

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Яіцький Сергій Миколайович



УДК 666.221

ДИСЕРТАЦІЯ

НИЗЬКОЕМІСІЙНІ ФЛОАТ-СТЕКЛА ЗІ ЗМІЦНЕНИМИ
МАГНЕТРОННИМИ ПОКРИТТЯМИ

Спеціальність: 05.17.11 – «Технологія тугоплавких неметалічних матеріалів»
161 – Хімічні технології та інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня: кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

 Яіцький С.М.

Науковий керівник

д.т.н., проф. Брагіна Людмила Лазарівна



Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Яїцький С.М. Низькоемісійні флоат-стекла зі зміцненими магнетронними покриттями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.17.11 «Технологія тугоплавких неметалічних матеріалів» (161 – Хімічні технології та інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Зміст анотації

В теперішній час одним з найважливіших завдань у світовій науці та практиці є суттєве енергозбереження у різних сферах. В архітектурі та будівництві це вирішується шляхом зниження втрат тепла крізь вікна, що дозволяє підвищити температуру в приміщеннях. З цією метою у багатьох країнах використовують низькоемісійні флоат-стекла, яким властиві поглинання сонячної теплової радіації, дуже значне зниження пропускання у видимій частині спектру, створення більш комфортного у порівнянні з безкольоровим склом освітлення та можливість захисту внутрішніх приміщень від руйнівної дії ультрафіолетових променів. Створення та виробництво означених стекол є одним з найбільш перспективних напрямків у світовій скляній індустрії. Серед них слід відмітити загартовані безпечні стекла, які знаходять все більш широке використання у багатоповерхових громадських будівлях для забезпечення норм безпеки.

Малі значення випромінювальної здатності (емісії) низькоемісійних стекол досягаються шляхом фарбування скломаси в бронзовий, блакитний, зелений та інші кольори оксидами металів, що забезпечує поглинання сонячної теплової радіації і зниження пропускання у видимій частині спектру, або нанесенням на поверхню полірованих стекол спеціальних світлотеплозахисних покриттів. Значним недоліком першого з перелічених засобів є їх суттєва вартість через уведення у весь об'єм скломаси дорогих та дуже дефіцитних, особливо в Україні, барвників – оксидів перехідних металів. Тому сьогодні в світі як найефективніший засіб досягнення малих значень випромінювальної здатності (емісії) низькоемісійних

стекло визнано нанесення на їх поверхню спеціальних «твердих» (К-скло, або Low-E) та «м'яких» (І-скло, або Double Low-E) світлотеплозахисних покриттів. Суттєвим недоліком, однак, більш енергоефективних І-стекло, які мають широкий діапазон колірних характеристик і виробляються такими відомими міжнародними корпораціями, як Pilkington, GUARDIAN, Saint-Gobain, а в Україні – провідним вітчизняним скляним підприємством ЗАТ «ЛСЗ «Пролетарій» (нині ТОВ «Лисичанський скляний завод»), є недостатня механічна міцність м'яких покриттів, що наносять магнетронним вакуумним напиленням. Окрім того, технологія виготовлення І-стекло з такими покриттями, яка використовується на вказаному українському підприємстві, не дозволяє здійснювати їх гартування, що значною мірою обумовлює імпортозалежність в даній галузі. Тому розробка складу та оптимального технологічного режиму одержання І-скла зі зміцненими м'якими магнетронними покриттями є актуальним науково-практичним завданням, на вирішення якого спрямовано дану дисертаційну роботу.

На основі результатів аналізу науково-технічної літератури щодо сучасного стану технологій флоат-стекло, зокрема І-стекло з енергозберігаючими покриттями, обґрунтовано вибір напрямків, задач і методики досліджень процесів формування та властивостей стекло з урахуванням того, що забезпечення високої якості І-скла можливе тільки при виконанні комплексу таких заходів: виробництво високоякісного листового флоат-скла для наступного нанесення низькоемісійного багат шарового покриття, сталий процес варки бездефектної скломаси за умови використання стійкої вогнетривкої футерівки скловарної печі, розробка складу та технологічних режимів нанесення зміцнених м'яких багат шарових магнетронних покриттів з певними експлуатаційними характеристиками й можливістю гартування таких стекло. Обґрунтовано комплекс критеріїв до скла-основи в системі $R_2O-RO-SiO_2$ для одержання низькоемісійних флоат-стекло, головні з яких – можливість масового виробництва та певні фізико-хімічні, оптичні, міцносні й теплофізичні властивості за міжнародними стандартами, у зв'язку з якими обрано лужнокальційсилікатний склад.

Вперше встановлено можливість сумісного використання для одержання високоякісного флоат-скла різних за хімічним та гранулометричним складом й формою зерен кварцових пісків Новоселівського та Старовірівського родовищ Харківської області за умов забезпечення максимальної питомої поверхні та реакційної активності при певному співвідношенні фракцій та власно пісків (3 : 1) й гострокутної форми їх зерен. Це обумовило підвищення вмісту у піщаній суміші основної фракції 0,4 – 0,16 мм до 89,43 % та зменшення кількості Fe_2O_3 до 0,028 % і, в підсумку, значне зниження дефекту «мошка», оптичних спотворень та, що особливо важливо, високий коефіцієнт світлопропускання $T = 88 \div 90$ % готового флоат-стекла. Розроблено математичні моделі, які дозволяють встановити та спрогнозувати вміст заліза в окремих фракціях піску й визначати спектральні характеристики результуючого флоат-скла.

Дослідження стану вогнетривких матеріалів кладки скловарної ванної печі і особливостей їх руйнування після 1,5 років експлуатації при виробництві листового скла флоат-способом на Лисичанському склозаводі "Пролетарій" показали, що найбільш вразливими ділянками варочної частини є головне склепіння, підвісні стіни та вліт горілок. Основною причиною їх корозії є пиління та випаровування шихти і термічне навантаження вогнетривів під дією полум'я. У разі ж бокових стін варочної частини інтенсивна корозія вогнетривів обумовлена дією агресивного середовища межі газ-склорозплав-вогнетрив. Руйнування насадок регенератора утворюється внаслідок високого температурного навантаження при різкій зміні температур та значного навантаження в результаті змінення окисно-відновного стану середовища. Специфічні особливості руйнування бакорових вогнетривів підвісних стін продуктивної частини виявилися в утворенні потужного граничного реакційного шару завтовшки $\approx 20\text{--}30$ мм внаслідок агресивного впливу летких компонентів шихти і розплаву, особливо в зоні варильного басейну, у вльотах пальників і безпосередньо – від завантажувальної кишені до 3-ї пари пальників. Виявлено лінійний характер температурної залежності глибини роз'їдання розплавом лужнокальційсилікатного флоат-скла бакорової футерівки в продуктивній частині басейну в інтервалі 1400 – 1560 °С, що обумовлено

зростанням кількості склофази навіть в таких стійких й відповідальних вогнетривах, як бакор 41. Петрографічні дослідження бакорових вогнетривів марок 33, 36 і 41 після 5,5-річної експлуатації показали, що проникнення скла з поверхневої скоринки в пори й тріщини, особливо на контакті перехідної і робочої зон, призводить до збільшення тріщин та руйнування вогнетривів із засміченням скломаси їх уламками й утворення дефектів флоат-скла. Тому при створенні та будівництві високопродуктивних печей нового покоління доцільно використовувати високоякісні вогнетривкі матеріали з мінімумом склофази, виготовлені за передовими технологіями, зменшити кількість швів, не допускати безпосереднього контакту вогнетривів, що взаємодіють між собою та з розплавом з утворенням легкоплавких малов'язких евтектик, та виключити виникнення дрібних тріщин при виводку печі.

Розроблено спосіб зміцнення м'яких магнетронних покриттів для одержання низькоемісійних Double Low-E стекол, який полягає у коригуванні складу та властивостей його адгезійного, діелектричного та функціонального шарів шляхом легування (адгезійний шар), регулювання потужності роботи магнетронів та використання відповідних газів для формування певних сполук в шарах. Встановлено закономірності розташування шарів плівкової системи $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}/\text{Si}_3\text{N}_4$ для витримування термічної обробки стекол системи $\text{R}_2\text{O}-\text{RO}-\text{SiO}_2$ та розроблені принципи коригування спектральних й механічних характеристик залежно від концентрації та співвідношення компонентів тонкоплівкового наночару, що сприятиме створенню варіаційного ряду флоат-стекло з необхідним рівнем відбиття в інфрачервоному спектрі.

Отримання складу і комбінації шарів і технологічних параметрів нанесення багаточарових нанопокриттів загальною товщиною до 140 нм вперше дозволило загартовувати І-скло з ними. Відпрацювання і впровадження технологічних параметрів отримання низькоемісійного І-стекло з розробленими покриттями на ТОВ «Лисичанський склозавод» забезпечили необхідні спектральні і експлуатаційні показники даних скловиробів згідно з міжнародними стандартами ГОСТ EN 673-2016 та ГОСТ EN 410-2014 і призвели до підвищення до 94 % випуску придатної продукції,

що практично не поступається кращим зарубіжним аналогам, але є більш дешевою, та широко застосовується при скління багатопверхових цивільних і житлових будівель. Економічний ефект складає 356,7 грн./м², що в перерахунку на середнє житлове приміщення з 4 вікнами загальною площею 9 – 10 м² дорівнює 3567 грн. за опалювальний сезон.

На основі результатів виконаних досліджень також розроблено державний стандарт України ДСТУ EN 1036-1 : 2019

Ключові слова: технологія флоат-скла, низькоемісійні І-стекла, енергозберігаючі покриття, магнетронне вакуумне напилення, кварцові піски, ванна піч, вогнетривка футерівка, гартування флоат-скла, оптичні властивості, архітектурно-будівельна галузь.

Список публікацій здобувача:

1. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Яицкий Н. С. Особенности разрушения огнеупорной футеровки стекловаренных печей при производстве листового стекла. *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. Харків, 2012. № 32. С. 72–76.

2. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Соболев Ю. О. Свойства и опыт использования кварцевых песков месторождений Харьковской области в силикатной промышленности. *Зб. наук. праць ПАТ “УкрНДІ вогнетривів ім. А.С. Бережного”*. Харків, 2012. № 112. С. 250–255.

3. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Машкин В. В. Архитектурно-строительные стекла с низкоэмиссионными энергосберегающими покрытиями. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*. Харків, 2014. № 16 (1059). С. 165 – 174.

4. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Соболев Ю. О., Машкин В. В. Исследование коррозии бакоровых огнеупоров при службе в стекловаренной печи. *Зб. наук. праць ПАТ “УкрНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного”*, Харків, 2015. № 115. С. 169–176.

5. Yaitskiy S., L. Bragina L., Sobol Yu. Analysis of the bacor refractories after their service in glass furnace. *Chemistry and chemical technology*, 2016. Vol. 10, № 3. P. 373–377.

6. Яицкий С. Н. Производство архитектурно-строительного стекла на ПАО «ЛСЗ Пролетарий». *Вісник НТУ «ХПИ». Хімія, хімічна технологія та екологія*. Харків, 2016. № 22 (1194). С. 244–247.

7. Яіцький С. М., Петров Д. В., Брагіна Л. Л., Рябінін С. О. Дослідження експлуатаційних характеристик теплових печей при виробництві оптичного та спеціального флоат-стекла. *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. Нові рішення в сучасних технологіях. Харків, 2020. № 3(5). С. 59–65. doi:10.20998/2413-4295.2020.01.09.

8. Яицкий С. Н. Наш завод отметил вековой юбилей. *Glass Russia*, 2013. Декабрь. С. 6–8.

9. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Яицкий Н. С. Анализ службы огнеупорных материалов в ваннах стекловаренных печах. *Фізико-хімічні проблеми в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів* : тези доп. Укр. наук.-техн. конф. (м. Дніпропетровськ, 11–12 жовтня 2011 р.). Дніпропетровськ, 2011. С. 59.

10. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л. Роль химического и гранулометрического состава кварцевых песков в обеспечении качества флоат-стекла. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Харьков, 24–25 апр. 2012 г.). Харьков, 2012. С. 73–74.

11. Брагина Л. Л., Яицкий С. Н. Особенности службы бадделеито-корундовых огнеупоров в стекловаренных печах. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2013)* : тези доп. XXI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 29–31 травня 2013 р.). Харків, 2013. Ч. II. С. 248.

12. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Машкин В. В. Ресурсоэнергосбережение в стекольной отрасли. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Харьков, 29–30 апр. 2014 г.). Харьков, 2014. С. 98–99.

13. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Воронов Г. К., Бужинский А. Б. Решение экологических проблем при производстве флоат-стекла. *Фундаментальные и прикладные аспекты создания биосферосовместимых систем* : матер. 2-й междунар. науч.-техн. интернет-конф. (г. Орел, 1–20 дек. 2014 г.). Орел, 2015. С. 122 – 129.

14. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Воронов Г. К., Нестеренко Д. И. Современные методы снижения выбросов при производстве листового стекла. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Харьков, 28–29 апреля 2015 г.). Харьков, 2015. С. 79–80.

15. Яіцький С. М., Брагіна Л. Л., Бужинський А. Б. Одержання багатофункціональних покриттів на склі з використанням титанової мішені. *Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів*: тези доп. III Всеукраїнської наук.-техн. конф. (м. Львів, 05–08 вересня 2016 р.). Львів, 2016. С. 38–39.

16. Яицкий С. Н., Машкин В. В., Брагина Л. Л. Использование кварцевых песков месторождений Харьковской области при производстве флоат-стекла. *Міжнародна науково-практична студентська конференція магістрантів* : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 05–08 квіт. 2016 р.). Харків, 2016. Ч. 2. С. 239–240.

17. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Нестеренко Д. О. Низкоэмиссионные магнетронные покрытия для флоат-стекла. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС–2017)* : зб. тез доп. X Української наук. конф. студентів, аспірантів і молодих учених за міжнародною участю (м. Вінниця, 27–29 квіт. 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 212.

18. Яіцький С. Н., Нестеренко Д. О., Брагіна Л. Л. Проблеми одержання та застосування низькоемісійних покриттів для флоат-скла. *XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів* : матер. міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 18–21 квіт. 2017 р.). Харків, 2017. Ч.2. С. 181–182.

19. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Машкин В. В., Нестеренко Д. О. Использование тугоплавких соединений для получения упрочненных

енергосберегающих покрытий на флоат-стекле. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : тез. докл. междунар. научн.-техн. конф. (г. Харьков 25–26 апр. 2017 г.). Харьков, 2017. С. 50 – 52.

20. Яіцький С. М., Брагіна Л. Л., Нестеренко Д. О. Теплоенергозберігаючі багат шарові зміцнені покриття для листового флоат-скла. *Львівські хімічні читання – 2017* : зб. наук. праць XVI наук. конф. (м. Львів, 28–31 трав. 2017 р.). Львів, 2017. С. У55.

21. Яицкий С. Н., Брагина Л. Л., Искрыч А. Ю. Современные энергосберегающие низкоэмиссионные I-стекла. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности*: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Харьков, 14–15 мая 2019 г.). Харьков, 2019. С.40–42.

ANNOTATION

Yaitskiy S. M. V. Low-emission float-glasses with strengthening magnetron coatings. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the Ph.D. degree in specialty 05.17.11 "Technology of refractory nonmetallic materials" (Chemical technologies and engineering). – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021

Annotation content

Currently, one of the most important tasks in world science and practice is significant energy conservation in various fields. In architecture and construction, this is solved by reducing heat loss through the windows, which allows you to raise the temperature in the room. To this end, many countries use low-emission float glasses, which are characterized by the absorption of solar thermal radiation, a very significant reduction in transmission in the visible part of the spectrum, creating more comfortable lighting compared to colorless glass and the ability to protect interiors from the destructive effects of ultraviolet rays. The creation and production of these glasses is one of the most promising areas in the global glass industry. Among them should be noted tempered safety glass, which are increasingly used in high-rise public buildings to ensure safety standards.

Small values of emissivity (emission) of low-emission glasses are reached by coloring of glass mass in bronze, blue, green and other colors with metal oxides, which ensures the absorption of solar thermal radiation and reduced transmission in the visible part of the spectrum, or by applying to the surface of polished glass special light-protective coatings. A significant disadvantage of the first of these tools is their significant cost due to the introduction of the entire volume of glass mass of expensive and very scarce, especially in Ukraine, dyes – oxides of transition metals. Therefore, today in the world as the most effective means of achieving low values of emissivity (emission) of low-emission glasses is recognized by applying to their surface special "hard" (K-glass, or Low-E) and "soft" (I-glass, or Double Low-E) light and heat protective coatings. A significant disadvantage, however, of more energy-efficient

I-glasses, which have a wide range of color characteristics and are produced by such well-known international corporations as Pilkington, GUARDIAN, Saint-Gobain, and in Ukraine - the leading domestic glass company CJSC LSZ Proletarii. "Lysychansk glass factory"), there is insufficient mechanical strength of soft coatings applied by magnetron vacuum spraying. In addition, the technology of manufacturing I-glasses with such coatings, which is used at this Ukrainian company, does not allow them to harden, which largely determines the import dependence in this area. Therefore, the development of the composition and the optimal technological mode of obtaining I-glass with reinforced soft magnetron coatings is an urgent scientific and practical task, the solution of which is aimed at this dissertation.

Based on the results of the analysis of scientific and technical literature on the current state of float glass technologies, in particular I-glasses with energy-saving coatings, the choice of directions, tasks and methods of research of molding processes and properties of glasses is justified, taking into account that high quality I-glass when performing a set of such measures: production of high-quality float glass sheet for subsequent application of low-emission multilayer coating, stable cooking process of defect-free glass mass using stable refractory lining of glass furnace, development of composition and technological modes of application of reinforced soft multilayer magnetron coatings and the possibility of tempering such glasses. A set of criteria for the base glass in the system $R_2O-RO-SiO_2$ for obtaining low-emission float glasses, the main of which is the possibility of mass production and certain physicochemical, optical, strength and thermophysical properties according to international standards, in connection with which selected alkaline calcium silicate composition.

Studies of the refractory materials of the glass bath furnace masonry and the peculiarities of their destruction after 1.5 years of operation in the production of sheet glass by float method at the Lysychansk glass factory "Proletary" showed that the most vulnerable parts of the cooking part are the main vault, suspension walls and burners. The main cause of their corrosion is sawing and evaporation of the charge and the thermal load of refractories under the action of flame. In the case of the side walls of the cooking part, the intense corrosion of refractories is due to the action of the aggressive

environment of the gas-glass-melt-refractory boundary. The destruction of the regenerator nozzles is formed due to the high temperature load with a sharp change in temperature and a significant load as a result of changes in the redox state of the environment. Specific features of the destruction of copper refractories of the suspended walls of the productive part were manifested in the formation of a strong limiting reaction layer with a thickness of – 20–30 mm due to the aggressive influence of volatile components of the charge and melt, especially in the cooking basin area, burner entries and directly from the loading pocket pairs of burners. The linear character of the temperature dependence of the depth of melt corrosion of alkaline calcium silicate float glass of copper lining in the productive part of the basin in the range of 1400 – 1560 °C is revealed, which is due to the increase in glass phase even in such stable and responsible refractories as copper 41.

Petrographic studies of copper refractories grades 33, 36 and 41 after 5.5 years of operation showed that the penetration of glass from the surface crust into pores and cracks, especially at the contact of the transition and working areas, leads to cracks and destruction of refractories with clogging of glass with their fragments and the formation of defects in float glass. Therefore, when creating and building new generation high-performance furnaces, it is advisable to use high-quality refractory materials with a minimum of glass phase, made by advanced technologies, reduce the number of seams, prevent direct contact of refractories that interact with each other and with the melt to form low-melting occurrence of small cracks during brooding of the furnace.

A method of strengthening soft magnetron coatings to obtain low-emission Double Low-E glasses, which consists in adjusting the composition and properties of its adhesive, dielectric and functional layers by doping (adhesive layer), adjusting the power of magnetrons and using appropriate gases to form certain compounds in balls. The regularities of the layers of the $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}/\text{Si}_3\text{N}_4$ film system for withstanding the heat treatment of $\text{R}_2\text{O}-\text{RO}-\text{SiO}_2$ system glasses are established, and the principles of adjusting the spectral and mechanical characteristics depending on the concentration and ratio of thin-film nanolayer components are developed. reflection in the infrared spectrum.

Obtaining the composition and combination of layers and technological parameters for the application of multilayer nanocoatings with a total thickness of up to 140 nm for the first time allowed to harden the I-glass with them. Practice and introduction of technological parameters of low-emission I-glasses with developed coatings at Lysychansky Glassworks LLC provided the necessary spectral and operational indicators of these glassware in accordance with international standards GOST EN 673-2016 and GOST EN 410-2014 and led to an increase of up to 94 % of usable output, which is almost not inferior to the best foreign counterparts, but is cheaper and is widely used in the glazing of multi-storey civil and residential buildings. The economic effect is 356.7 UAH/m², which in terms of the average living space with 4 windows with a total area of 9 – 10 m² is equal to 3567 UAH. for the heating season.

Based on the results of research, the state standard of Ukraine DSTU EN 1036-1: 2019 has also been developed.

Key words: float glass technology, low-emission I-glasses, energy-saving coatings, magnetron vacuum sputtering, quartz sands, bath furnace, refractory lining, float glass tempering, optical properties, architectural and construction industry.

List of publications of graduate student:

1. Yaitskiy S., Bragina L., Yaitskiy M. The feature of the refractory lining destruction of glass melting furnaces in the production of sheet glass. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Kharkiv, 2012. No. 32. P. 72–76. 2.

2. Yaitskiy S.N., Bragina L.L., Sobol Yu.O. Properties and experience of using quartz sands of the Kharkiv region deposits in the silicate industry. *Coll. Science. works of PJSC "UkrNDI of refractories named after A.S. Berezhnoy"*. Kharkiv, 2012. № 112. P. 250–255.

3. Yaitskiy S.N., Bragina L.L., Mashkin V.V. Architectural and construction glass with low-emissivity energy-saving coatings. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Innovative research in scientific works of students*, 2014. N. 16 (1059). P. 165–174.

4. Yaitskiy S.N., Bragina L.L., Sobol Yu.O., Mashkin V.V. Investigation of the corrosion of bacor refractories during service in a glass furnace. *Coll. Science. works of PJSC "UkrNDI of refractories named after A.S. Berezhnoy"*. Kharkiv, 2015. No. 115. P. 169–176.

5. Yaitskiy S., Bragina L., Sobol Yu. Analysis of the bacor refractories after their service in glass furnace. *Chemistry and chemical technology*, 2016. Vol. 10, No.3. P. 373–377.

6. Yaitskiy S.N. Production of architectural and construction glass at PJSC "LSZ Proletary". *Bulletin of NTU "KhPI". Chemistry, Chemistry Technology and Ecology*. Kharkiv, 2016. No. 22 (1194). P. 244–247.

7. Yaitsky S.M., Petrov D.V, Bragina L.L, Ryabinin S.O. Study of operational characteristics of thermal furnaces in the production of optical and special float glasses. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". New solutions in modern technologies*. Kharkiv, 2020. № 3 (5). P.59–65. doi: 10.20998 / 2413-4295.2020.01.09.

8. Yaitskiy S.N., Our plant celebrated its centenary. *Glass Russia*, 2013. December. P. 6–8.

9. Yaitskiy S.N, Bragina L.L, Yaitskiy N.S. Analysis of the service of refractory materials in bathroom glass furnaces. *Physico-chemical problems in the technology of refractory non-metallic and silicate materials* : abstracts of the report. of Ukr. scientific and technical conf. (Dnepropetrovsk, October 11–12, 2011). Dnepropetrovsk, 2011. P. 59.

10. Yaitskiy S.N, Bragina L.L The role of chemical and particle size distribution of quartz sands in ensuring the quality of float glass. *Technology and application of refractories and technical ceramics in industry* : abstracts of the report of international scientific and technical Conf. (Kharkov, April 24–25, 2012). Kharkov, 2012. P. 73–74.

11. Yaitskiy S.N., Bragina L.L. Features of baddeleite-corundum refractories service in glass furnaces. *Information technologies: science, technology, technology, education, health (MicroCAD-2013)*: abstracts of the report. XXI International scientific-practical. conf. (Kharkiv, May 29-31, 2013). Kharkiv, 2013. Part II. P. 248.

12. Yaitskiy S.N., Bragina L.L., Mashkin V.V. Resource and energy saving in the glass industry. *Technology and application of refractories and technical ceramics in industry: abstracts of international scientific and technical Conf. (Kharkov, April 29-30, 2014)/ Kharkov, 2014. P. 98–99.*

13. Yaitskiy S. N., Bragina L. L., Voronov G. K., Buzhinsky A. B. Solution of environmental problems in the production of float glass. *Fundamental and applied aspects of creating biosphere-compatible systems: materials of the 2nd international. scientific and technical internet conf. (Orel, December 1–20, 2014). Orel, 2015. P. 122–129.*

14. Yaitskiy S. N., Bragina L. L., Voronov G. K., Nesterenko D. I. Modern methods of reducing emissions in the production of sheet glass. *Technology and application of refractories and technical ceramics in industry: reports abstracts of the intern. scientific and technical conf. (Kharkov, April 28-29, 2015). Kharkov, 2015. P. 79–80.*

15. Yaitskiy S.M, Bragina L.L, Buzhinsky A.B. Obtaining of the multifunctional coatings on glass with the using of a titanium target. *Modern trends in the development and production of silicate materials: reports abstracts of III All-Ukrainian scientific and technical conf. (Lviv, September 5–08, 2016). Lviv, 2016. P. 38–39.*

16. Yaitskiy S.N., Mashkin V.V., Bragina L.L. The use of quartz sands from the deposits of the Kharkov region in the production of float. Intern. scientific-practical student conference of undergraduates: reports abstracts of intern. scientific-practical conf. (Kharkiv, April 5–08, 2016). Kharkiv, 2016. Part 2. P. 239–240.

17. Yaitskiy S.N., Bragina L.L., Nesterenko D.O. Low-emission magnetron coatings for float glass. *Chemical problems of today (ChPS-2017): coll. thesis of X Ukrainian Science. conf. students, graduate students and young scientists with international participation (Vinnytsia, April 27-29, 2017). Vinnytsia, 2017. P. 212.*

18. Nesterenko D.O, Yaitskiy S.N, Bragina L.L. Problems of obtaining and applying of the low-emission coatings for float glass. *XI International scientific-practical conference of undergraduates and graduate students: materials of the intern.*

scientific-practical conf. (Kharkiv, April 18-21, 2017). Kharkiv, 2017. Part 2. P. 181–182.

19. Yaitskiy S.N., Bragina L.L., Mashkin V.V., Nesterenko D.O. Use of refractory compounds for hardened energy-saving coatings obtaining on float glass. *Technology and application of refractories and technical ceramics in industry: materials of the these extra international scientific and technical conf.* (Kharkov, April 25-26, 2017). Kharkov, 2017. P. 50–52.

20. Yaitskiy S.M, Bragina L.L, Nesterenko D.O. Heat-saving multilayer reinforced coatings for float glass sheet. *Lviv Chemical Readings - 2017: coll. science. works of XVI scientific conf.* (Lviv, May 28-31, 2017). Lviv, 2017. P. U55.

21. Yaitskiy S.N, Bragina L.L, Iskrych A.Yu. Modern energy-saving low-emission I-glasses. *Technology and application of refractories and technical ceramics in industry: report abstracts of the int. scientific and technical conf.* (Kharkov, May 14–15, 2019). Kharkov, 2019. P.40–42.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА НИЗЬКОЕМІСІЙНОГО ФЛОАТ-СКЛА	13
1.1 Теоретичні основи флоат-процесу	13
1.2 Особливості сировини для виробництва флоат-скла	16
1.3 Оптимізація скловарного процесу	22
1.4 Теплоенергозберігаючі стекла та технології їх одержання	25
1.5 Багатошарові покриття для низькоемісійних Double Low-E- стеклол	32
1.6 Висновки, вибір основних напрямків та постановка завдань	36
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
2.1 Вибір напрямків досліджень	38
2.2 Сировинні матеріали	39
2.3 Методики визначення властивостей І-скла та покриттів	43
2.3.1 Ударостійкість скла	44
2.3.2 Спектральні характеристики	46
2.3.3 Оптичні характеристики	47
2.3.4 Міцність тонкоплівкового покриття	48
2.3.5 Термостійкість	49
2.4 Допоміжні методики	50
2.4.1 Гранулометричний склад сировини	50
2.4.2 Петрографія фрагментів вогнетривкої футерівки	51
2.5 Висновки до розділу 2	51
РОЗДІЛ 3. ОДЕРЖАННЯ ФЛОАТ-СКЛА НА ОСНОВІ ВІТЧИЗНЯНИХ КВАРЦОВИХ ПІСКІВ	53
3.1 Обґрунтування критеріїв якості листового флоат-скла	53
3.2 Дослідження впливу характеристик піску на фізико-хімічні	54

властивості скла	
3.3 Визначення оптимальної пропорції суміші пісків різних родовищ	64
3.4 Математичне моделювання впливу параметрів технологічного процесу на якість листового скла	65
3.5 Висновки до розділу 3	73
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОГНЕТРИВІВ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ФЛОАТ-СКЛА	75
4.1 Особливості роботи скловарного агрегату	76
4.2. Аналіз експлуатаційних властивостей вогнетривів	78
4.3 Петрографічні дослідження відпрацьованих вогнетривів	81
4.4 Аналіз отриманих даних та висновки до розділу 4	90
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ НИЗЬКОЕМІСІЙНОГО І-СКЛА ЗІ ЗМІЦНЕНИМ М'ЯКИМ ПОКРИТТЯМ	93
5.1 Особливості низькоемісійних флоат-стеклол з покриттями та технології їх отримання	93
5.2 Теоретичний розрахунок експлуатаційних та оптичних показників покриттів низькоемісійного флоат-скла	97
5.3 Особливості складів та будови магнетронних покриттів	100
5.4 Відпрацювання пошарової структури для одержання зміцненого покриття	102
5.5 Контроль параметрів отриманого І-скла зі зміцненим м'яким покриттям	109
5.5.1 Оптичні показники	109
5.5.2 Теплозберігаючі властивості	113
5.5.3 Вологостійкість	115
5.5.4 Розрахунок собівартості розроблених мультифункціональних стеклол	118

5.6 Висновки до розділу 5	120
РОЗДІЛ 6. ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ І-СТЕКЛОЛ	122
6.1 Технологічна схема одержання низькоемісійних флоат-стеклол зі зміцненими магнетронними покриттями	122
6.2 Економічна ефективність розробки	123
6.3 Розрахунок економічного ефекту	125
6.4 Потенційний ринок та перспективи подальших досліджень	129
6.5. Висновки до розділу 6	130
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	134
Додаток А. Технологический регламент процесса производства безопасного стекла в цехе № ТР 41554947-001-2017	149
Додаток Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	152
Додаток В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	153
Додаток Д. Національний стандарт України. Дзеркала. Загальні технічні умови. ДСТУ EN 1036-1 : 2019	154
Додаток Ж. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи в практику навчального процесу НТУ «ХП»	156
Додаток З. Список публікацій здобувача	158