голосом, ручним оповіщувачем, повідомити ланку пожежогасіння університету (тел. 227-12-51), штаб цивільного захисту (тел. 228-75-29) та свого керівника. Сигналом для евакуації, який подають чергові охоронці, в університеті встановлена серія з трьох довгих дзвінків;
- відключити від енергопостачання прилади та обладнання;
- вжити заходів щодо евакуації людей і матеріальних цінностей з дотриманням техніки безпеки;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння, а при неможливості здійснення даних дій, вийти з приміщення, щільно зачинити за собою двері і діяти відповідно до розпоряджень свого керівника або командира дружини пожежогасіння;

- під час пожежі необхідно утримуватись від відкриття вікон та дверей, щоб запобігти приливу свіжого повітря, що сприятиме поширенню вогню.

Після прибуття підрозділів пожежної охорони, особа з числа керівників гасіння пожежі, зобов'язана надати старшому підрозділу пожежної охорони всі необхідні відомості про осередок пожежі та виконувати його вказівки і розпорядження.

3.1.4 Засоби пожежогасіння і порядок їх вживання

Ручні вуглекислотні вогнегасники ОУ-2, ОУ-5, ОУ-3, які знаходяться в ауд.1 призначені для гасіння невеликих початкових загорянь різних речовин і матеріалів, за винятком речовин, горіння яких відбувається без доступу повітря (целулоїд, піроксилін, терміт і ін.).

Вуглекислотні вогнегасники є сталевими балонами, в горловину яких вкручені латунні вентиля з сифоновими трубками, маховики вентилів мають бути опломбовані. Для гасіння пожежі вогнегасник слід піднести до джерела горіння, направити на нього розтруб і відкрити повністю вентиль проти годинникової стрілки. Під час роботи вогнегасника не рекомендується тримати балон в горизонтальному положенні у зв'язку з тим, що таке положення балона утрудняє вихід з нього вуглекислоти через сифонову трубку.

Не розмішувати вогнегасники поблизу опалювальних і нагрівальних приладів.

Внутрішній пожежний кран є надійним засобом гасіння пожеж. Внутрішній пожежний кран встановлюється в стінній ніші або в спеціальній шафі (ящику), обладнується пожежним напірним рукавом і стволом. Аби привести в дію внутрішній ПК, треба відкрити дверці шафи, розмотати рукав у напрямі джерела горіння і відкрити вентиль пожежного крану для подачі води.

Не застосовувати для гасіння електроустановок, дротів, що знаходяться під напругою, а також для гасіння речовин, що утворюють з водою горючі і вибухонебезпечні з'єднання і газу.

Для зручності і розміщення первинних засобів пожежогасіння встановлюються пожежні щити. На них кріпляться вогнегасники (не менш 2-х штук), лопата, багор, кирка і поруч – ящик з піском.

Для локалізації невеликих вогнищ загоряння необхідно мати полотна з азбесту або грубошерстої тканини. Пожежні щити забарвлюються в біло-червоний колір і розташовуються на видному і доступному місці.

Телефони екстрених служб:

- 9-101 при пожежі;
- 9- 103 виклик швидкої медичної допомоги.

3.1.5 Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед початком дослідів у лабораторній аудиторії слід перевірити:

- наявність і стан первинних засобів пожежогасіння;
- протипожежний стан електроустаткування згідно вимогам діючих інструктажів;
- працездатність системи вентиляції, димовидалення;
- справність телефонного зв'язку;
- стан евакуаційних виходів, проходів;
- стан систем пожежної сигналізації і сповіщення.

3.2 Безпека при роботі з хімічними препаратами

3.2.1 Вимоги з техніки безпеки перед початком роботи

При поводженні с хімічним скляним посудом і приладами необхідно дотримувати запобіжні заходи.

Хімічний посуд, в більшості випадків, тонкостінний и крихкий, тому при недбалому поводженні, його можна розбити і порізатися. Посуд і прилади слід тримати в руках обережно, не стискаючи. Хімічний посуд і прилади не можна

різко ставити на стіл. При митті посуду йоржами або скляною паличкою потрібно бути обережним, оскільки ними легко пробити дно або стінки посуду. Аби запобігти цьому, на оголений дротяний кінець йоржа слід надіти шматочок гумової трубки відповідного діаметру.

Відкриття скляних пробок, що «заїли», інколи зв'язане з небезпекою порізу або викидання речовини з посуду.

При надяганні на скляні трубки гумових шлангів і пробок пальці слід захищати рушником.

3.2.2 Вимоги техніки безпеки під час роботи

Категорично забороняється знаходитись в лабораторній аудиторії у стані алкогольного чи наркотичного сп'яніння або під дією психотропних препаратів.

Проведення досліду пов'язане з приготуванням реактивів. Студенти і працівники, що працюють в лабораторії повинні знати основні властивості вживаних реактивів, особливо міра їх отруйності і здібність до створення вибухонебезпечних і вогнебезпечних сумішей з іншими реактивами. Реактиви необхідно готувати в кількості, потрібній для проведення досліду.

Особливої обережності слід дотримуватися при поводженні з отруйними, вогнебезпечними або шкідливими речовинами, концентрованими кислотами і лугами. Реактив, що просипався на підлогу, що неминуче при цьому забруднюється не можна засипати назад в ту ж банку, де він зберігається.

Реактиви, що змінюються під дією світла, зберігають в темних склянках і в захищеному від світла місці. Реактиви необхідно зберігати від забруднення і витратити економно.

На всіх склянках з реактивами завжди мають бути етикетки з вказівкою назви реактиву, міри його чистоти, терміну придатності.

При приготуванні розчинів слід застосовувати лише дистильовану воду.

В більшості випадків при виконанні лабораторних робіт користуються розчинами лугів та кислот. При роботі з цими речовинами слід дотримуватися обережності і працювати лише в гумових рукавичках.

При приготуванні розчинів, під час яких виділяється тепло, необхідно використовувати лише терmostійкий хімічний посуд.

При роботі з кислотами слід знати, що концентрована соляна кислота на повітрі димить, тому працювати з нею потрібно у витяжній шафі. При розбавленні кислот слід пам'ятати, що кислота підливається до воду, а не навпаки. При розбавленні відбувається сильне розігрівання і якщо підлити воду до кислоти, можливе розбризкування її, що небезпечно, оскільки сірчана кислота викликає важкі опіки.

Розливати кислоти і аміак слід у витяжній шафі із захисними окулярами в гумових рукавичках і прогумованих фартухах.

3.2.3 Вимоги техніки безпеки після закінчення роботи

Залишки вибухонебезпечних або вогненебезпечних речовин (лужні метали, горючі і легкозаймісті рідини) не викидати в сміттєвий ящик або раковини, а збирати в призначені контейнери з відповідними написами.

Категорично забороняється виливати в раковини концентровані або розбавлені луги і кислоти. Вони повинні збиратися в спеціально призначенні для цих цілей ємності.

Хімічний посуд необхідно вимити під проточною водою і прибрати до шафи. Хімічні реактиви прибрати з робочого столу під витяг або на полиці для їх подальшого використання.

3.2.4 Дії в аварійних ситуаціях та надання першої медичної допомоги

Якщо кислота потрапила на одяг або взуття, слід швидко відмити облите місце великою кількістю води, а потім нейтралізувати кислоту вуглекислим

натрієм або розчином аміаку. При попаданні на шкіру рук або обличчя потрібно відразу промити місце великою кількістю води.

При опіках кислотами (сірчаною, соляною) промивають опіки великою кількістю води, потім 5 % розчином бікарбонату натрію або 10 % розчином карбонату амонію, а потім знову водою.

При опіку лугами уражене місце промивають великою кількістю води, а потім 3-6 % (за об'ємом) розчином оцтової кислоти або 1 % розчином соляної кислоти, після чого знову промивають водою.

При опіку очей лугами промивають струменем води, при цьому вони мають бути по можливості відкритими. потім промити 2 % розчином борної кислоти або 3 % розчином оцтовою. При поразці очей кислотами – промити 3-5 % розчином бікарбонату натрію.

При порізах склом з одночасною дією кислоти або лугу, перш за все, необхідно переконатись в тому, що в рані немає уламків скла, а потім швидко промити відповідним розчином йоду, перев'язати поріз, користуючись стерильною ватою або бинтом. Перераховані вище речовини повинні знаходитись в аптечці.

Рана це ураження, що характеризується порушенням шкірних покривів, слизових оболонок, чи тканин. Рану необхідно закривати стерильним матеріалом, забороняється промивати рану водою чи ліками.

При необхідності тимчасової зупинки кровотечі накладається жгут, пальцем пережимається артерія. Після надання першої допомоги необхідно в серйозних випадках відразу ж звернутись до лікаря.

3.3 Безпека при роботі з електроустановками

3.3.1 Вимоги електробезпеки перед початком роботи

Перед включенням електроустановки необхідно візуально перевірити її справність. Поверхні установок мають бути чистими і сухими.

Перевірити наявність діелектричних килимків.

Перевірити справність розеток, вилок, дротів, що підводять струм, і ізоляції на рукоятках інструменту.

Перевірити наявність і справність заземлюючого дроту і місця кріплення.

3.3.2 Вимоги електробезпеки під час роботи

При експлуатації приладів і апаратів необхідно суворо дотримуватись правил викладених в технічному паспорті приладу. Стаціонарні прилади мають бути заземлені. Необхідно регулярно перевіряти справність електроприладів і електроустаткування.

Всі електронагрівальні прилади повинні встановлюватися на теплоізольованих не горючих поверхнях, їх треба утримувати чистими і сухими, не допускати попадання на них кислот, розчинів лугів, солей тощо.

При порушенні роботи електроприладу (поява запаху, виділення диму, зміна характеру шуму і так далі) прилад треба відключити від мережі і не використовувати до проведення необхідного огляду та ремонту.

При припиненні подачі струму в лабораторію необхідно відключити всі електроприлади від мережі.

Забороняється: використовувати як тимчасове заземлення водопровідні труби, мережі центрального опалення, каналізації, трубопроводи, покриті ізоляцією для захисту від корозії; залишати прилади включеними на ніч.

Категорично забороняється: користуватись в лабораторії саморобними нагрівальними приладами, несправними розетками, вимикачами, електрошнурами і іншими несправними устаткуванням, а також проводити ремонт електроустаткування особам, не пов'язаним з цією роботою.

3.3.3 Вимоги техніки безпеки після закінчення робіт

Відключити електроустаткування від мережі, зробити прибирання робочого місця, залишаючи приміщення вимкнати світло.

3.3.4 Дії в аварійних ситуаціях та надання медичної допомоги.

При виявленні несправностей, електроустаткування необхідно відключити від мережі.

Дії при пожежі: при спалахуванні електропроводки або електроустаткування необхідно вимкнути загальний рубильник. Пожежу необхідно гасити вуглекислотними або порошковими вогнегасниками. при використанні вуглекислотного вогнегасника щоб уникнути обмороження за розтруб не братися рукою.

Заходи першої допомоги постраждалому від електричного струму залежать від стану, в якому знаходиться постраждалий після звільнення його від електричного струму. Для визначення цього стану необхідно негайно:

- укласти постраждалого на спину на тверду поверхню;
- перевірити наявність у постраждалого дихання;
- перевірити наявність в постраждалого пульсу на променевій артерії на зап'ястку або по сонній артерії на передній бічній поверхні шиї;
- виявити стан зіниці (вузький або широкий): широка зіниця вказує на різке погіршення кровопостачання мозку.

У всіх випадках ураження електричним струмом виклик лікаря є обов'язковим незалежно від стану постраждалого.

Якщо постраждалий знаходиться в свідомості, але до цього був в стані непритомності, його слід укласти в зручне положення (підстелити під нього і накрити його зверху чим-небудь з одягу) і до прибуття лікаря забезпечити повний спокій, безперервно спостерігаючи за диханням і пульсом . Ні в якому

разі не можна дозволити постраждалому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після поразки електрострумом не унеможлиблює подальшого погіршення стану постраждалого. В разі неможливості швидко викликати лікаря необхідно терміново доставити постраждалого до лікувальної установи, забезпечити для цього необхідні транспортні засоби або носилки. Якщо постраждалий знаходиться в несвідомому стані, але із стійким диханням і пульсом, його слід рівно і зручно укласти, розпустити і розстібнути одяг, забезпечити прилив свіжого повітря, давати нюхати нашатирний спирт, окропити його водою і забезпечити повний спокій. Одночасно слід терміново викликати лікаря. Якщо постраждалий погано дихає - дуже рідко і судорожно, як вмираючий, йому слід робити штучне дихання і зовнішній непрямий масаж серця.

За відсутності у постраждалого ознак життя (дихання і пульсу) неможна вважати його мертвим, оскільки смерть часто буває визначеною помилково.

У такому стані постраждалий, якщо йому не буде надана негайна перша допомога у вигляді штучного дихання і зовнішнього (непрямого) масажу серця може померти. Штучне дихання слід виконувати безперервно, як до, так і після прибуття лікаря. Питання про доцільність або безцільність подальшого проведення штучного дихання вирішується лише лікарем. При наданні допомоги постраждалому важлива кожна секунда, тому першу допомогу слід надавати негайно і за можливості на місці випадку.

Ураженого електричним струмом можна визнати мертвим лише в разі наявності видимих важких зовнішніх пошкоджень, наприклад, в разі роздроблення черепа або наявності травм не сумісних з життям, при обгоранні всього тіла. У інших випадках констатувати смерть має право лише лікар.

Оживлення організму, ураженого електричним струмом, може бути виконане декількома способами, заснованими на проведенні штучного дихання. Найефективнішим є спосіб «рот в рот», що проводиться одночасно з непрямим масажем серця, при яких:

- здійснюється штучне дихання, шляхом ритмічного вдуння повітря зі своїх легенів в легені постраждалого через спеціальне пристосування (гумову трубку) або безпосередньо в рот або в ніс постраждалого;

- підтримується у постраждалого штучний кровообіг, шляхом стискування серця за допомогою ритмічних натискань на передню стінку грудної клітки при натисканні на відносно рухливу нижню частину грудини, позаду якої розташовано серце.

Для виконання штучного дихання, постраждалого слід укласти на спину, швидко, не втрачаючи ні секунди, звільнити від одягу, що заважає (розстібнути комір, розв'язати галстук, розстібнути брюки і тому подібне), швидко розкрити йому рот і видалити сторонні предмети (вставні щелепи) і слиз (хусткою або кінцем сорочки) закинути йому голову назад і відтягнути нижню щелепу. Голова постраждалого закидається назад, підклавши під потилицю одну руку, а другою рукою натиснути на лоб постраждалого до такої міри, аби підборіддя виявилось на одній лінії з шиєю. При цьому необхідно стежити, аби язик постраждалого не запав назад і не закрити дихальні шляхи.

Після цього той, що надає допомогу робить глибокий вдих і з силою видихає в рот постраждалого. При вдунні повітря той, що надає допомогу щільно притискає свій рот до обличчя постраждалого так, щоб по можливості охопити своїм ротом весь рот постраждалого, а своїм обличчям або рукою затиснути йому ніс. Після цього той, що рятує відкидається назад і робить новий вдих. У цей період грудна клітка постраждалого опускається, і він не самовільно робить повний видих.

Вдуння повітря в рот або в ніс можна робити через марлю, серветку або носову хустку, стежачи за тим, аби при кожному вдунні відбувалося достатнє розширення грудної клітки постраждалого. Вдуння повітря роблять з швидкістю близько 10-12 видихів на хвилину (кожні 5-6секунд) до повного відновлення дихання постраждалого або до прибуття лікаря.

При проведенні штучного дихання не можна допускати охолодження постраждалого (не залишаючи його на сирій землі, кам'яній, бетонній або металевій підлозі), підстилаючи під нього що-небудь тепле.

При проведенні непрямого масажу серця натискання на грудину слід повторювати приблизно 1 раз в секунду. В разі, якщо той, що надає допомогу не має помічника і вимушений проводити штучне дихання і зовнішній масаж серця один, слід чергувати проведення вказаних операцій в наступному порядку: після двох-трьох глибоких вдихань в рот або в ніс постраждалого робити 15-20 натискань на грудну клітку, потім знову робити 2-3 глибоких вдихання і знову повторювати 15-20 натискань з метою масажу серця і так далі.

ВИСНОВКИ

Як висновок можна зазначити, що сульфат заліза (залізний купорос) має шанс на існування як покриття для інтенсифікації променистого теплообміну. При зануренні у його водний розчин зразків з шамотної цегли, міра чорноти її поверхні збільшилась з 0,72...0,74 (чистий шамот) до 0,81...0,83 при температурі нагріву (200...500) °С. Також використовуючи це покриття, тенденція зниження випромінюючої здатності при зростанні температури мала менш різкий характер ніж у чистого шамоту.

Окрім радіаційних властивостей покриття показало добру адгезію з поверхнею шамоту, при нагріві до температури 500 °С не було помічено його відлущування або розтріскування.

Проведений експеримент підтвердив досвід попередніх дослідників та дав мотиви для подальшого дослідження у цій області. Сульфат заліза показав добрі результати під час випробовувань і може стати вигідною перспективою для застосування у металургійних печах завдяки своїй доступній вартості. До того ж сульфат заліза є побічним продуктом протравлювання металу, тому для багатьох комбінатів він є фактично безкоштовним.

Перспективою для дослідження сульфату заліза як покриття є експерименти з різними способами його нанесення (під дією температури, з додаванням каталізаторів та ін.), а також використання його з різними підосновами (інші види вогнетривкої продукції та сплави металів). Важливо в майбутньому провести випробовування на більш високих температурах, та зафіксувати подальшу тенденцію зміни міри чорноти, що дає покриття, тобто зафіксувати екстремуми функції $\varepsilon=f(T)$. Слід відзначити, що в даному досліді теплова енергія отримувалась від електричного нагріву. Для повноти дослідження необхідно провести експеримент з різними джерелами тепла, наприклад – енергія згорання палива.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Чернов, В.В., Об использовании покрытий с высокой степенью черноты для интенсификации лучистого теплообмена тепловых агрегатов [Текст] / В.В. Чернов, О.В. Клемина // Современные материалы, техника и технологии. – 2015 г. - №1. – с. 221-226.
2. Великодний, В.О., Вплив радіаційних характеристик теплообмінних поверхонь на теплообмін [Текст] / В.О. Великодний, В.С. Пікашов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014 г. - №1. – с. 63-68.
3. Селезнев, Н.П., Экспериментальное определение степени черноты и влияния теплового экрана при теплообмене излучением [Текст] / Н.П. Селезнев, В.В. Чернов // Современные материалы, техника и технологии. – 2015 г. - №3. – с. 226-232.
4. Качество в производственных и социально-экономических системах [Текст]: сборник научных трудов 4-й Международной научно-технической конференции (21-22 апреля 2016 года)/ редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. - 365 с.
5. Петров, В.А., Экспериментальное определение интегральной степени черноты металлов и сплавов при высоких температурах [Текст] / В.А. Петров, В.Я. Чеховский, А.Е. Шейндлин // Теплофизика высоких температур. – 1964 г. - №2. – с. 24-29.
6. Гордон, А.Р., Определение интегральной степени черноты металлов в зависимости от степени шероховатости поверхности [Текст] / А.Р. Гордон, Г.Ф. Мучник // Теплофизика высоких температур. – 1964 г. - №2. – с. 292-294.
7. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] : изд. 2-е, стереотип. / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: «Энергия», 1977. – 344 с.
8. Абрамович, Б.Г. Интенсификация теплообмена излучением с помощью покрытий [Текст] / Б.Г. Абрамович, В.Л. Голдштейн. – М.: Энергия, 1997. – 250 с.

9. Зеньковский, А.Г. Высокотемпературные покрытия элементов печей для интенсификации теплообмена [Текст] / А.Г. Зеньковский, В.В. Чернов // Сталь. 2001. № 11. – с. 92 – 94.

10. Излучательные свойства твердых материалов. [Текст] : справоч. / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

11. Блинов, О.М. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] : учебник для вузов / О.М. Блинов, А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.

12. Невский, А.С. Влияние отражательной способности кладки на величину радиационного теплообмена [Текст] / А.С. Невский // Теплофизика высоких температур. – 1973. – Т. 11, № 5. – с. 1031 – 1036.

13. Мастрюков, Б.С. Влияние футеровки на радиационный теплообмен в пламенных печах [Текст] / Б.С. Мастрюков, А.П. Кузнецова, Н.П. Шутов // Теория и практика сжигания газа. – 1981. – Т. 7. – с. 138 – 146.

14. Пикашов, В.С. Интенсификация теплообмена в пламенных печах путем увеличения степени черноты обмуровки [Текст] / В.С. Пикашов, А.Е. Еринов, В.А. Великодный, Я.Б. Полетаев // Пром. теплотехника. – 1980, Т. 2. - № 4. с. 117 – 121.

15. Пикашов, В.С. Влияние степени черноты огнеупоров на эффективность излучения радиационных горелок [Текст] / В.С. Пикашов, А.Е. Еринов, В.А. Великодный, С.П. Гориславец, П.Н. Тимощенко // Химическая технология. – 1982. – № 1. – с. 32 – 35.

16. Пикашов, В.С. Влияние радиационных характеристик кладки и других параметров пламенного пространства на теплообмен в печах [Текст] / В.С. Пикашов, А.Е. Еринов, В.А. Великодный // Пром. теплотехника. – 1986. – Т. 8, № 2. – с. 104 – 109.

17. Кривандин, В.А. Пути интенсификации теплообмена в металлургических печах [Текст] / В.А. Кривандин // Тепломассообмен-6. – Минск: Ин-т тепломассообмена АН БССР, 1981. – Ч. 2. – с. 66 – 75.

18. Авчухов, В.В. Задачник по процессам тепломассообмена [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.В. Авчухов, Б.Я. Паюсте. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
19. Готовский, М.А. Теплообмен в технологических установках ЦБП [Текст] : учеб. пособие / М.А. Готовский, В.А. Суслов; СПб ГТУ РП. СПб., 2013. Часть 4. – 85 с.
20. Эккерт, Э.Р. Теория тепло- и массообмена [Текст] / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк : пер. с англ. под ред. А.В. Лыкова. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961. – 680 с. с черт. и илл.
21. Melanie Grote. Impact of Solid Body Emissivity on Radiative Heat Transfer Efficiency in Furnaces – a Numerical Study / Melanie Grote, Elmar Pohl, Primpuna Habib Saptogino, David Diarra // Energy Procedia 120 (2017) 628–634.
22. Paramonov, A.M. Heating furnaces efficiency improvement // Procedia Engineering 113 (2015) 181 – 185.
23. Z. Yi. Influence analysis of the furnace wall emissivity on heating process / Z. Yi, W-j. Zhang, Q-d. Yang, G-j. Li, H-g. Chen // Infrared Physics & Technology (2018).
24. Архипов, В.А. Измерение коэффициента излучения поверхности конструкционных и теплоизоляционных материалов / В.А. Архипов, И.К. Жарова, О.С. Татаринцева, В.Т. Кузнецов, В.Д. Гольдин // Ползуновский вестник № 4-1 2010, - с.233-236.
25. Guangrui Gao. Structure and Infrared Emissivity Properties of the MAO Coatings Formed on TC4 Alloys in K_2ZrF_6 -Based Solution / Guangrui Gao, Ying Li, Dan Hu, Zhengping Xi. // Materials 2018, 11, 254.
26. Завгородняя, О.С. Огнеупорные покрытия защитного действия для тепловых агрегатов различного типа / О.С. Завгородняя, А.Ю. Шевченко.
27. Bradley Adams. Impact of High-Emissivity Coatings on Process Furnace Heat Transfer / Bradley Adams, Martin Denison // AFRC 2014 Industrial Combustion Symposium.

28. Анисимов М.В. Экспериментальное определение интегральной степени черноты сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. / М.В. Анисимов, Д.В. Лычагин, В.С. Рекунов, Ж.Т. Таалайбеков // Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 5. - с.106–115.

29. Guangrui Gao. Influence of KMnO_4 Concentration on Infrared Emissivity of Coatings Formed on TC4 Alloys by Micro-Arc Oxidation / Guangrui Gao, Ying Li, Chaozhong Li, Dan Hu, Zhengxian Li // Materials 2017, 10, 1301.

30. Hui Tang. Influence of FeSO_4 concentration on thermal emissivity of coatings formed on titanium alloy by micro-arc oxidation / Hui Tanga, Tiezhu Xinb, Qiu Suna, Chuangui Yia, Zhaohua Jianga, Fuping Wanga // Applied Surface Science 257 (2011) 10839– 10844.

31. Таймаров, В.М. Исследование излучательной способности химических составов огнеупорных рецептур, принадлежащих системам Al_2O_3 - SiO_2 и $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ / В.М. Таймаров, М.А. Таймаров // Проблемы энергетики, 2008, № 11-12, - с.149-154.

32. Кривандин, В.А. Теплотехника металлургического производства. Т.1 Теоретические основы: Учебное пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. – М.: «МИСИС», 2002. – 608 с.

33. Колченко, Г. И. Спектральная степень черноты некоторых сплавов цветных металлов / Г. И. Колченко, Н. П. Кузнецова, В. А. Кривандин // ТВТ, 1983, том 21, выпуск 5. – с. 1021–1022.

34. Пикашов, В.С. Установка для определения интегральной нормальной излучательной способности материалов с низкими коэффициентами теплопроводности. / В.С. Пикашов, Е.М. Корень // ТВТ, 1979, том 17, выпуск 4. – с. 759-765.

35. Мастрюков, Б.С. Радиационные характеристики огнеупорных бетонов / Б. С. Мастрюков, А. П. Шутов, Н. П. Кузнецова // ТВТ, 1978, том 16, выпуск 4. – с. 761–764.

36. Xiaodong He. High emissivity coatings for high temperature application: Progress and prospect / Xiaodong He, Yibin Li, Lidong Wang, Yue Sun, Sam Zhang // *Thin Solid Films* 517 (2009) 5120–5129.

37. Li, Z. Study on $ZrSiO_4$ -aluminosilicate glass coating with high infrared emissivity and anti-oxidation properties. / Li, Z.; Zheng, F.; Gong, H.Q.; Hu, P.F.; Song, S.L.; Zhen, Q. // *Compet. Comm.* 2017, 4, 16–19.

38. Xu, Y.J. Preparation of PEO ceramic coating on Ti alloy and its high temperature oxidation resistance. / Xu, Y.J.; Yao, Z.P.; Jia, F.Z.; Wang, Y.L.; Jiang, Z.H.; Bu, H.T. // *Curr. Appl. Phys.* 2010, 10, 698–702.

39. Cheng, X.D. Infrared Radiation Coatings Fabricated by Plasma Spray. / Cheng, X.D.; Duan, W.; Chen, W.; Ye, W.P.; Mao, F.; Ye, F.; Zhang, Q. // *J. Therm. Spray Technol.* 2009, 18, 448–450.

40. Li, Q.B. Correlations between the growth mechanism and properties of micro-arc oxidation coatings on titanium alloy: Effects of electrolytes. / Li, Q.B.; Yang, W.B.; Liu, C.C.; Wang, D.A.; Liang, J. // *Surf. Coat. Technol.* 2017, 316, 162–170.

41. Huang, J.P. Highly enhanced infrared spectral emissivity of porous CeO_2 coating. / Huang, J.P.; Li, Y.B.; Song, G.P.; Zhang, X.J.; Sun, Y.; He, X.D.; Du, S.Y. // *Mater.Lett.* 2012, 85, 57–60.

42. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент / Под ред. Е.Е. Аметистова, В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. –512 с.

43. Чернов, В.В. Исследование и разработка способов интенсификации лучистого теплообмена в металлургических печах за счет повышения степени черноты поверхностей теплообмена. // Московский государственный вечерний металлургический институт (МГВМИ). – Москва 2004. – 130с.

44. Кузнецова Н. П., Серов В. В., Заболотный А. Р., Кривандин В. А. Тез. докл. конф.: Вопросы совершенствования тепловой работы и конструкций металлургических печей, Днепропетровск, 1981, с. 107.

45. Википедия. Свободная энциклопедия: Vantablack // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Vantablack> (дата звернення: 22.10.2019р.).