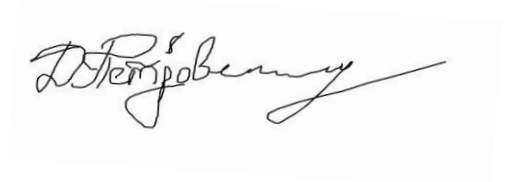


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Петров Дмитро Вікторович

A handwritten signature in black ink, appearing to read "D. Petrov", is centered on a light gray rectangular background.

УДК 666.221 : 681.7.031

**ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИЧНИХ КОЛЬОРОВИХ СТЕКОЛ
ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Спеціальність: 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Брагіна Людмила Лазарівна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Голеус Віктор Іванович,
Український державний хіміко-технологічний
університет, м. Дніпропетровськ,
перший проректор,
завідувач кафедри хімічної технології кераміки і скла;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Світличний Євгеній Олександрович
старший науковий співробітник інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Захист відбудеться «04» липня 2019 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.03 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «30» травня 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



Шабанова Г.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В теперішній час одним з важливих практичних застосувань оптичних стекел є підвищення якості сигналу оптико-електронних систем (ОЕС), які широко застосовуються у медичних дослідженнях, космології, кіно- та фотоприладах, військових системах наведення та ін. В ОЕС закодований сигнал передається на інфрачервоній довжині хвилі роботи передавача. Збільшення потужності сигналу підвищує його рівень, але при цьому відбувається погіршення чистоти та якості сигналу в схемі приймача, оскільки збільшення потужності прямо пропорційно збільшує шуми сигналу. Для їх усунення необхідна розробка спеціального оптичного кольорового скла, яке б повністю блокувало ультрафіолетову, видиму та ближню інфрачервону частини спектрів і максимально пропускало в інфрачервоній зоні (1000-1100 нм) для фільтрації сигналу високої якості.

Параметри існуючих оптичних стекел вказаного типу, які відносяться головним чином до дуже вартісних й нерентабельних германатних й селенідних складів, та нетехнологічність виробництва масової продукції з них не дозволяють повною мірою вирішити таку складну задачу. Тому розробка технології оптичних стекел спеціального призначення інфрачервоного діапазону спектру, вказаного вище, є актуальним науково-практичним завданням, яке визначило напрямки даної дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідної діяльності кафедри технології кераміки, вогнетривів скла та емалей НТУ «ХПІ» в межах держбюджетних НДР МОН України: «Розробка складів композиційних високоміцних склокристалічних матеріалів для елементів бронезахисту» (ДР № 0115U000538), «Розробка склокомпозиційних кальційсилікофосфатних матеріалів та покриттів для кісткового ендопротезування» (ДР № 0117U004889), а також в рамках госпдоговірної теми № 51668, де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у розробці складу та технологічних параметрів отримання нового типу оптичних кольорових стекел з високим рівнем пропускання (не менш 65%) у точці 1060 нм та максимально низьким рівнем пропускання у точці 950 нм для використання у сучасних оптико-електронних приладах для підвищення точності ОЕС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:
– проаналізувати науково-технічні літературні джерела щодо створення оптичних кольорових стекел інфрачервоного діапазону;

– обґрунтувати комплекс критеріїв оцінки оптичних властивостей та експлуатаційних характеристик стекол та розробити склад скломатриці - основи оптичних кольорових стекол на базі існуючих оптичних безкольорових стекол;

– обрати барвник, чи систему барвників, який би створював високий показник поглинання у видимій, УФ та ближній ІЧ (до 950 нм) частинах спектру та встановити залежності спектральних характеристик експериментальних складів оптичних стекол від кількості та пропорцій барвників і встановити закономірності регулювання спектральних характеристик оптичних кольорових стекол інфрачервоного діапазону;

– отримати оптичні деталі з нанесенням оптичних покриттів;
– розробити технологічні параметри отримання оптичних кольорових стекол інфрачервоного діапазону з необхідними спектральними та експлуатаційними показниками та провести промислово-дослідні роботи.

Об'єкт дослідження: кольорові оптичні стекла інфрачервоного діапазону спектру та технологічні параметри їх одержання.

Предмет дослідження: закономірності забарвлення оптичних кольорових стекол інфрачервоного діапазону та фізико-хімічні процеси, що протікають в них при виробництві у промислових умовах.

Методи дослідження. Визначення фізико-хімічних, оптичних та експлуатаційних властивостей модельних стекол та тонкоплівкових покриттів здійснювали з використанням стандартних та спеціальних методик, наведених у відповідному розділі, згідно з вимогами діючих нормативних документів до силікатних виробів та виробів з оптичного скла.

Дослідження здійснювали з використанням обладнання кафедри технології кераміки, вогнетривів скла та емалей НТУ «ХП», а також приладів та устаткування Інституту монокристалів НАНУ (м. Харків), дослідно-наукової лабораторії ДП «Ізюмський приладобудівний завод» (м. Ізюм).

Наукова новизна одержаних результатів.

Розроблено склади та визначено оптимальні технологічні параметри одержання оптичних кольорових стекол з нанесенням тонкоплівкових покриттів, що забезпечило їх повне поглинання в ультрафіолетовому, видимому та ближньому інфрачервоному (до 950 нм) спектрах та високу фільтрацію інфрачервоного сигналу.

Вперше:

– експериментально встановлено механізм процесів забарвлення стекол в системі $R_2O-PbO-SiO_2$ з комплексом барвників $Cr_2O_3-Mn_2O_3$, який полягає в окисно-відновному впливі цих барвників один на одного в залежності від

концентрації та зовнішніх умов за рядом Вейля-Варгіна, а також термічного впливу на валентний стан останнього барвника завдяки присутності у склі залишкового $\text{FeO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, та розроблені принципи корегування спектральних характеристик шляхом зміни концентрації та співвідношення цих барвників, що сприятиме створенню варіаційного ряду оптичних стекел з певним рівнем пропускання в інфрачервоному спектрі;

– встановлено закономірності впливу окисно-відновних процесів при варці оптичних стекел на стабілізацію валентного стану барвників, які полягають у забезпеченні окисної атмосфери в камері печі та введенні сполук-окисників, що дає змогу забезпечувати високі значення коефіцієнту поглинання у діапазоні до 950 нм;

– встановлено, що використання методу інерційного охолодження на етапі студки дозволяє отримувати високі значення однорідності оптичного скла (вихід придатної продукції >90% та коефіцієнт пропускання на довжині хвилі 1060 нм $\tau(\lambda_{1060}) > 65\%$, що дозволяє їх використовувати для фільтрації інфрачервоного випромінювання в оптоелектронних системах.

Практичне значення отриманих результатів для галузі оптичного скловиробництва полягає у тому, що на основі розроблених наукових положень створено оптичне кольорове скло інфрачервоного діапазону спектру спеціального призначення, яке було впроваджене на Державному підприємстві «Ізюмський приладобудівний завод».

При його виробництві у горшковій регенераторній печі застосовано метод інерційного охолодження на етапі студки, що забезпечило необхідну якість продукції та заощадження до 300 м³ природного газу на кожну варку такого скла.

Розроблено та впроваджено методики контролю якості скла, оптимального режиму перемішування під час його виробництва та відпрацьовано технологічні параметри (температура та тривалість варки, кількість обертів мішалки) одержання високоякісного оптичного скла без оптичних дефектів.

Створено комплекс автоматичного керування технологічними процесами регенераторної скловарної печі для зменшення впливу людського фактору.

Впровадження розроблених технологічних параметрів та режиму промислового виробництва оптичних кольорових стекел інфрачервоного діапазону дозволило отримати економічний ефект 573 165,6 грн./750 кг скла та високий вихід придатної продукції – 92%.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, викладені в дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані особисто здобувачем. До них відносяться: обробка та систематизація існуючих даних

щодо складів та технологій отримання оптичних кольорових стекол; формулювання об'єкту й предмету дослідження; узагальнення вимог до оптичних та експлуатаційних властивостей вказаних стекол й оптичних покриттів; аналіз критеріїв синтезу вихідної скломатриці; встановлення закономірностей регулювання спектрального поглинання системою барвників; підготовка зразків для проведення спектральних випробувань, РФА, тощо; розробка автоматичної системи керування та технологічних параметрів отримання створених стекол у виробництві.

Внесок співавторів спільних публікацій полягав в участі постановки мети і завдань дисертаційної роботи, участі в експериментальних дослідженнях, обговоренні, інтерпретації і узагальненні отриманих результатів, підготовці статей і доповідей за результатами роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародних та Всеукраїнських наукових, науково-технічних і науково-практичних конференціях: «Технологія та застосування вогнетривів та технічної кераміки у промисловості» (Харків, 2016); «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів» (Львів, 2016); «П'яті наукові читання ім. А.С. Бережного «Фізико-хімічні проблеми в технології тугоплавких та неметалевих матеріалів» до 90-річчя кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей» (Харків, 2016); «Львівські хімічні читання – 2017» (Львів, 2017); «Фізичні явища у твердих тілах» (Харків, 2017); «Modern Methods, Innovations, and Experience of Practical Application in the Field of Technical Science » (м. Радом, Республіка Польща, 2017); «BaltSilica 2018» (м. Ріга, Латвія, 2018); «MicroCAD-2018» (Харків, 2018); «Фізико-хімічні проблеми технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів» (Дніпро, 2018).

Публікації. Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи опубліковано у 18 наукових публікаціях, серед них 7 статей, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, одне з яких включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, 2 – у закордонних виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus; 11 тез – у матеріалах Всеукраїнських й Міжнародних конференцій.

Структура дисертації та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 170 сторінки друкованого тексту, з них – 57 рисунки по тексту, 22 таблиці по тексту, список використаних джерел з 134 найменувань на 8 сторінках і 4 додатки на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано науково-технічну актуальність роботи, сформульовано мету та завдання, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної інформації щодо загальної класифікації, властивостей та технологій отримання оптичних стекел, особливо сучасного стану технологій оптичних кольорових стекел. Серед безкольорових оптичних стекел були розглянуті германатні стекла ($B_2O_3-PbO-GeO_2$), а також оптичні стекла системи $CaO-Ga_2O_3$. Серед кольорових оптичних стекел розглянуті стекла марок ІЧС та безкисневі халькогенідні оптичні стекла. Спираючись на науково-технічні роботи проаналізовано стан технологій виготовлення та параметрів цих стекел, виявлені їх головні недоліки. З урахуванням отриманих даних відзначено доцільність створення нового типу оптичного скла за спектральними параметрами та поставлені задачі для досягнення цієї мети.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір напрямків, задач і методики досліджень процесів формування та властивостей розроблених модельних стекел та їх спектри поглинання. Наведена характеристика методів дослідження, матеріалів, обладнання та сформульована робоча гіпотеза.

Для варки експериментальних оптичних стекел була обрана лабораторна піч з карбідкремнієвими нагрівачами, що разом з теплоізоляційною конструкцією дозволило отримати температуру $1500+20$ °С, яка виявилась достатньою для протікання всіх етапів та процесів склоутворення. Вимірювання в'язкості здійснювали на віскозиметрах типу ІФ-35 та ІФ-41М за ОСТ 3-3045. Густина оптичного скла визначали за методом гідростатичного зважування. Коефіцієнти пропускання та поглинання визначали за ГОСТ 3520 на спектрофотометрі IRAffinity-1. Інфрачервону спектроскопію проводили на спектрофотометрі Фур'є Cary 630. Новоутворення в стеклах визначали методом РФА на дифрактометрі ДРОН 3-М. Температурний коефіцієнт лінійного розширення визначали за ГОСТ 10978-83 дилатометричним методом. Хімічну стійкість визначали за методами стійкості до кислот та вологи за ГОСТ 10134.3. Термостійкість скла визначали за методом А та Б за ГОСТ 25535. Всі методики, прилади та нормативно-технічна документація відповідають діючому ISO 9007:2015.

При складанні шихт для варки оптичних стекел використовувались природні сировинні матеріали та реактиви класифікації «о.с.ч.». Як сировинні матеріали використовувались: кварцова крупка, сурик свинцевий, калій азотнокислий, натрій азотнокислий, борна кислота, калій двохромовокислий, калій марганцевокислий.

Розрахунки спектральних показників та шихтового складу модельних стекел проведено з використанням комп'ютерної обробки у пакетах Microsoft Excel, MathCAD та Origin. Розробку програми автоматичного керування технологічними процесами горшкової печі проведено у середовищі Unity Pro.

У **третьому розділі** наведені результати експериментальних досліджень

залежності поведінки барвників у скломатриці системи $R_2O-PbO-SiO_2$. Основними критеріями для вибору скломатриці серед існуючих безкольорових оптичних стекел обрано: 1 – високий коефіцієнт пропускання на довжині хвилі 1060 нм (90-98%); 2 – хімічна стійкість категорії А1; 3 – термічна стійкість вище 80 °С; 4 – технологічність у масовому виробництві; 5 – економічна доцільність запропонованих технологічних рішень. Аналіз технічних досліджень показав, що серед існуючих безкольорових оптичних стекел всі параметри задовольняє група стекел КФ. Пропускання на довжині хвилі $\tau(\lambda)_{1060} = 91\%$, термостійкість більше 80 °С, хімічна стійкість відповідає категорії А1.

Виявлено незначний вплив на значення коефіцієнту пропускання на довжині хвилі 1060 нм оптичної скломатриці в залежності від присутності компонентів B_2O_3 , ZnO та Al_2O_3 (табл. 1, рис. 1).

Додатково визначено, що прозорість на цій довжині хвилі також залежить від наявності оксиду заліза у розплаві, який присутній як домішок сировинних матеріалів. Для компенсації цього впливу запропоновано використовувати кварцову крупку замість кварцового піску.

Таблиця 1 – Склад матриці оптичних кольорових стекел

Назва оксидного компоненту складової шихти	Масова частка компонента, %, у стеклах марок:		
	ОС-1	ОС-2	ОС-3
SiO_2	61-69		
PbO	9-18		
K_2O	8-15		
Na_2O	2-8		
B_2O_3	0-5	-	
ZnO	-	0-5	
Al_2O_3	-	-	0-5

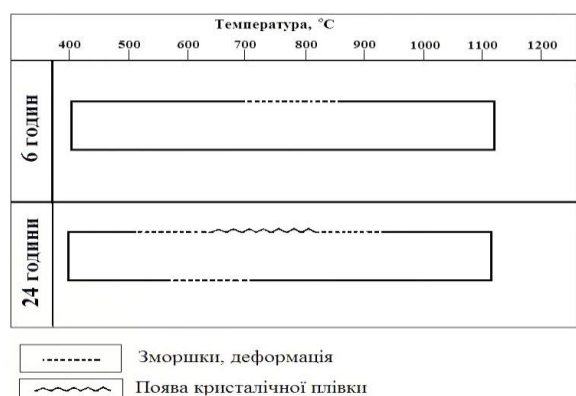


Рисунок 1 – Визначення кристалізаційної здатності оптичної скломатриці, де:
1 – Поява перших ознак зміни поверхні (зморшки, деформація); 2 – Поява кристалічної плівки

Дослідження кристалізаційної здатності модельного скла ОС-1 дозволили встановити (рис. 1), що при 24-годинній витримці у температурному діапазоні 650-810 °С з'являються I-II картини плівкової кристалізації. Наявність кристалічної плівки після тривалої термічної обробки та відсутність об'ємної кристалізації стверджують про його технологічність при отриманні на виробництві.

Для надання оптичній скломатриці необхідних спектральних властивостей

проведені дослідження спрямовані на вибір барвника, який би мав високий показник поглинання в УФ, видимому та ближньому ІЧ спектрах (до $900 \div 950$ нм) та високий коефіцієнт пропускання у діапазоні 1060 ± 20 нм.

При дослідженні патентів та технічної літератури виявлено, що для надбання необхідних спектральних характеристик жоден барвник не може виконати такої умови. Для створення такої спектральної кривої обрана система з двох барвників – Cr_2O_3 та Mn_2O_3 . Спектральні дослідження барвників щодо їх поведінки у системі $\text{R}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ показали (рис. 2), що спектральне поглинання Cr_2O_3 характеризується своєю дією у діапазоні від

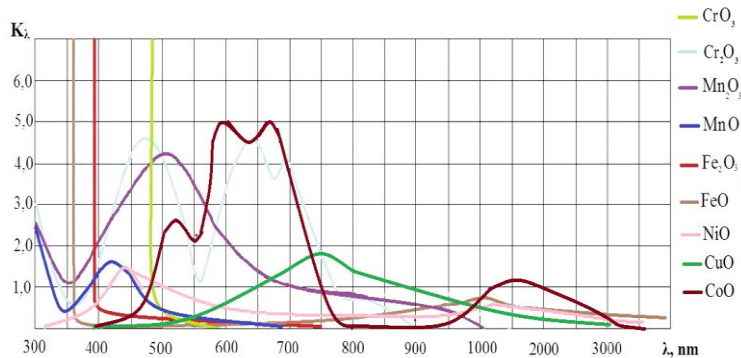


Рисунок 2 – Спектральні криві поглинання елементів CrO_3 , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , FeO , CuO , CoO у скломатриці системи $\text{R}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$

280 до 800 нм з піками поглинання у точках 440 нм та 650 нм.

Спектральне поглинання Mn_2O_3 характеризується своєю поглинальною дією у діапазоні від 280 до 1040 нм з піками поглинання у точці 480 нм. Підтверджено, що оксид феруму (II) має високий рівень поглинання у діапазоні $1050 \div 1100$ нм, що є визначальним фактором для

його максимального усунення зі скла через зниження рівня інфрачервоного сигналу у цій області.

При зіставленні результатів досліджень залежності спектрального забарвлення від заряду іону метала-барвника, можна зробити висновок, що для збереження необхідних спектральних характеристик у розплаві необхідно підтримувати окисне середовище. Для забезпечення цієї умови частина компонентів вводилась до складу шихти скла через нітратні сполуки, що додатково підтримують окисне середовище у розплаві.

Окрім того додатковим ускладнюючим фактором виявилась іонна взаємодія між основними барвниками. Ці два барвники та домішок-барвник у вигляді оксида заліза за рядом Вейля впливають один на одного з точки зору валентного стану. CrO_3 є окисником для MnO , а відповідно MnO є відновником відносно CrO_3 . Mn_2O_3 є окисником для FeO , а FeO , відповідно, є відновником відносно Mn_2O_3 . Для виявлення всіх необхідних балансових умов валентного стану були проведені спектральні дослідження з виявлення основних залежностей спектральних характеристик від кількості та концентрації барвників з урахуванням негативного впливу оксиду заліза. В усіх експериментах для забезпечення валентного оксид хрому вводився у склад суміші для виробництва скла у найвищій валентності через $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Дослідження поглинальної дії у склі з різним вмістом оксиду марганцю

при сталому вмісті оксиду хрому встановили (рис. 3), що різкий ріст поглинання у діапазоні 850÷1000 нм спостерігається лише з вмістом Mn_2O_3 від 3 мас. %. Наступне збільшення концентрації барвника не дає екстремальних збільшень поглинання у цьому діапазоні. Збільшення

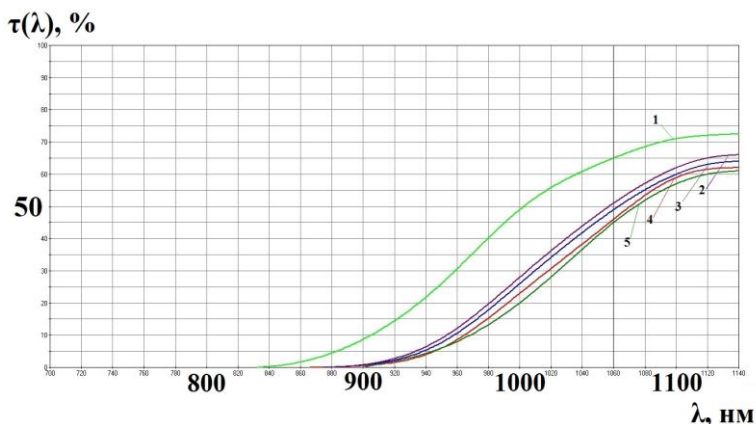


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту пропускання в ІЧ спектрі від концентрації Mn_2O_3 , з постійним вмістом (1,5÷2 %) Cr_2O_3 , де доля Mn_2O_3 :

1 – 0,5÷1,5 %; 2 – 3÷4 %;

дія оксиду хрому є більш ефективнішою, що призводить до зсуву рівноваги $MnO-Mn_2O_3$ у бік останнього. За фактом, поглинальна дія більшої концентрації оксиду мангану при його зменшенні перейшла у якісний фактор, завдяки зсуву балансу від MnO до Mn_2O_3 . Представлена залежність коефіцієнту пропускання від концентрації оксиду хрому при сталому вмісті оксиду мангану (рис. 4) показала незначне зростання (4%) цього коефіцієнту у діапазоні 950-1100 нм.

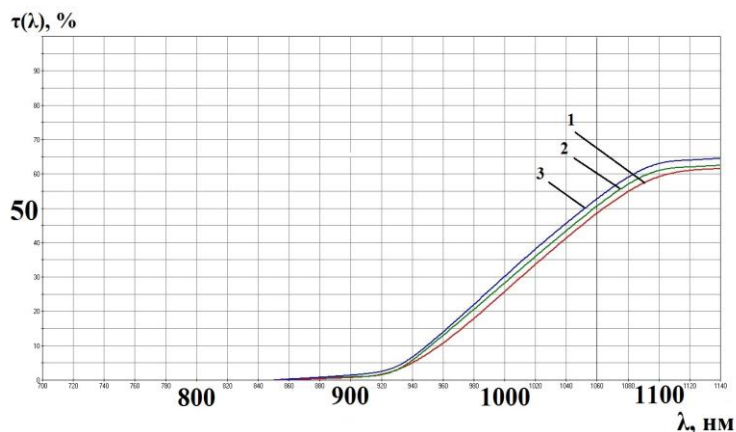


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнту пропускання в ІЧ спектрі від концентрації Cr_2O_3 , з постійним вмістом (5%) Mn_2O_3 , де доля Cr_2O_3 : 1 – 1,45÷1,75%; 2 – 1,2÷1,5%; 3 – 0,8÷1,2 %.

концентрації оксиду марганцю перебиває діапазон, близький до точки 1060 нм, але водночас і зменшує пропускання в цій же точці.

Аналіз спектральних вимірювань виявив, що зменшення концентрації оксиду марганцю від 8 мас. % до 4 мас. % не призводить до різкого збільшення коефіцієнту пропускання на довжині хвилі 1060 нм. Припускається, що зі зменшенням концентрації оксиду мангану окислювальна

На основі цього можна зробити висновок, що концентрація оксиду хрому не є пріоритетним фактором для корегування спектральних характеристик на довжині хвилі 1060 нм. Він виступає головним чинником для підтримання поглинальної дії у діапазоні до 850 нм та окисником для оксиду мангану.

У ході аналізу отриманих даних можна зробити висновки, що відомі

положення В. Вейля та В. В. Варгіна не повністю описують поведінку оксиду мангану як барвника, вказуючи при цьому верхню межу поглинальної дії 1040 нм. В отриманих результатах поглинальна дія подовжується за точку

1040 нм. Окрім цього додається поглинальна дія оксиду феруму (II), що також зупиняє ріст пропускання світла в точці 1060 нм. Отримані результати дозволили корегувати необхідні концентрації барвників для надання оптичному склу необхідного коефіцієнту пропускання на довжині хвилі 1060 нм в залежності від умов роботи оптоелектронної системи.

Використання термічної обробки під час пресування виявило температурний вплив на спектральні характеристики (табл. 2). Зміни коефіцієнту пропускання на довжині хвилі спостерігались при температурах вище за 780 °С. При 800 °С значення коефіцієнту пропускання у точці 1060 нм зростає на 2,1%, а значення коефіцієнту пропускання у точці 950 нм – на 0,2 %. Екстремумом часу термічної витримки є 4 хвилини. Після витримки протягом цього часу значення коефіцієнту пропускання у точці 1060 нм зростає на 4,9 %. Збільшення коефіцієнту пропускання не спостерігається зі збільшенням часу витримки скла у печі термічної обробки.

Таблиця 2 – Залежність спектральних характеристик від температури

Час τ , хв.	Температура, Т°С	Коефіцієнти пропускання до термічної обробки, %		Коефіцієнти пропускання після термічної обробки, %	
		τ_{950}	τ_{1060}	τ_{950}	τ_{1060}
2	600	8,5	51,5	8,3	51,4
	650			8,3	51,5
	680			8,4	51,4
	700			8,4	51,2
	750			8,4	51,3
	780			8,4	51,4
	800			8,9	53,6
	820			8,7	52,2

Дослідження впливу системи барвників на поглинальну дію у склі показали, що оптимальною концентрацією барвників складає Cr_2O_3 – 0,5÷1,5 % та Mn_2O_3 – 4÷7 %. При таких концентраціях коефіцієнт пропускання склав $\tau(\lambda_{1060}) = 65$ %. При зменшенні концентрацій оксиду марганцю збільшується коефіцієнт пропускання на довжині хвилі 1060 нм, але при цьому також збільшується коефіцієнт пропускання у точці 950 нм. Для створення повного поглинання в останній точці були проведені роботи з нанесення оптичного покриття.

Для створення чіткого прецизійного сигналу завдяки збільшенню поглинання в інфрачервоному спектрі додатково наносяться оптичні покриття (рис. 5). Аналіз досліджень з тонкоплівкових матеріалів виявив α -Si найкращим матеріалом для створення необхідних спектральних характеристик завдяки своїй пропускну здатності з довжини хвилі ~1000 нм.

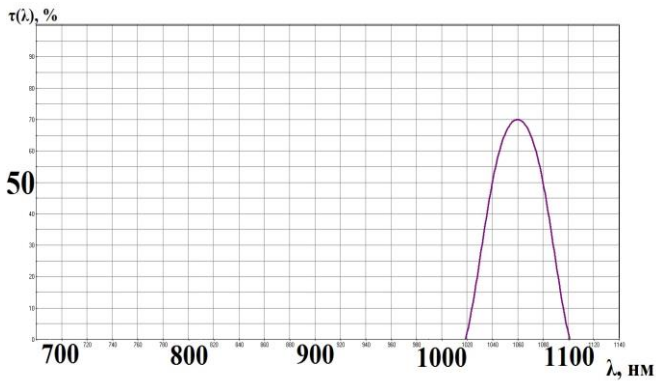


Рисунок 5 – Спектральна характеристика оптичного скла ГЧС-611 з покриттям α -Si/SiO товщиною 11

покриття α -Si/SiO коефіцієнт пропускання склав $\tau(\lambda_{1060}) \approx 70\%$, при цьому до точки 1020 нм та після 1100 нм оптична деталь має повне поглинання.

Для впровадження скла у виробництво були проведені роботи з дослідження основних технологічних параметрів: в'язкісні характеристики (рис. 6); густина оптичного скла $\rho = 2,77 \text{ г/см}^3$; температурний коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 99,1 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; відносна твердість за шліфуванням $S_R=0.89$.

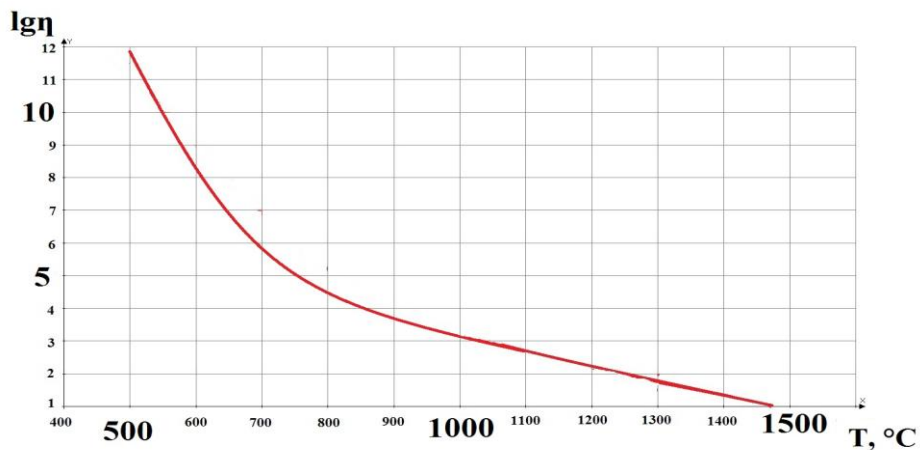


Рисунок 6 – Залежність логарифму в'язкості скла від температури скла

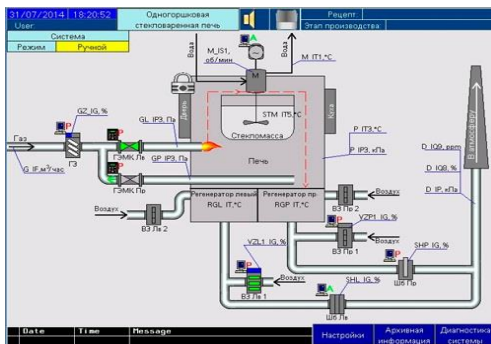


Рисунок 8 – Схема автоматичного контуру регулювання

Використання у якості покриття силіцію монокристалічного при нанесенні його на оптичну підкладку мають два піка пропускання: в діапазоні $1060 \pm 20 \text{ нм}$ (до 90%) та більш менший (до 45 %) в діапазоні 650-800 нм. Завдяки виявленим залежностям між концентрацією системи барвників, механізмів забарвлення та поглинальної дії у склі було розроблено скло з максимально можливим $\tau(\lambda_{1060}) \approx 78\%$. Після нанесення оптичного

У четвертому розділі розроблені основні технологічні принципи одержання оптичного кольорового скла інфрачервоного діапазону. Виробництво оптичного скла відбувалось у горошковій регенераторній печі з автоматичним контуром керування технологічними процесами (рис. 8). Розроблено алгоритм роботи програмного коду мовою LD для промислового контролера Schneider Electric. Пріоритетними технологічними параметрами обрані

температура, тиск та атмосфера у камері печі. Об'єм керамічного горшку (глина - 10-12%, каолін - до 12%, шамот - до 35%, горшковий бій - 45-50%) складав 500 л.

Встановлено, що важливим фактором є положення мішалки відносно висоти керамічної судини (рис. 9). Процеси перемішування та напрям руху

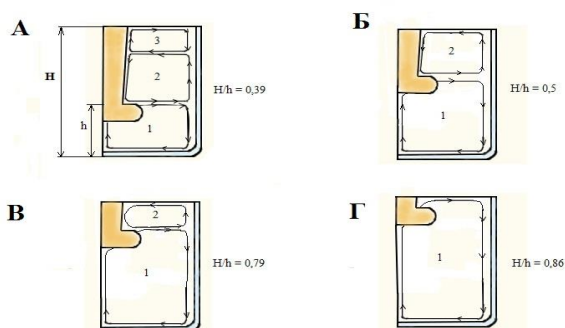


Рисунок 9 – Залежність розподілу потоків скломаси від висоти встановлення керамічної мішалки

горшку. Перемішування у такому положенні сприяє швидкості звільнення пазирів зі скломаси завдяки знаходженню пазиря у найбільшій контактуванню на межі трьох фаз (повітря-кераміка-розплав).

Для підтримання оптимальних умов протікання процесів гомогенізації та освітлення був розроблений режим перемішування керамічною мішалкою, який враховує особливості розподілу потоків скломаси.

Створені методики виявлення ознак порушення геометричних форм мішалки за траєкторією пінного кільця під час перемішування на етапі освітлення дозволили запобігти потраплянню звелей у скломасу, які, окрім погіршення оптичних сталих (показник заломлення, дисперсія та ін.), призводять до нестабільності значень спектральних характеристик готового скла. Оскільки контролювання звелей в такому типу скла неможливе під час первинного контролю, то застосування цих методик дозволяє зменшити кількість браку, час обробки та контролю деталей.

Було спростовано гіпотезу проведення етапу охолодження кольорових оптичних стекол за допомогою зменшення інтенсивності полум'яного простору в камері печі, яка пояснювалась специфічним розподілом температур в об'ємі скломаси кольорових стекол. На практиці такий підхід до охолодження скломаси викликає низку технологічних проблем, які частково призводять до браку продукції, завдяки нестабільності окисної атмосфери в силу конструктивних та технологічних особливостей. Створення відновної атмосфери впливає на валентний стан барвників на поверхні розплаву скломаси, що під час перемішування потрапляє в її середину. Скло після такого етапу має нерівномірність розподілу за спектральними характеристиками та призводить до браку продукції до 85 %.

Впровадження методу інерційного охолодження скломаси при

потоків залежать від висоти мішалки відносно рівня розплаву у сосуді.

При розташуванні мішалки у середньому положенні утворюються два потоки: верхній, що має напрям від стінок до мішалки, та нижній, спрямований від мішалки до стінок. При положенні мішалки приблизно на 86 % за висотою від дна судини утворюється один єдиний потік, що має напрям руху від мішалки до стінок

виробництві оптичного кольорового скла дозволило зменшити процент браку продукції з 85-ти % до 20-ти %, а також скоротити витрати на енергоносії. Розроблений технологічний режим виробництва створеного оптичного кольорового скла (рис. 10) забезпечив отримання склоблоку вагою 750 кг з процентом виходу придатної продукції 92 %.

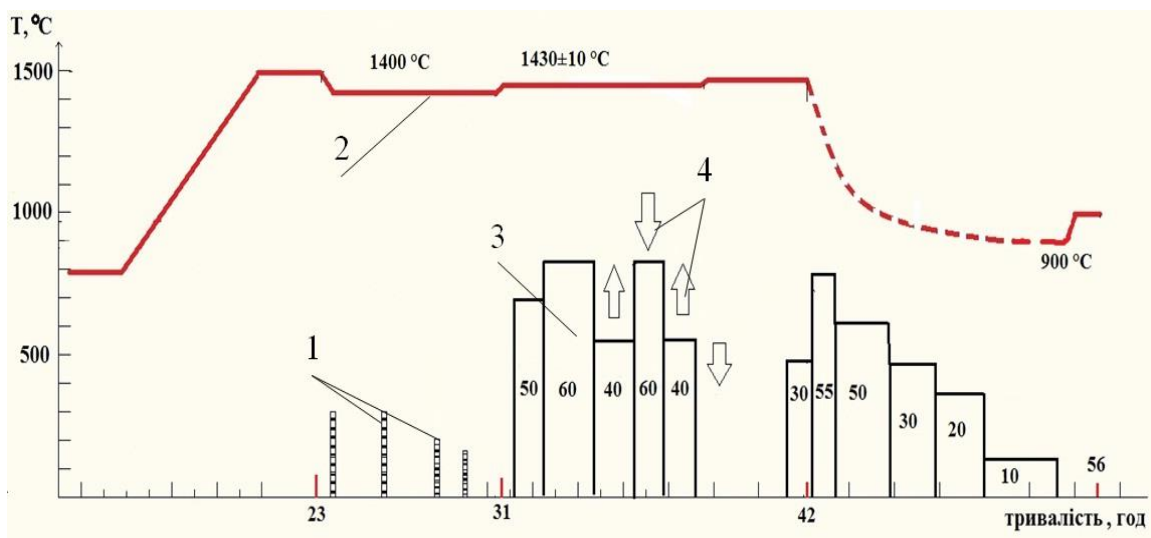


Рисунок 10 – Технологічний режим виробництва оптичного кольорового скла ІЧС-611: 1 – засипка шихти; 2 – температурна крива; 3 – оберти мішалки; 4 – підйом та опускання мішалки

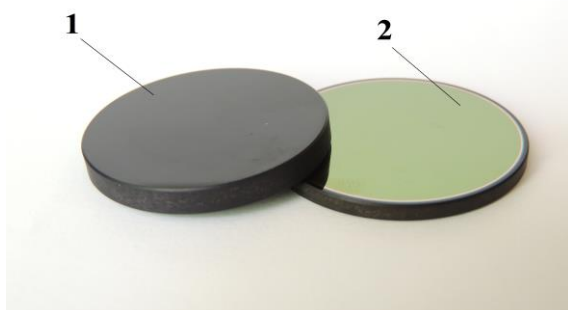


Рисунок 11 – Оптичні деталі з ІЧС-611 діаметром 42 мм та висотою 4 мм без оптичного покриття (1) та 2,5 мм з оптичним покриттям (2)

Подальша обробка основного склоблоку виявлялась його розпилі на горизонтально-фрезерному станку 6P81 за допомогою алмазного інструменту. Формування деталей можливе двома шляхами: механічною обробкою на окружному станку типу та пресуванням. Шліфування відбувалось на станку 3Д756 із додаванням наступних абразивних матеріалів: електрокорунд (Ф120, Ф180, Ф320, Ф500), полярит та церій. Нанесення оптичних покриттів (рис. 11) відбувалось у вакуумній установці ВУ-1А.

У п'ятому розділі наведені результати виконаних робіт щодо впровадження оптичного кольорового скла та технології його виготовлення (рис. 11). Наведена інформація про ефективність та доцільність впровадження такої технології у виробництво за рахунок зменшення дефектних звельних шарів в основному склоблці, а також використання методик контролю якості у виробництві.



Рисунок 11 – Послідовність технологічних операцій одержання деталей з розробленого оптичного скла ІЧС-611

Проведено економічне обґрунтування собівартості продукції розробленого оптичного скла з детальним розписом фінансових статей, а також порівняльний аналіз інших оптичних стекел, що попередньо виготовлялись. Вивчено потенційний ринок споживачів продукції з розробленого скла, а також встановлено напрямки подальших досліджень, які спрямовані на зменшення часу виготовлення деталі та її собівартості. У додатках наведено протокол засідання науково-технічної ради ДП «Ізюмський приладобудівний завод», програма розробки інфрачервоних стекел, акт впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво, акт впровадження у навчальний процес та список публікацій здобувача.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу створення оптичного кольорового силікатного скла інфрачервоного діапазону з коефіцієнтом пропускання на довжині хвилі 1060 нм $\tau(\lambda_{1060}) > 65\%$ та повним поглинанням у діапазоні до 950 нм шляхом встановлення оптимальних концентрацій барвників та механізму надання спектральних характеристик за допомогою нанесення оптичного покриття α -Si/SiO. Розроблені технологічні параметри отримання таких стекел дозволяють виробляти їх у промислових масштабах.

1. Аналіз науково-технічної та патентної літератури виявив недоліки

існуючих оптичних кольорових стекол, що працюють в системах інфрачервоного діапазону, а також визначив перспективність розробки оптичних кольорових стекол з високим пропусканням у точці 1060 нм та повним поглинанням до 950 нм.

2. Обґрунтовано комплекс критеріїв до оптичної скло матриці, який включає: високе пропускання на довжині хвилі 1060 нм ($\tau_{\lambda 1060} > 90\%$), хімічну стійкість класу А1, термостійкість більше 80°C, відсутність об'ємної кристалізації, а також технологічність у масовому виробництві. Розроблено склад скломатриці на основі оптичного безкольорового скла групи КФ у системі $R_2O-PbO-SiO_2$, яка задовольняє вказаному комплексу критеріїв.

3. Обрано систему барвників $Cr_2O_3-Mn_2O_3$ та вивчено залежність спектральних характеристик скла від кількості й пропорції цих барвників. Враховано вплив на спектральні характеристики таких домішок-барвників, як FeO та Fe_2O_3 . Встановлено закономірності регулювання спектральних характеристик шляхом підтримання необхідного редокс-потенціалу атмосфери та склорозплаву. Виявлено особливості впливу термічної обробки на спектральні характеристики оптичного скла із системою барвників $Cr_2O_3-Mn_2O_3$ та встановлено її оптимальний режим (температура 800°C, 4 хвилини). В залежності від часу витримки та температури можлива зміна коефіцієнту пропускання у точці 1060 нм завдяки частковому переходу FeO до Fe_2O_3 , та частковому переходу Mn_2O_3 до MnO. Оптимальним режимом термічної обробки є температура 800°C протягом 4 хвилин. На основі отриманих даних впроваджений та відпрацьований режим пресування заготовок з розробленого оптичного скла.

4. Отримані оптичні деталі з нанесенням оптичних покриттів на основі матеріалу $\alpha-Si/SiO$. Виявлені оптимальні параметри нанесення плівкового матеріалу на деталь зі створеного скла. Встановлено вплив термічної обробки на деталі із оптичним покриттям.

5. Розроблено технологічні параметри отримання оптичного кольорового скла ІЧС-611 у виробництві. Виявлені основні технологічні залежності під час виробництва у горшковій регенераторній печі, а саме: вплив розподілу потоків від руху лопатей мішалки на утворення звелей та часу етапів гомогенізації та освітлення; вплив теплового середовища на етапі охолодження на однорідність оптичного скла. Вперше проведений етап охолодження скла інерційним методом під час виробництва кольорового оптичного скла.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХП» в курсах «Виробництво скла, емалей та захисних покриттів», «Хімічна технологія спеціальних стекол та біостекол», «Сучасні технології в галузі». Практичні результати дисертаційної роботи впроваджено на ДП «Ізюмський приладобудівний завод», що дозволило збільшити вихід придатної продукції до 92% та суттєво покращити спектральні параметри, економічний ефект від впровадження оптичного скла ІЧС-611 у виробництво склав 573 165,6 грн./750 кг оптичного скла.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петров Д.В. Вплив в'язкості на формування структури оптично прозорих склокристалічних матеріалів на основі дисилікату літію в процесі термічного оброблення / О.В. Саввова, В.Л. Топчий, Ю.О. Смирнова, Д.В. Петров // Вопросы химии и химической технологии. – №6. – 2017. – С. 89-96. *Здобувачем проведені дослідження з кристалізаційної здатності скла.*

2. Petrov D.V. Technological Aspects of the Production of Optically Transparent Glass Ceramic Materials Based on Lithium-Silicate Glasses / O.V. Savvova, L.L. Bragina, D.V. Petrov, V.L. Topchii, S.A. Ryabinin // Glass and Ceramics. – 2018. – Vol. 75. – P. 127-132.

Здобувачем досліджено технологію виробництва оптичного скла в малому обсязі.

3. Petrov D. Study of the Performance Characteristics of Erbium-Containing Laser Glasses / L. Bragina, D. Petrov, N. Kovalenko, S. Philonenko // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 788. – P.114-119.

Здобувачем проаналізований стан технології виробництва оптичних лазерних стекол та запропонований альтернативний метод видалення гідроксильних груп з розплаву.

4. Петров Д.В. Особливості формування оптичних виробів складної конфігурації / В.М. Петров, Д.В. Петров, Л.Л. Брагіна, С.В. Філоненко, С.О. Олим // Вісник НТУ «ХП», Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – №22 (1194) – С. 136-139.

Здобувачем проаналізовані існуючі та запропоновані нові методи формування оптичного скла.

5. Петров Д.В. Оптимизация режимов работы печи производства тугоплавкого оптического стекла в керамических сосудах / Д.В. Петров, Л.Л. Брагіна, С.В. Філоненко // Збірник наукових праць ПАТ «УКРНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного» №116. – Харків: ПАТ «УКРНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного», 2016. – С. 145-152.

Здобувачем розроблені та впроваджені температурні параметри технологічних етапів засипок, освітлення та гомогенізації під час виробництва оптичного скла для оптимального протікання вищевказаних процесів із мінімальними витратами на енергоносії.

6. Петров Д.В. Виробництво оптичного скла 1-ої категорії пузирності у керамічних судинах / Д.В. Петров, Л.Л. Брагіна, С.В. Філоненко // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2017 – № 53 (1274). – С. 132-136.

Здобувачем розглянуто технології виготовлення оптичного скла з вимогами до пузирності першої категорії та доповнено новими технологічними методами за для забезпечення цього параметру.

7. Петров Д.В. Дослідження спектральних властивостей скломатриці оптичного кольорового скла для інтерференційного фільтру / Д.В. Петров, Л.Л. Брагіна, С.В. Філоненко // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в

сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 32 (1254). – С. 139-143.

Здобувачем досліджений вплив оксидних компонентів скла на його спектральний коефіцієнт пропускання у точці 1060 нм.

8. Петров Д.В. Экологические проблемы при производстве цветных и бесцветных оптических стекол / Д.В. Петров, Л.Л. Брагина, С.В. Филоненко, А.М. Петрова // Сборник статей 1-й Международной научно-технической интернет-конференции «Ключевые проблемы безопасности и развития природно-промышленных систем», декабрь 2015. – Орел: ПГУ, 2016. – С. 214-223.

Здобувачем розглянуті основні вимоги до виробництва оптичних стекол з точки зору санітарних та екологічних норм.

9. Петров Д.В. Автоматизация процесса вывода стекловаренных керамических сосудов / Д.В. Петров, Л.Л. Брагина, С.В. Филоненко // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности». – Харьков: Оригинал, 2016. – С. 60-61.

Здобувачем розроблено програму автоматичного керування горшкової печі для етапу виводки керамічної судини з проведенням необхідного режиму спікання для неї у виробництві оптичного скла.

10. Петров Д.В. Особливості виробництва високотемпературного оптичного скла у горшкових регенераторних печах/ Д.В. Петров, Л.Л. Брагина, С.В. Філоненко // Тези доповідей III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів». – Львів.: Растр-7, 2016. – С. 23-24.

Здобувачем розглянуті основні недоліки виробництва у горшковій печі, а також запропоновані методи для їх компенсації.

11. Петров Д.В. Оптичні ситали для захисту озброєння та спеціальної техніки/ О.В. Саввова, В.Л. Топчий, Л.Л. Брагіна, О.В. Бабіч, Д.В. Петров// Тези доповідей V Міжнародної конференції «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 11-12 жовтня 2017 року. – Київ, 2017. – С. 189-191.

Здобувачем проведені дослідження по виявленню оптимальних температур термообробки заготовок з оптичного скла.

12. Петров Д.В. Проблеми створення оптичного скла з високим показником пропускання в інфрачервоному спектрі 3000-5000 нм/ Д.В. Петров, Л.Л. Брагина, Ю.С. Гордєєв, С.В. Філоненко // Матеріали XIII Міжнародної конференції «Фізичні явища в твердих тілах», 5-8 грудня 2017 р.– Харків: ХНУ, 2017. – 90 с., 176 с.

Здобувачем проаналізовані існуючі стекла інфрачервоного спектру та технології їх виготовлення та запропоновані рішення з вдосконалення їх властивостей та підвищення технологій їх виробництва.

13. Петров Д.В. Проблеми створення зміцнених пластин з оптичного скла зі збереженням площинності робочих поверхонь/ Д.В. Петров,

Л.Л. Брагіна, С.В. Філоненко // International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences». – Radom: Radom Academy of Economy, 2017. – P. 194-198.

Здобувачем розглянуті існуючі методи гартування скла та запропоновані методи контролю якості поверхневих параметрів заготовки з оптичного скла.

14. Петров Д.В. Вплив розподілу потоків мішалки на технологічні процеси оптичного скловаріння / Д.В. Петров, Л.Л. Брагіна, С.В. Філоненко // Збірник тез «Львівські хімічні читання – 2017». – Львів.: ЛНУ ім. Івана Франка, 2017. – У26 с.

Здобувачем виявлений вплив розподілу потоків скломаси від обертів мішалки на якість скла за показником звельності. Розроблено режим перемішування при якому збільшується вихід гідної продукції з сировинного оптичного скла.

15. Петров Д.В. Літійсилікатні склокристалічні матеріали з високим світло пропусканням/ О.В. Саввова, В.Л. Топчий, Д.В. Петров // Збірник тез «Львівські хімічні читання – 2017». – Львів.: ЛНУ ім. Івана Франка, 2017. – У47 с.

Здобувачем проведені дослідження зі спектральних характеристик у видимому діапазоні 380-750 нм оптичної скломатриці системи Li_2O-SiO_2 .

16. Petrov D. Study of Performance Characteristics of Erbium-Containing Laser Glasses / L. Bragina, D. Petrov, N. Kovalenko, S. Philonenko // Book of Abstracts. 8th International Conference on Silicate Materials “BaltSilica 2018”. – Riga: RTU Publishing House, 2018. – P. 54-55.

Здобувачем досліджені основні залежності люмінесцентних властивостей стекол від різної концентрації РЗЕ (Cr_2O_3 , Yb_2O_3 , Er_2O_3), а також досліджений вплив на ці властивості –ОН груп.

17. Петров Д.В. Струмопровідні плівки для прозорих ситалових поглиначів електромагнітного випромінювання / В.Л. Топчий, О.В. Саввова, Л.Л. Брагіна, Д.В. Петров // Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції «MicroCAD-2018». – Харків: НТУ «ХП», 2018. – С. 320.

Здобувачем розроблений режим виробництва підкладок з оптичного скла для нанесення струмопровідних плівок.

18. Петров Д.В. Особливості процесів гомогенізації та освітлення у горшковій печі при виробництві оптичного скла / Д.В. Петров, Л.Л. Брагіна, С.В. Філоненко, А.М. Петрова // Матеріали міжнародної наукової конференції «Фізико-хімічні проблеми технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів». – Дніпро: Середняк Т. К., 2018. – С.40-41.

Здобувачем обґрунтовані основні проблеми виробництва оптичного скла у горшкових печах на етапах освітлення та гомогенізації, а також впроваджені технологічні режими для усунення цих проблем.

АНОТАЦІЇ

Петров Д.В. Технологія оптичних кольорових стекел інфрачервоного діапазону спеціального призначення. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (Ph.D) за спеціальністю 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.

Дисертація присвячена створенню оптичних кольорових стекел зі спектральними параметрами – коефіцієнтом пропускання на довжині хвилі 1060 нм $\tau(\lambda_{1060}) > 65\%$, поглинанням у спектральному діапазоні до 950 нм та технологіям їх отримання. На цей час існуючі стекла лише частково виконують ці умови, або технології їх отримання є нерентабельними для масового виробництва, тому було поставлена задача про створення стекел, які б могли задовольняти ці умови з фактором технологічності у виробництві. Вирішення досягнуто завдяки дослідженням поглинальної дії системи барвників $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3$ у системі $\text{R}_2\text{O-PbO-SiO}_2$ та додатковому нанесенню оптичного покриття. Завдяки дослідженням було встановлено механізми забарвлення з урахуванням впливу домішок-барвників ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$), а також знайдені оптимальні концентрації барвників у склі.

При розробці технології отримання оптичного кольорового скла були дослідженні основні технічні операції та методи контролю якості скла, що дозволяє отримувати дане скло у виробничому масштабі. Розроблені параметри контролю протікання процесів гомогенізації та освітлення розплаву скла з метою підвищення якості продукції. Також були розроблені методики обробки деталей зі скла та нанесення оптичних покриттів. Для автоматизації виробництва даної продукції та зменшення впливу людського фактору було розроблено програмне забезпечення автоматичної системи керування технологічними процесами (АСК ТП).

Ключові слова: технологія оптичного скловиробництва, інфрачервоний спектр, коефіцієнт пропускання, оксидні стекла, іонне забарвлення, обробка оптичних деталей, регенераторна горшкова піч, автоматизація виробництва, вакуумні оптичні покриття, оптоелектронні системи.

Петров Д. В. Технология оптических цветных стекел инфракрасного диапазона специального назначения. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (Ph.D) по специальности 05.17.11 – технология тугоплавких неметаллических материалов. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2019.

Диссертация посвящена разработке инфракрасных оптических стекел со спектральными характеристиками – коэффициенту пропускания на длине волны 1060 нм $1060 \tau(\lambda_{1060}) > 65\%$, поглощением в спектральном диапазоне до 950 нм, а также созданию технологий их производства. Решение данной задачи было достигнуто благодаря добавлению системы красителей $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}$

Mn_2O_3 в стекломатрицу системы $R_2O-PbO-SiO_2$, а также дополнительному нанесению оптических покрытий. Исследования влияний поглощений красителей на спектральные характеристики позволили определить оптимальное их содержание в стекломатрице с учетом влияния красителей-примесей.

При разработке технологий изготовления инфракрасных стекол были установлены оптимальные параметры и условия протекания технологических процессов гомогенизации и осветления, а также внедрены параметры контроля качества стекла во время варки, которые позволяют увеличить выход годной продукции. Также была разработана методика обработки заготовок из данного стекла и нанесения тонкопленочных оптических покрытий. Использование данной технологии позволяет изготавливать такие стекла в промышленном масштабе до 750 кг годной продукции за одну варку. Для автоматизации производства было разработано программное обеспечение для управления технологическими процессами.

Ключевые слова: технологии оптического стекловарения, инфракрасный спектр, коэффициенты поглощения и пропускания, оксидные стекла, ионное окрашивание, обработка оптических деталей, регенераторная горшковая печь, автоматизация производства, вакуумные оптические покрытия, оптоэлектронные системы.

Petrov D. V. Technology of infrared optical color glasses for special purpose. As manuscript.

Dissertation for the Ph.D. degree in specialty 05.17.11 – «Technology of refractory nonmetallic materials». – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of infrared optical glasses with next spectral characteristics, as well as the creation of technologies for their production. The spectral characteristics are transmittance at a wavelength of 1060 nm $\tau(\lambda_{1060}) > 65\%$ and absorption in the spectral range up to 950 nm. The solution to this problem was achieved due to the addition of the $Cr_2O_3-Mn_2O_3$ colorant system to the glass matrix of the $R_2O-PbO-SiO_2$ system, as well as the additional optical thin-film coatings.

The main criterion of glass matrix choosing was the high transmittance ($>90\%$) at 1060 nm wavelength and other criteria. The other criteria are manufacturability, profitability, chemical and thermal resistance. The most optimal for all of the above parameters was a glass matrix with the system $R_2O-PbO-SiO_2$: $\tau(\lambda_{1060}) = 92\%$; 2 group of stability to surface crystallization; A1 category of chemical resistance; 90 °C of thermal resistance.

Analysis of patents and technical literature was discovered that the system of colorants Cr_2O_3 and Mn_2O_3 is suitable for obtaining the necessary spectral characteristics. To achieve the goal of the work fundamental spectral studies for

Підписано до друку 27.05.2019 р. Формат 60×90/16
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний
Друк – цифровий. Ум. друк. аркушів. 0,9
Наклад 100 прим. Зам №

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О.
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16
Свідоцтво № 2480000000079553, від 16.05.2007 р.