

На правах рукописи



**Храпко Наталья Николаевна**

**УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ  
С ИСТОЧНИКАМИ ИНФРАКРАСНОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 2.10.3 – Безопасность труда

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова» на кафедре «Техносферная безопасность и вычислительная механика».

Научный  
руководитель:

**Патрушева Тамара Николаевна,**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры  
«Техносферная безопасность и вычислительная механика»  
ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»,  
г. Санкт-Петербург.

Официальные  
оппоненты:

**Булггин Юрий Игоревич,**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
«Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей  
среды» ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет», г. Ростов-на-Дону;

**Донцов Сергей Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная  
защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Санкт-  
Петербургский государственный технологический  
институт (технический университет)», г. Санкт-Петербург.

Ведущая  
организация:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский государственный университет путей  
сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС), г. Екатеринбург.

Защита состоится в \_\_:00 часов 16.04.2026 г. на заседании диссертационного совета 24.2.272.02 при ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова) по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова и на сайте <https://voenmeh.ru/nauka/dissertacziionnye-sovety/dissertacziionnyj-sovet-24-2-272-02/>.

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2026 г. Отзывы на автореферат принимаются по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, каф. Е5.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.272.02  
кандидат технических наук



В.К. Васильева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Машиностроение и металлургия представляют собой наиболее развитые отрасли российской промышленности: по результатам статистических исследований, на рабочих местах в цехах промышленных предприятий указанных отраслей занято более 1,5 млн человек. В то же время современные производственные процессы сопровождаются воздействием на работающих источников оптического излучения инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) диапазонов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью защиты персонала промышленных цехов машиностроительных и металлургических предприятий с источниками ИК- и УФ-излучения от воздействия указанных факторов, ухудшающих условия труда и создающих риски для здоровья.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами исследования воздействия вредных физических факторов и улучшения условий труда на производственных предприятиях занимались многие отечественные ученые: А. В. Воробей, Н. Ф. Галанин, В. И. Харитонов, Д. А. Черенков, Г. В. Пачурин, А. Е. Шашурин, А. Н. Чукарин, М. В. Буторина, Г. К. Ивахнюк, Д. А. Куклин, А. П. Тюрин, Ю. И. Булыгин, М. Л. Рудаков, С. А. Донцов, Н. М. Пузырев, Л. А. Васильева, Н. В. Мозговой, А. М. Лазаренков и другие, а также зарубежные авторы: Д. Слайни, Л. Хортон, П. Монтеро, Л. Фритчи, Д. Баркер, А. Хейл, А. Хопкинс, К. С. Парсонс, М. Д. Гриффин и другие.

В то время как в научной литературе биологические эффекты воздействия инфракрасного и ультрафиолетового излучения на организм освещены в достаточной мере, остается нерешенной ключевая прикладная задача – создание научно обоснованной системы защиты персонала от данных физических факторов на реальных рабочих местах.

Проведенные экспериментальные исследования на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов установили наличие неблагоприятных условий труда, в том числе значительные превышения теплового и ультрафиолетового излучения по сравнению с допустимыми санитарно-гигиеническими нормами. На всех обследованных рабочих местах при различном количестве источников излучений выявлен факт превышения уровней теплового излучения (литейный и термический цех) и ультрафиолетового излучения (сварочный цех) над предельно допустимыми значениями. Наибольшие значения уровней теплового излучения достигают величины  $650 \text{ Вт/м}^2$  на рабочем месте термиста, а измеренные уровни ультрафиолетового излучения –  $3,7 \text{ Вт/м}^2$  на рабочем месте электросварщика, что превышает предельно допустимые значения более чем в 4 и 3 раза соответственно.

В настоящее время для экранирования ИК-излучения используются непрозрачные экраны, от УФ-излучения защищают специальные стекла, содержащие добавки, поглощающие УФ-излучение. Такие стекла отличаются высокой стоимостью. Традиционно для нанесения пленочных покрытий используются энергозатратные вакуумные технологии, которые не позволяют наносить оксидные покрытия на большие поверхности. Актуальность темы диссертационного исследования определяется потребностью в развитии ресурсосберегающих и масштабируемых технологий для создания средств индивидуальной и коллективной защиты нового поколения посредством разработки масштабного безвакуумного метода нанесения оксидных пленок для производства крупногабаритных прозрачных экранов с функцией селективного

светофильтра. В данной работе для получения наноструктурных прозрачных оксидных покрытий высокой чистоты заданной стехиометрии из недорогих исходных веществ использован экстракционно-пиролитический метод (ЭПМ), который был предложен в работах А. И. Холькина и Т. Н. Патрушевой.

#### **Научная гипотеза**

Формирование селективных оксидных покрытий экстракционно-пиролитическим методом позволяет создавать прозрачные для видимого света фильтры, эффективно ослабляющие ИК- и УФ-излучение за счет управляемой микроструктуры, а применение таких покрытий в конструкциях защитных экранов для рабочих мест литейных, термических и сварочных цехов обеспечит снижение уровней ИК- и УФ-излучения до нормативных значений, что приведет к улучшению условий труда.

**Цель диссертационной работы** заключается в повышении уровня безопасности и улучшении условий труда работников, занятых на рабочих местах с источниками инфракрасного и ультрафиолетового излучения, путем разработки и внедрения эффективных защитных прозрачных экранов и стекол на основе оксидных покрытий, получаемых экстракционно-пиролитическим методом.

#### **Основные задачи исследования**

Для обеспечения безопасных условий труда на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов в работе решаются следующие задачи:

1. Провести анализ опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов с целью выявления превалирующих факторов и превышений допустимых значений.
2. Выполнить оценку параметров микроклимата (включающих тепловое излучение) на рабочих местах литейного и термического цехов и параметров неионизирующих излучений ультрафиолетового диапазона на рабочих местах сварочного цеха, разработать требования к их снижению.
3. Разработать составы и технологические режимы формирования защитных оксидных покрытий с селективной прозрачностью экстракционно-пиролитическим методом.
4. Исследовать оптические и защитные свойства полученных покрытий.
5. Разработать и испытать конструкцию прозрачных теплозащитных экранов и стекол с оксидными покрытиями для рабочих мест литейных и термических цехов.
6. Разработать и испытать конструкцию прозрачных УФ-защитных экранов и стекол для СИЗ для рабочих мест сварочных цехов.
7. Оценить эффективность экранов с точки зрения улучшения условий труда на рабочих местах, провести экономическую оценку предложенных защитных покрытий.

#### **Научная новизна работы:**

1. Предложено, теоретически и экспериментально обосновано формирование защищающих от ИК- и УФ-излучения оксидных покрытий на стеклянных подложках экстракционно-пиролитическим методом для создания прозрачных защитных экранов.
2. Разработана и применена методика оценки эффективности прозрачных теплозащитных экранов с оксидными покрытиями в зависимости от расстояния до источника, основанная на экспериментальных данных и расчётах ослабления излучения.

3. Выявлены закономерности влияния состава исходных пленкообразующих растворов и параметров синтеза (температуры отжига, толщины, концентрации компонентов) на оптические и защитные характеристики оксидных покрытий на основании изучения микроструктуры и оптических спектров оксидных покрытий в ИК- и УФ-диапазоне излучения.

4. Предложены и обоснованы наиболее эффективные составы покрытий для защиты от ИК- и УФ-излучения.

**Теоретическая значимость работы:**

1. Развитие методологии защиты от оптических излучений инфракрасного и ультрафиолетового диапазона.

2. Развитие теории формирования функциональных оксидных покрытий экстракционно-пиролитическим методом для создания прозрачных покрытий с селективными оптическими свойствами.

3. Создание научных основ для проектирования селективных оптических фильтров.

4. Разработка и верификация методики оценки эффективности защитных средств.

**Практическая полезность работы:**

1. Комплексный анализ ОВПФ на рабочих местах и проведенные измерения позволили установить, что параметры микроклимата (включающие тепловое излучение) на рабочих местах литейного и термического цехов и параметры неионизирующих излучений ультрафиолетового диапазона на рабочих местах сварочного цеха являются одними из превалирующих факторов, ухудшающих условия труда на рассмотренных рабочих местах, а также позволили разработать на основании полученных результатов требования к их снижению. Установлен класс условий труда по параметрам микроклимата в литейном и термическом цехе 3.1 и 3.2, соответственно, класс условий труда по УФ-излучению в сварочном цехе 3.1.

2. На основе эмпирически установленной зависимости предложен инженерный метод расчета оценки эффективности прозрачных теплозащитных экранов с оксидными покрытиями для рабочих мест с источниками ИК-излучения.

3. Разработаны, внедрены и исследованы конструкции прозрачных экранов, позволяющие снизить уровни теплового излучения на рабочих местах литейных и термических цехов до значений, не превышающих предельно допустимых уровней, при сохранении визуального контроля за технологическим процессом.

4. Разработана конструкция защитного экрана для сварочных постов и защитных стекол для СИЗ глаз и лица, эффективно снижающих ультрафиолетовое излучение на рабочих местах сварочного цеха.

5. Экспериментально подтверждено, что применение разработанных экранов способствует улучшению условий труда по параметрам микроклимата и неионизирующих излучений, а также снижению интенсивности теплового и ультрафиолетового воздействия на человека.

6. Разработаны рекомендации по применению комплекса защитных мероприятий на рабочих местах в цехах металлургических и машиностроительных производств. После предложенных мероприятий установлен класс условий труда по параметрам микроклимата в литейном и термическом цехах – 2, класс условий труда по УФ-излучению в сварочном цехе – 2.

**Объектом исследования** является система обеспечения безопасности труда на рабочих местах, подверженных воздействию инфракрасного и ультрафиолетового излучения в литейных, термических и сварочных цехах промышленных предприятий.

**Предметом исследования** являются оптико-физические свойства и защитная эффективность прозрачных оксидных покрытий, формируемых экстракционно-пиролитическим методом для селективного ослабления инфракрасного и ультрафиолетового излучения в рамках указанной системы безопасности труда.

**Область исследования.** Содержание диссертации соответствует пункту 6 паспорта научной специальности 2.10.3 – Безопасность труда: разработка научных основ, установление области рационального применения и оптимизация способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов.

**Методы исследования** основываются на основных законах оптики, методах спектрофотометрии в УФ- и ИК-диапазоне, статистических методах обработки экспериментальных данных и методах оценки вредных и опасных производственных факторов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Комплексная оценка условий труда на рабочих местах с источниками оптического излучения, основанная на идентификации превалирующего опасного фактора (тепловое излучение или воздействие УФ-излучения) и обеспечивающая количественное обоснование требований к снижению уровней воздействия для каждого типа излучения.

2. Научно обоснованный подход к получению прозрачных оксидных пленок для защитных экранов с селективными оптическими свойствами путем нанесения на стеклянные подложки многослойных оксидных покрытий экстракционно-пиролитическим методом, обеспечивающих защиту от ИК- и УФ-диапазона излучения при сохранении светопропускания в видимой области спектра при низкой себестоимости и технологичности процесса нанесения.

3. Установленные на основании исследования микроструктуры и оптических спектров закономерности влияния состава пленкообразующих растворов (концентрация солей металлов) и параметров синтеза (температура отжига, толщина слоя) на защитные характеристики оксидных покрытий, позволившие выбрать составы и режимы синтеза покрытий для целевой защиты от ИК- или УФ-излучения.

4. Конструктивные решения прозрачных теплозащитных экранов с оксидными покрытиями, предназначенных для защиты работников литейных и термических цехов от инфракрасного излучения, а также методика оценки эффективности таких типов экранов и полученные с ее помощью результаты.

5. Конструктивные решения экранов и защитных стекол с оксидными покрытиями для сварочных постов для защиты от ультрафиолетового излучения, эффективность которых продемонстрирована с помощью экспериментальных и натурных измерений.

**Реализация результатов.** Полученные в диссертации теоретические и практические результаты подтверждены актами внедрения ООО «Комбайновый завод «РОСТСЕЛЬМАШ» и АО «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерн ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод». Отдельные результаты диссертационной работы внедрены и используются в ФГБОУ

ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова» в образовательном процессе – в учебно-методических материалах курсов лекций, лабораторных работ и практических занятий для обучения студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» по дисциплинам «Безопасность механизмов и машин», «Производственная безопасность», а также в рамках дисциплины «Безопасность жизнедеятельности», реализуемой для всех направлений подготовки бакалавриата и специалитета в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

**Достоверность** разработанных решений подтверждена в ходе натурных исследований, выполненных с использованием высокоточной измерительной аппаратуры по действующим методикам, включающим методы оценки результатов и погрешности измерений.

**Апробация диссертационной работы.** Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук подготовлена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова» на кафедре Е5 «Техносферная безопасность» и вычислительная механика». Материалы работы прошли апробацию на научных и научно-практических конференциях регионального, всероссийского и международного уровней. В их числе участие во II Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Техносферная безопасность», г. Санкт-Петербург, 2025 г., научно-практической конференции с международным участием «II экологическая неделя БРУ – СПбПУ», г. Санкт-Петербург, 2025 г., XVI научной конференции «ТРАДИЦИИ И ИННОВАЦИИ», посвященной 197-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (СПбГТИ(ТУ)) – Секция 16. Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды, г. Санкт-Петербург, 2025 г., Всероссийской научно-практической конференции «Техносферная безопасность: современные научные тенденции, технические и организационные средства и методы обеспечения, специальное образование», г. Воронеж, 2024 г., Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023», г. Севастополь, 2023 г., научной школе-конференции с международным участием для молодых ученых «Функциональные стекла и стеклообразные материалы: Синтез. Структура. Свойства. GlasSPSchool», г. Санкт-Петербург, 2022 г., Четырнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 2022 г., V Международной конференции «Актуальные научно-технические вопросы химической безопасности» (ASTICS-2020), г. Казань, 2020 г. Результаты настоящего исследования также докладывались на заседаниях кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2022–2025 гг.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в научных статьях, тематических сборниках научных трудов, материалах конференций. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 из них в журналах Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ВАК Минобрнауки РФ, 3 из них в изданиях категории K2 по научной специальности 2.10.3 – Безопасность труда (1 из них с одновременной индексацией в международной реферативной базе данных Scopus, квартиль Q3) и 1 статья в журнале, входящем в международные реферативные базы данных Scopus и WoS, квартиль Q4.

**Личный вклад автора.** В диссертации обобщены результаты, полученные лично автором, а также в соавторстве. Непосредственно автором осуществлены: анализ литературных данных и постановка задач, исследование ОВПФ на рабочих местах, синтез образцов, исследование эффективности защитных покрытий, разработка конструкций экранов, разработка методики эффективности теплозащитного экрана, исследование влияния экранов на условия труда, обработка и анализ данных, а также подготовка научных статей по результатам работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и рекомендаций, списка литературы из 153 наименований, содержит 60 рисунков, 37 таблиц, 1 приложение и изложена на 213 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность темы диссертационного исследования, которая направлена на решение важной для машиностроения и металлургии научно-технической и социально-экономической задачи – обеспечения безопасных условий труда литейных, термических и сварочных цехов. Указаны цель и задачи, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведены результаты решения задачи исследования с указанием научной новизны и практической ценности.

**В первой главе** проведен анализ состояния проблемы защиты работников от инфракрасного и ультрафиолетового излучения на рабочих местах предприятий металлургического и машиностроительного профиля. Установлено, что в литейных, термических и сварочных цехах данные физические факторы являются одними из наиболее значимых, а их уровни многократно превышают допустимые гигиенические нормативы, что приводит к отнесению условий труда в таких цехах к вредным классам (3.1–3.3).

Рассмотрены механизмы распространения теплового излучения в производственных помещениях и выявлено, что в литейных цехах доля теплового потока, передаваемого излучением, достигает 70 % от общего энергообмена. К источникам ИК-излучения относятся ванны расплавленного металла, горячие заготовки и оборудование. Установлено, что основным источником УФ-излучения на предприятиях машиностроительного профиля являются сварочные процессы, при которых уровни облучения задействованного персонала многократно превышают предельно допустимые нормы.

Проанализированы существующие методы коллективной и индивидуальной защиты (экраны, спецодежда, светофильтры). Выявлено, что применение традиционных металлических и композитных экранов зачастую экономически нецелесообразно из-за высокой стоимости и сложности монтажа и не дает нужного эффекта вследствие потери прозрачности.

Проанализированы перспективные материалы для создания прозрачных защитных экранов – тонкие оксидные покрытия (на основе  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ , редкоземельных оксидов и др.), способные селективно отражать или поглощать ИК- и УФ-диапазоны при сохранении высокой прозрачности в видимой области. Критически оценены современные вакуумные методы нанесения таких покрытий (магнетронное распыление, CVD, PVD), отличающиеся высокой энергоемкостью и ограниченными размерами обрабатываемых подложек.

В качестве технологической основы для решения проблемы предложен экстракционно-пиролитический метод, позволяющий получать однородные оксидные пленки

на обширных поверхностях без использования вакуумного оборудования, благодаря чему возможно снижение себестоимости и повышение технологичности.

На основании проведенного анализа сформулированы задачи диссертационного исследования, направленные на разработку и внедрение эффективных прозрачных защитных экранов с оксидными покрытиями, получаемыми ЭПМ, для улучшения условий труда на рабочих местах с источниками ИК- и УФ-излучения.

**Во второй главе** представлены результаты инструментальной оценки и анализа опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) на конкретных рабочих местах литейного, термического и сварочного производств, подтверждающие актуальность и необходимость проведения исследования.

На основе натуральных измерений, скорректированных по данным специальной оценки условий труда (СОУТ), выполнен количественный анализ комплекса ОВПФ. Установлено, что на рабочих местах литейного и термического цехов (литейщик, сталевар, сушильщик, огнеупорщик, термист) параметры микроклимата, в частности интенсивность теплового излучения, являются одним из превалирующих вредных факторов (таблица 1, рисунок 1). Измеренные значения интенсивности теплового излучения составляют от 144,8 до 650 Вт/м<sup>2</sup>, что в 1,1–4,6 раза превышает допустимый уровень (140 Вт/м<sup>2</sup>).

Таблица 1 – Результаты измерений параметров микроклимата на рабочих местах литейного и термического цехов

Точки измерений	Температура, °С		ТНС-индекс, °С		Скорость движения воздуха, м/с		Относительная влажность воздуха, %	Интенсивность теплового излучения, Вт/м <sup>2</sup>		
	h=0,1 м	h=1,5 м	h=0,1 м	h=1,5 м	h=0,1 м	h=1,5 м		h=0,5 м	h=1,0 м	h=1,5 м
РМ огнеупорщика	26,7	29,5	21,8	22,7	0,5	0,28	34,2	144,8	184,5	201,5
РМ сталевара	33,5	35,8	26,4	28,5	0,29	0,36	35	218,0	375,5	318,5
РМ литейщика	33,5	35,8	26,4	28,5	0,29	0,36	35	218,0	375,5	318,5
РМ сушильщика	31,8	32,6	19,6	19,7	0,3	0,38	20	275,5	346,5	379,8
РМ термиста	32,6	35,0	36,6	36,7	0,4	0,35	35	236,5	433,5	650,0

Как показывают данные таблицы 1 и рисунка 1, наибольшие превышения зафиксированы на рабочем месте термиста. Это приводит к повышенным значениям температуры воздуха (до 35,8 °С) и индекса тепловой нагрузки (ТНС-индекс до 36,7 °С) и определяет общий класс условий труда как вредный (3.2–3.3).

Анализ других факторов (химические вещества, шум, тяжесть труда) также показал наличие превышений нормативов, что усугубляет общую вредность условий труда на исследуемых рабочих местах металлургического и машиностроительного производств.

Для сварочного цеха (рабочие места электрогазосварщиков, слесарей) ключевым идентифицированным вредным физическим фактором является ультрафиолетовое излучение. Измеренная интенсивность УФ-излучения в диапазонах УФ-В и УФ-С на рабочих местах сварщиков составляет 3,5–3,7 Вт/м<sup>2</sup>, что в 3,5–3,7 раза превышает предельно допустимый уровень (1 Вт/м<sup>2</sup>) при использовании СИЗ. Данное

превышение, наряду с повышенными уровнями шума (83,3–94,0 дБА) и концентрацией оксида углерода, формирует вредные условия труда классов 3.1 и 3.2. Полученные измерения значения интенсивности ультрафиолетового излучения, а также допустимые нормы приведены в таблице 2. Измерения проводились во время проведения сварочных работ.

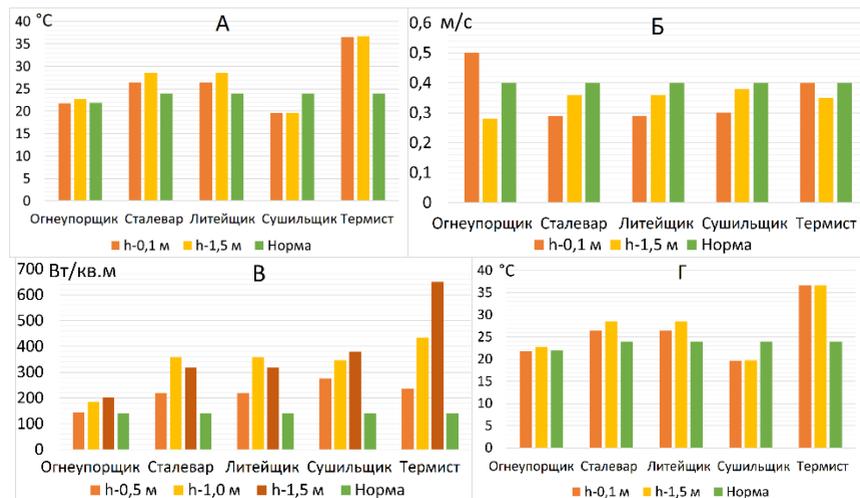


Рисунок 1 – Данные измерений на рабочих местах огнеупорщика, сталевара, литейщика, сушильщика, термиста:  
 А) температуры; Б) скорости воздушного потока; В) интенсивности теплового излучения; Г) ТНС-индекса в сравнении с нормами

Таблица 2 – Интенсивности ультрафиолетового излучения, полученные в ходе измерений, Вт/м<sup>2</sup>

Место измерения	Измеренные значения интенсивности УФ-излучения, Вт/м <sup>2</sup> , с учетом спектрального состава излучения		
	УФ-В	УФ-С	УФ-В + УФ-С
<b>Норма</b>	-	-	<b>1</b>
Электрогазосварщик	1,8	1,7	3,5
<b>Превышение</b>			<b>2,5</b>
Электрогазосварщик ручной сварки	1,8	1,9	3,7
<b>Превышение</b>			<b>2,7</b>
Слесарь по сборке металлоконструкций	1,8	1,9	3,7
<b>Превышение</b>			<b>2,7</b>
Слесарь-инструментальщик	1,2	1,4	2,6
<b>Превышение</b>			<b>1,6</b>

Исследование спектрального состава ультрафиолетового излучения источников этого излучения в сварочном цехе показало, что излучение, воздействующее на работников, лежит в диапазоне длин волн 200–315 нм.

Таким образом, проведенный анализ количественно подтвердил гипотезу о том, что тепловое и ультрафиолетовое излучение выступает доминирующим вредным физическим фактором на исследуемых рабочих местах, определяющим класс условий труда и создающим риск для здоровья работников. Полученные данные легли в основу формулирования конкретных технических требований к средствам коллективной защиты: необходимо обеспечить снижение интенсивности ИК-излучения на 4–510 Вт/м<sup>2</sup>, а УФ-излучения (УФ-В+УФ-С) – не менее чем на 2,5–2,7 Вт/м<sup>2</sup> для приведения параметров в соответствие санитарным нормам. Эти требования стали исходными для разработки и оценки эффективности защитных экранов в последующих главах работы.

Полученные данные показывают необходимость использования защитных средств, в том числе экранов от ИК- и УФ-излучения, на рассмотренных рабочих местах. Для этого требуется разработать масштабный и малозатратный метод нанесения защитных покрытий, обеспечивающих защиту от ИК- и УФ-излучения и визуальный доступ к объекту работы.

**В третьей главе** изучен экстракционно-пиролитический метод получения оксидных покрытий, исследованы их структурно-морфологические и оптические свойства, определяющие эффективность защиты от ИК- и УФ-излучения. Разработаны составы пленкообразующих растворов на основе карбоксилатов металлов. Для защиты от ИК-излучения синтезированы пленки сложных оксидов: диоксида циркония, стабилизированного иттрием (Zr-Y-O/YSZ), цирконата лантана (La-Zr-O), оксида лантана-церия (La-Ce-O), оксида индия-олова (In-Sn-O/ITO). Для защиты от УФ-излучения получены пленки оксидов циркония (ZrO<sub>2</sub>), цинка (ZnO), титана (TiO<sub>2</sub>), меди (CuO), иттрия (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а также ITO.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема получения пленок экстракционно-пиролитическим методом.

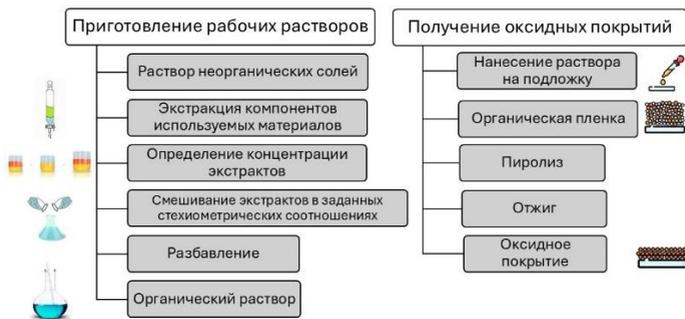
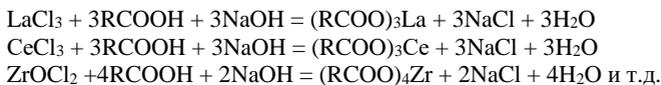


Рисунок 2 – Принципиальная схема экстракционно-пиролитического метода получения прозрачных оксидных покрытий

Для экстракции металлов использованы катионообменные экстрагенты – монокарбоновые кислоты фракций C<sub>5</sub>–C<sub>9</sub>, которые являются вторичным продуктом СПО «Каустик» (г. Стерлитамак), существуют в жидком виде и смешиваются с водной фазой. В качестве исходных веществ использовались растворы неорганических солей металлов. Для экстракции требуемого количества целевого металла в систему добавлялся раствор, содержащий расчетное количество гидроксида натрия в соответствии с уравнениями:



Подложка с нанесенной смачивающей пленкой предварительно нагревалась над печью для удаления избытка раствора экстрагента и помещалась в печь на три минуты. Режимы пиролиза подбирались на основе данных термогравиметрического анализа разложения экстрактов, которое происходит достаточно быстро в узком диапазоне температур для всех экстрактов металлов.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) установлено, что полученные покрытия являются наноструктурированными, сплошными, без макроскопических дефектов, микроструктуры полученных покрытий: оксида циркония, стабилизированного иттрием (YSZ), оксида индия-олова (ITO), оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) и оксида никеля (NiO) представлены на рисунках 3–6. Определена толщина пленок (100–450 нм) и проведен анализ их поверхности (оценка размера зерен, шероховатости, лакуарности и фрактальной размерности).

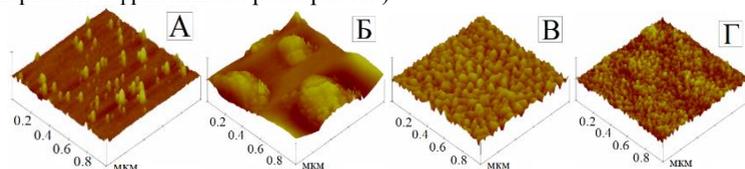


Рисунок 3 – АСМ-изображения пленок YSZ, 150 нм, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В), 800 °С (Г)

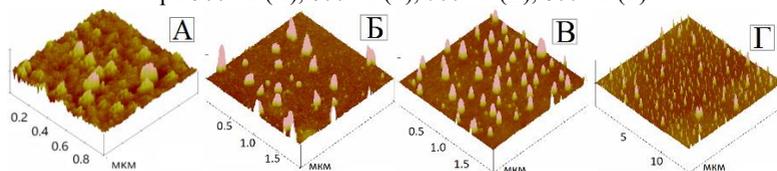


Рисунок 4 – АСМ-изображения пленок ITO, 450 нм, отожженных при 450 °С (А), 500 °С (Б), 550 °С (В), 600 °С (Г)

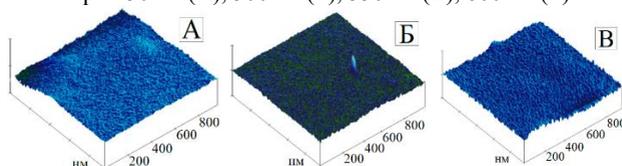


Рисунок 5 – АСМ-изображения пленок  $\text{TiO}_2$ , 300 нм, с концентрацией 0,215 мг/мл, отожженных при 550 °С (А), 600 °С (Б), 650 °С (В)

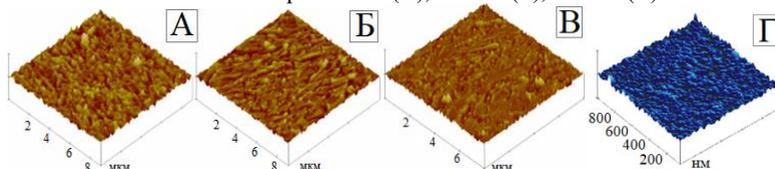


Рисунок 6 – АСМ-изображения пленок NiO, полученных из раствора с концентрацией: 6 % (А); 3 % (Б); 2 % (В) при 450 °С и 2 % при 600 °С (Г)

**Морфология покрытий для защиты от ИК-излучения.** YSZ (оксид циркония, стабилизированный иттрием) после отжига при 500 °С формирует конусообразную зернистую структуру с высокой шероховатостью (до 16,5 нм) и фрактальной размерностью (1,21), что способствует рассеянию и поглощению ИК-излучения. При 600 °С структура становится крупнозернистой (до 1 мкм) с меньшей шероховатостью (7 нм), но более высокой фрактальной размерностью (1,53). Наиболее эффективной для ИК-защиты является структура после отжига при 700 °С, где сочетаются гладкость (шероховатость до 5 нм), нанозернистость (~10 нм), максимальная фрактальная размерность (1,70) и минимальная лакуарность (0,38), что обеспечивает плотное однородное покрытие с развитой поверхностью для оптимального взаимодействия с излучением. ITO-пленка (на основе оксида индия-олова) характеризуется наноструктурированной, гранулированной морфологией. Повышение температуры отжига оксидных пленок до 600 °С приводит к рекристаллизации и формированию грубой крупнозернистой структуры с ростом шероховатости с 3,9 нм до 49–110 нм. Такая морфологическая трансформация обуславливает ожидаемое снижение прозрачности в ИК-диапазоне, что подтверждает рост эффективности защиты от ИК-излучения при высокотемпературном отжиге. Несмотря на это, покрытие сохраняет высокую прозрачность в видимой области. Гранулированная структура ITO способствует повышенному рассеянию и поглощению в среднем ИК-диапазоне, что дополнительно усиливает теплозащитный эффект.

**Морфология покрытий для защиты от УФ-излучения.** TiO<sub>2</sub> (диоксид титана) формирует плотные, однородные нано пленки с четко выраженной кристаллической структурой (преимущественно анатаз). Такая плотная и однородная структура оптимальна для глубокого поглощения УФ-излучения (особенно УФ-В/УФ-С) благодаря собственной ширине запрещенной зоны, при сохранении хорошей прозрачности в видимой области. NiO (оксид никеля) образует пористые, агрегированные наночастицы с размером агрегатов до 130 нм. Высокая пористость и развитая поверхность способствуют рассеянию УФ-излучения, но могут снижать прозрачность в видимом диапазоне. Температура отжига не оказывает значительного влияния на микроструктуру, как и концентрация раствора, однако при большей концентрации структура более плотная, что положительно влияет на свойства защиты от УФ. ITO в контексте УФ-защиты проявляет аморфно-нанокристаллическую структуру. Это обеспечивает эффективное поглощение в УФ-диапазоне за счет межзонных переходов, при этом пленка остается высокопрозрачной для видимого света.

Установлены закономерности влияния концентрации прекурсора, температуры и времени отжига на толщину, кристалличность и, как следствие, на оптические свойства покрытий. Оптимизация этих параметров позволила целенаправленно получать пленки с заданными селективными характеристиками.

**Исследование спектров пропускания в ИК-диапазоне** пленок сложных оксидов на стекле, полученных ЭПМ при различных температуре и толщине пленок, позволили оптимизировать составы, толщины и температуры отжига пленок для получения наиболее эффективных теплозащитных покрытий. Определена зависимость защитных свойств покрытий от параметров микроструктуры пленок для выбора режимов синтеза наиболее эффективных покрытий в ИК-диапазоне.

Установлено, что тонкие пленки (150 нм) во всем диапазоне ИК-излучения снижают излучение недостаточно эффективно, наибольший интерес для защиты от ИК-излучения представляют покрытия толщиной 300 и 450 нм.

ИК-спектры пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O, толщиной 300 нм, отожженных при температуре 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 7.

После отжига пленок толщиной 300 нм при 500 °С, в диапазоне около 2,9 мкм пленка Zr-Y-O снижает прозрачность на 45 %, а пленка La-Zr-O – на 35 %. Пленки составов La-Ce-O и In-Sn-O снижают пропускание ИК-излучения на 20–25 % для 2,9 мкм. Для 4,2–4,8 мкм пленки La-Ce-O, La-Zr-O и In-Sn-O снижают пропускание излучения в среднем на 50 %, пленка Zr-Y-O – на 25 %.

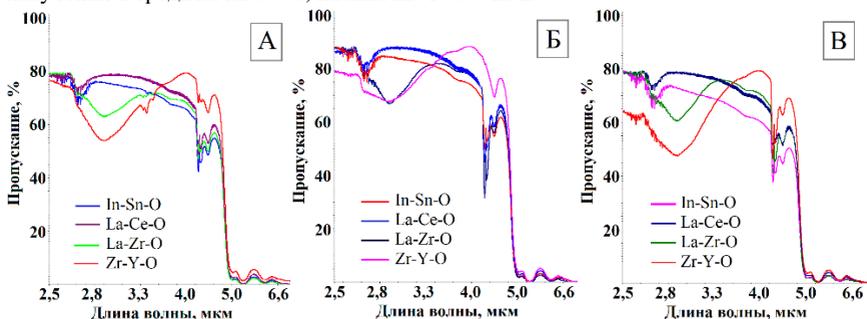


Рисунок 7 – ИК-спектры пропускания оксидов пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O на кварце толщиной **300 нм**, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В) относительно воздуха

Повышение температуры отжига до 600 °С (рисунок 7, Б) не привело к существенным изменениям, пленка Zr-Y-O проявила повышенную эффективность снижения ИК-излучения с длиной волны 2,5–2,6 мкм – на 20 %. В области 4,2–4,7 мкм у пленки La-Zr-O наблюдается минимум поглощения равный 70 % на длине волны 4,3 мкм. Дальнейшее повышение температуры отжига до 700 °С (рисунок 7, В) повысило эффективность пленок – пропускание в диапазоне 2,5–2,6 мкм снизилось на 20 % для всех составов, а для состава Zr-Y-O на 40 %. Для длины волны около 2,9 мкм пропускание излучения снизилось на 55 % у пленки Zr-Y-O, что является максимальным значением среди всех образцов в данном диапазоне.

ИК-спектры пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O толщиной 450 нм, отожженных при температуре 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 8.

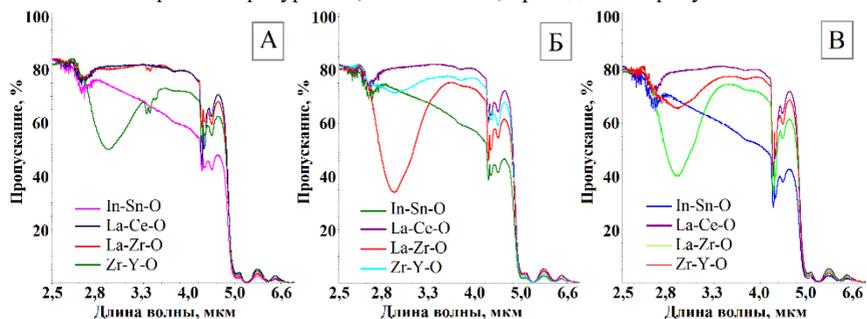


Рисунок 8 – ИК-спектры пропускания оксидов пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O на кварце толщиной **450 нм**, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В) относительно воздуха

ИК-защитная эффективность толстых пленок (450 нм) зависит от температуры отжига и состава покрытия. После отжига при 500 °С (рисунок 8, А) пленка La-Zr-O снижает пропускание на 50 % на длине волны около 2,9 мкм и на 30–35 % в диапазоне 4,2–4,8 мкм. Покрытие In-Sn-O уменьшает пропускание на 30–50 % в диапазоне 2,9–4,2 мкм. Пленки Zr-Y-O (из-за деградации пленки, обусловленной ростом размера зерен) и La-Ce-O в этих условиях менее эффективны (снижение в среднем на 20 % в диапазоне 2,5–4,2 мкм и до 40 % в диапазоне 4,2–4,8 мкм). После отжига при 600 °С (рисунок 8, Б) толстая пленка La-Zr-O снижает пропускание почти на 70 % на 2,9 мкм, эффективность Zr-Y-O составляет 30 %. Покрытие In-Sn-O сохраняет снижение пропускания на 30–50 % (2,9–4,2 мкм) и становится наиболее эффективным в диапазоне 4,2–4,6 мкм (55–60 %). Дальнейший нагрев до 700 °С (рисунок 8, В) приводит к снижению эффективности La-Zr-O до 60 %. Для In-Sn-O наблюдается дальнейшее повышение эффективности (60–70 %). Для всех покрытий в диапазоне 4,2–4,6 мкм прозрачность дополнительно снижается примерно на 10 % по сравнению с образцами, отожженными при 600 °С.

Сравнение спектров ИК-пропускания для пленки Zr-Y-O показало, что наиболее эффективная защита наблюдается для пленки толщиной 300 нм, отожженной при 500 и 700 °С. Вероятно, высокотемпературный отжиг при 700 °С способствует растеканию зерен по поверхности и снижению шероховатости поверхности покрытия.

Сравнение спектров ИК-пропускания для пленки La-Zr-O показало, что наиболее эффективная защита наблюдается для пленки толщиной 450 нм, отожженной при 600 °С. При этом пленка состава La-Zr-O наиболее эффективно снижает пропускание ИК-излучения – на 50–65 %.

Сравнение спектров ИК-пропускания для пленки ИТО показало, что наиболее эффективная защита наблюдается для пленки толщиной 450 нм, отожженной при 700 °С.

Пленка La-Ce-O, снижает ИК-пропускание на 25–30 % в зависимости от толщины и наиболее эффективна при толщине 300 нм.

**Исследованы спектры пропускания в УФ-диапазоне излучения.** Установлено, что наиболее эффективно поглощают излучение с длиной волны менее 380 нм пленки оксида титана, индия-олова, никеля и меди, спектры полученных покрытий в УФ и видимом диапазоне показаны на рисунках 9-11.

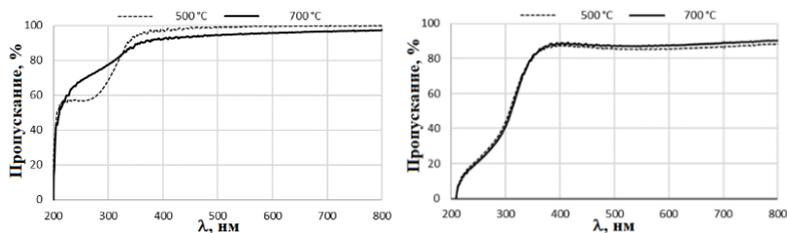


Рисунок 9 – Спектры образцов с покрытиями: TiO<sub>2</sub> 2 слоя – 60 нм (А) и ИТО 5 слоев – 150 нм (Б); температура отжига 500 °С (·····), 700 °С (—)

Пленка TiO<sub>2</sub> после пиролиза при 500 °С задерживает УФ-излучение приблизительно на 50 % (рисунок 9, А). Кристаллизация после отжига при 700 °С приводит к резкому росту прозрачности в области около 220–330 нм и незначительному снижению при более высоких длинах волн. Пропускание УФ-излучения повышается при

кристаллизации, поскольку зерна в пленке растут и агломерируются, обнажая подложку. Пленка ИТО ( $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$ ) задерживает УФ-излучение от 70 до 100 % в диапазоне 195–280 нм, т. е. часть жесткого диапазона УФ-С (100–280 нм), как показано на рисунке 9, Б. В диапазоне УФ-В (280–315 нм) поглощение УФ-лучей достигает 30 %. Для слоя ИТО изменение прозрачности при кристаллизации минимально – наблюдается крайне незначительное снижение прозрачности в УФ-области (менее 320 нм) и рост в видимой (свыше 380 нм).

Особый интерес представляют светозащитные полупрозрачные в видимом диапазоне оксидные пленки. Впервые установлено, что пленка оксида никеля толщиной 60 нм задерживает УФ-излучение в диапазоне 200–300 нм на 90 % (рисунок 10, А). Увеличение ее толщины до 150 нм приводит к росту прозрачности в данной области (рисунок 10, Б). Повышение температуры обработки до 700 °С в обоих случаях приводит к росту прозрачности в видимой области примерно на 15 %. В диапазоне 210–230 нм прозрачность составляет 5 % (для пленки толщиной 60 нм) и 25 % (для пленки толщиной 150 нм). В видимой области спектра прозрачность пленок при кристаллизации увеличивается от 70–80 до 80–90 %.

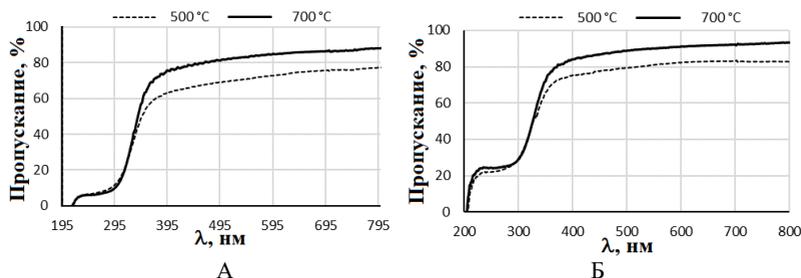


Рисунок 10 – Спектры образцов с покрытиями NiO: 2 слоя – 60 нм (А); 5 слоев – 150 нм (Б); температура отжига 500 °С (····), 700 °С (—)

Пропускание пленок  $\text{CuO}$  толщиной 60 и 150 нм в УФ-области не превышает 30 и 5 % соответственно, а в видимой области спектра возрастает до 60 % (рисунок 11). При кристаллизации прозрачность увеличивается, за исключением области свыше 700 нм, в которой для пленок толщиной 150 нм наблюдается некоторое снижение прозрачности (рисунок 11, Б).

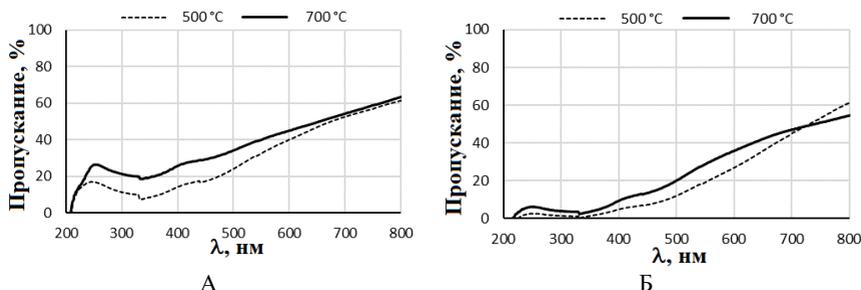


Рисунок 11 – Спектры образцов с покрытиями  $\text{CuO}$ : 2 слоя – 60 нм (А); 5 слоев – 150 нм (Б); температура отжига 500 °С (····), 700 °С (—)

Ширина запрещенной зоны оксидов ( $E_g$ , эВ) влияет на их оптические свойства. Чтобы материал был непрозрачным в определенном спектральном диапазоне, его  $E_g$  должна быть меньше энергии фотонов этого диапазона. Теоретические расчеты ширины запрещенной зоны защитных покрытий с использованием уравнения Тауца выявили диапазоны эффективности оксидных покрытий для защиты в УФ-диапазоне спектра.

Метод Тауца был использован для прямой оценки ширины запрещенной зоны полученных оксидных пленок. Поглощение света в полупроводнике вблизи края фундаментального поглощения (когда энергия фотона ( $h\nu$ )  $> E_g$ ) описывается законом Тауца:

$$\alpha h\nu = (h\nu - E_g)^m \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения (в  $\text{см}^{-1}$ );  $h\nu$  – энергия фотона ( $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света);  $m$  – показатель степени, который определяется типом оптического перехода.

Для построения графика Тауца из данного закона была выведена формула для получения значений по оси ординат:

$$Y = \left( \frac{D+2 \lg(1-R)}{\lambda} \right)^2, \quad (2)$$

где  $D$  – оптическая плотность;  $R$  – коэффициент отражения;  $\lambda$  – длина волны.

По оси абсцисс откладывается энергия фотона ( $h\nu = 1240/\lambda$ ).

Экстраполируя самый левый линейный участок графика до пересечения с осью абсцисс, в точке пересечения получим значение  $E_g$ .

Расчетные значения  $E_g$  для исследуемых оксидных пленок варьируются в зависимости от состава, толщины и температуры отжига. Для  $\text{Y}_2\text{O}_3$   $E_g$  варьируется в диапазоне 5,3–6,2 эВ, что превышает теоретические данные. Наибольшее значение 6,2 эВ (200 нм) – у пленки толщиной 150 нм, отожженной при 500 °С; у пленок  $\text{ZnO}$  наибольшая прозрачность – в УФ-области и  $E_g \sim 6$  эВ. Для пленки 60 нм при 500 °С  $E_g$  снижается до 3,3 эВ (376 нм); для пленки  $\text{ZrO}_2$   $E_g$  варьируется в диапазоне 4,72–5,64 эВ. Наибольшая прозрачность в УФ-диапазоне соответствует  $E_g = 5,64$  эВ (220 нм) для пленки 60 нм, при 700 °С; для  $\text{TiO}_2$   $E_g = 3,2$ –3,5 эВ. Наибольшее значение 3,5 эВ (354 нм) достигается при отжиге при 500 °С; у покрытий  $\text{ITO}$   $E_g \sim 3,7$  эВ для пленок, отожженных при 500 и 700 °С, что согласуется со справочными данными (3,5–4,3 эВ). Спектры подтверждают низкую прозрачность при  $\lambda < 280$  нм; для пленок  $\text{NiO}$   $E_g$  варьируется в диапазоне 3,6–3,7 эВ, что соответствует справочным значениям (3,7–4,0 эВ); для  $\text{CuO}$  1,7–2,1 эВ, эти пленки обладают наименьшей прозрачностью в УФ- и видимом диапазоне, особенно при увеличении толщины.

Установлено, что в зависимости от природы и толщины формируемых на поверхности кварцевого стекла оксидных покрытий можно регулировать характеристики их светопропускания, добиваясь селективного увеличения или снижения прозрачности в отдельных областях спектра.

**Для исследования эффективности теплозащитных экранов** для защиты от инфракрасного излучения в лабораторных условиях использовалась установка с инфракрасным обогревателем Timberk TCH Q2 800 в качестве источника. Для измерения интенсивности теплового излучения использовался радиометр теплового излучения БВЕК43 1110.10 РЭ, помимо теплового излучения измерялись энергетическая яркость (радиометр БВЕК43 1110.10 РЭ), температура поверхности (пирометр

FLUKE 59 MAX), температура воздуха (анемометр TROTEC BA16). Методика проведения эксперимента заключалась в измерении теплового излучения и температуры без экрана, при наличии экрана без покрытия, при наличии экрана с покрытием на разных расстояниях от источника излучения ( $r = 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0$  и  $1,5$  м) на высоте от поверхности ( $h = 0,12$  м). Расстояние между экраном и источником также варьировалось –  $0,2$  и  $0,4$  м. Измерения проводились спустя 30 мин после установки теплозащитного экрана, чтобы учесть нагревание экрана во время эксплуатации. Результаты измерений теплового излучения источника без экрана и со стеклянным экраном без покрытия и экраном с покрытием ИТО приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерения интенсивности теплового излучения источника без экрана, с экраном и с экраном, покрытым ИТО

$r, \text{ м}$	$q, \text{ Вт/м}^2$				
	Без экрана	Экран стекло, $l = 0,2 \text{ м}$	Экран стекло, $l = 0,4 \text{ м}$	Экран ИТО, $l = 0,2 \text{ м}$	Экран ИТО, $l = 0,4 \text{ м}$
0,4	2106	511,6	555,0	124,9	136,75
0,5	1468,6	453,8	528,4	114,45	128,1
0,6	1331,8	417,4	490,6	105,35	118,65
0,7	1179,6	400,2	427,4	99,05	107,85
0,8	1066,6	388,4	357,0	91,1	90,25
0,9	928,4	331,6	309,6	84,9	79,4
1,0	825,8	293,6	273,6	67,4	66,4
1,5	506,2	182,4	185,6	46,6	47,4

Расчет эффективности защиты от теплового излучения с помощью экранов проводился по формуле:

$$\xi = \frac{(q - q_3)}{q} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $q$  – интенсивность теплового излучения без применения защиты,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $q_3$  – интенсивность теплового излучения с применением защиты,  $\text{Вт/м}^2$ .

Результаты расчета эффективности экранов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетная эффективность экранов

$r, \text{ м}$	Эффективность, %			
	$l = 0,2 \text{ м}$		$l = 0,4 \text{ м}$	
	Без покрытия	С покрытием	Без покрытия	С покрытием
0,4	75,7	94,1	73,6	93,5
0,5	69,1	94,6	74,9	93,9
0,6	68,7	95,0	76,7	94,4
0,7	66,1	95,3	79,7	94,9
0,8	63,6	95,7	83,0	95,7
0,9	64,3	96,0	85,3	96,2
1,0	64,4	96,8	87,0	96,8
1,5	64,0	97,8	91,2	97,7

Получена эмпирическая зависимость, выведенная по результатам измерений, которая дает возможность рассчитать интенсивность теплового излучения  $q$  ( $\text{Вт/м}^2$ ) на расстоянии  $r$  (м) от источника при наличии защитного экрана на расстоянии  $l$  (м)

от источника ( $l = 0$  – без экрана) с учетом ближнего поля излучения. Коэффициент  $T_{0type}$ , зависящий от типа экрана, и коэффициент  $\alpha$ , зависящий от расстояния между экраном и источником, получены аппроксимацией данных, итоговая эмпирическая формула для случая с экраном имеет вид:

$$q(r, l, type) = 805,3 \cdot r^{-1,0103} \cdot (T_{0type} + \alpha \cdot l), \quad (4)$$

где  $T_{0uncovered} = 0,2320$ ,  $\alpha = 0,1683$  – для экрана без покрытия ИТО,  
 $T_{0covered} = 0,05861$ ,  $\alpha = 0,03558$  – для стекла с покрытием.

На рисунке 12 представлены результаты расчета интенсивности теплового излучения по полученной эмпирической формуле (4) в сравнении с экспериментальными данными при наличии экрана на расстоянии 0,2 м от источника.

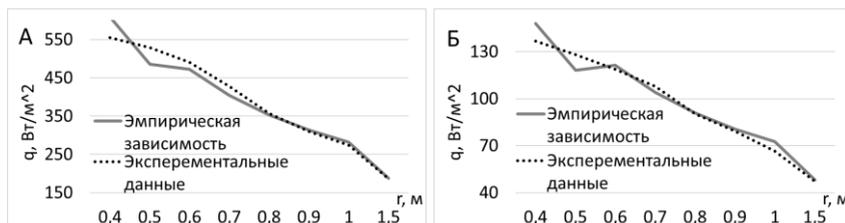


Рисунок 12 – Сравнение интенсивности теплового излучения, полученной эмпирически и экспериментально при наличии экрана на расстоянии 0,2 м от источника: без покрытия (А) и с покрытием (Б)

Для оценки защитных свойств экранов с оксидными покрытиями от ультрафиолетового излучения использовалась лабораторная установка с медицинской ультрафиолетовой лампой в качестве источника УФ-излучения. Уровень УФ-излучения замеряли фотодетектором S302С подключенным к прибору для измерения мощности и энергии излучения Thorlabs PM100D, результаты измерения вывелись на персональный компьютер в специализированном ПО.

По полученным результатам измерений была рассчитана эффективность покрытий с использованием формулы (3), результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Эффективность экранирования УФ излучения стеклами с оксидными покрытиями

$\lambda$ , нм	Эффективность, %						
	Ст.	ZrO <sub>2</sub> , 60 нм	ZrO <sub>2</sub> , 150 нм	ZnO, 60 нм	ZnO, 150 нм	NiO, 60 нм	NiO, 150 нм
200	26,3	86,80	97,98	25,63	25,10	92,88	92,98
260	26,8	33,00	38,30	25,68	26,13	79,08	73,20
310	20,5	32,95	36,15	25,21	24,79	76,97	72,46
$\lambda$ , нм	Эффективность, %						
	Ст.	CuO, 60 нм	CuO, 150 нм	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 150 нм	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 300 нм	TiO <sub>2</sub> , 60 нм	ИТО, 300 нм
200	26,3	98,50	98,38	38,30	37,83	90,08	99,63
260	26,8	77,05	83,25	30,88	30,63	42,38	72,45
310	20,5	75,62	83,62	26,41	28,18	35,31	38,74

На длине волны 200 нм (жесткий УФ-С диапазон) наибольшую эффективность экранирования демонстрируют покрытия на основе ИТО (99 %) и  $\text{CuO}$  (~98 %), что делает их практически абсолютными барьерами для излучения этой длины волны. Высокую эффективность (>90 %) также показывают покрытия  $\text{TiO}_2$  (90 %),  $\text{NiO}$  (~92 %) и  $\text{ZrO}_2$  (до 97 %).

**В четвертой главе** на основе данных глав 2 и 3 сформулирован комплекс организационно-технических мероприятий. Разработаны конструкции прозрачных защитных экранов для литейных/термических и сварочных цехов соответственно, конструкции представлены на рисунке 13.

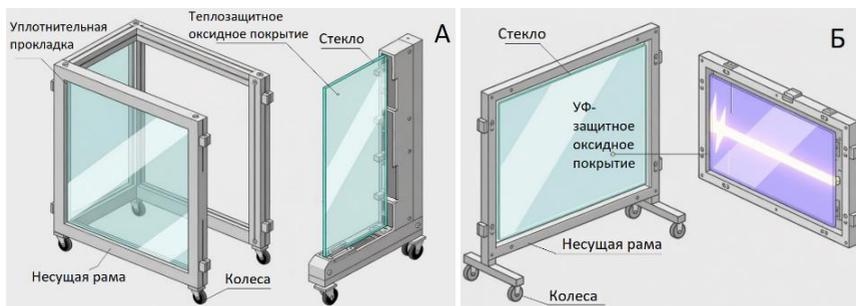


Рисунок 13 – Конструкция теплозащитного экрана для литейного и термического цехов (А); конструкция УФ-защитного экрана для сварочного цеха (Б)

Для защиты от ИК-излучения предложены экраны с многослойными покрытиями на основе оксида индия-олова ( $\text{In-Sn-O}$ ), циркония-иттрия ( $\text{Zr-Y-O}$ ) и лантана-циркония ( $\text{La-Zr-O}$ ), обеспечивающие визуальный контроль технологического процесса. На основе спектрального анализа даны рекомендации по применению конкретных составов в зависимости от температуры источника. Для источников с температурой  $\sim 1200^\circ\text{C}$  ( $\lambda_{\text{max}} \approx 2,5$  мкм) наиболее эффективно покрытие  $\text{Zr-Y-O}$ , отожженное при  $700^\circ\text{C}$ . Для источников с температурой  $\sim 1000^\circ\text{C}$  ( $\lambda_{\text{max}} \approx 3,0$  мкм) оптимально покрытие  $\text{La-Zr-O}$ , отожженное при  $600^\circ\text{C}$ . Для источников с температурой  $\leq 700^\circ\text{C}$  ( $\lambda_{\text{max}} \geq 4,2$  мкм) наилучшие результаты показывает покрытие  $\text{In-Sn-O}$ , отожженное при  $700^\circ\text{C}$ .

Для защиты от УФ-излучения на сварочных постах разработаны экраны и сменные защитные стекла для СИЗ с покрытиями на основе оксида индия-олова (ИТО), диоксида циркония ( $\text{ZrO}_2$ ), диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ), оксида никеля ( $\text{NiO}$ ) и оксида меди ( $\text{CuO}$ ). Для диапазона УФ-А наиболее эффективными прозрачными покрытиями являются оксид индия-олова, диоксид циркония и диоксид титана, при необходимости защиты от светового излучения рекомендовано применение оксида никеля и оксида меди, снижающих видимое излучение на 20 и 50 % соответственно.

Проведены натурные испытания опытных образцов экранов в условиях реального производства. Для литейного и термического цехов установка экранов с оксидными покрытиями между источником излучения (печь, разливочный ковш и др.) и рабочим местом позволила снизить интенсивность теплового излучения в зоне нахождения оператора на 60–75 %. В результате измеренная интенсивность ИК-излучения на рабочих местах снизилась до значений 90–135 Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует допустимому уровню (140 Вт/м<sup>2</sup>). Также зафиксировано улучшение параметров

микроклимата: снижение температуры воздуха в рабочей зоне на 8–13 °С за счет перераспределения экраном воздушных масс и, как следствие, изменение ТНС-индекса на 2–12 °С. Для сварочного цеха: применение прозрачных защитных экранов с УФ-защитными покрытиями на сварочных постах, а также использование оснащенных такими стеклами защитных щитков обеспечило снижение интенсивности УФ-излучения (диапазоны В+С) на рабочих местах с 2,6–3,7 до 0,4–1,0 Вт/м<sup>2</sup> и в смежных зонах. Эти значения не превышают предельно допустимого уровня при условии применения СИЗ.

**Оценка эффективности и экономического аспекта.** Эффективность защитных экранов подтверждена сопоставлением результатов измерений до и после их внедрения. Проведена оценка стоимости производства покрытий ЭПМ. Показано, что себестоимость защитного покрытия для экрана площадью 1 м<sup>2</sup> составляет не более 300 рублей, что существенно ниже стоимости коммерческих аналогов (например, стекло с вакуумным напылением).

Практическая апробация подтвердила высокую эффективность разработанных прозрачных защитных экранов с оксидными покрытиями, полученными ЭПМ. Их применение позволяет снизить уровни ИК- и УФ-излучения на рабочих местах до значений, соответствующих санитарным нормам, и улучшить условия труда по параметрам микроклимата и ультрафиолетового излучения до допустимых. Результаты внедрения оформлены актами о внедрении на металлургических и машиностроительных предприятиях и в учебном процессе ВУЗа.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты диссертации представлены следующими основными выводами:

1. Проведена специальная оценка условий труда на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов, по результатам которой условиям их труда присвоены классы: 3.1 – рабочему месту слесаря-инструментальщика сварочного цеха, 3.2 – рабочим местам сушильщика литейного цеха, термиста термического цеха и электрогазосварщика, электросварщика ручной сварки, слесаря по сборке металлоконструкций сварочного цеха, 3.3 – рабочим местам сталевара, литейщика и огнеупорщика. Одними из основных негативных факторов, влияющими на указанные рабочие места, являются параметры микроклимата и ультрафиолетовое излучение, значительно превышающие санитарные нормы.

2. Проведено исследование параметров микроклимата, создающих на рабочих местах литейного и термического цехов неблагоприятные условия труда. Определены фактические значения превышений этих параметров над предельно допустимыми величинами в производственных помещениях: на рабочем месте огнеупорщика: температуры ( $T$ ) до 8,5 °С, ТНС-индекса 0,8 °С, интенсивности теплового излучения ( $q$ ) до 61,5 Вт/м<sup>2</sup>; на рабочих местах сталевара и литейщика:  $T$  до 13,8 °С, ТНС-индекса 2,5 °С,  $q$  до 178,5 Вт/м<sup>2</sup>; на рабочем месте сушильщика:  $T$  до 10,6 °С,  $q$  до 239,8 Вт/м<sup>2</sup>; на рабочем месте термиста:  $T$  до 13,0 °С, ТНС-индекса 12,7 °С,  $q$  до 510,0 Вт/м<sup>2</sup>. Установлены значения превышения ультрафиолетового излучения на рабочих местах сварочного цеха – от 1,6 Вт/м<sup>2</sup> для рабочего места слесаря-инструментальщика до 2,7 Вт/м<sup>2</sup> для рабочих мест электросварщика ручной сварки и слесаря по сборке металлоконструкций.

3. На основе спектральных исследований в ИК-диапазоне определены наиболее эффективные составы теплозащитных покрытий, такие как оксиды циркония-

иттрия, лантана-циркония и индия-олова в зависимости от температуры источника. На основе спектральных исследований в УФ-диапазоне определены наиболее эффективные составы защитных покрытий, в том числе оксиды индия-олова, цинка, никеля и меди, в зависимости от диапазона УФ-излучения.

4. На основе анализа микроструктуры и спектральных характеристик в зависимости от параметров синтеза, установлены технологические режимы экстракционно-пиролитического нанесения многослойных оксидных покрытий, обеспечивающих селективную прозрачность в видимом диапазоне при одновременной защите от ИК- и/или УФ-излучения.

5. В ходе экспериментальных исследований подтверждены высокие оптические и защитные свойства полученных покрытий: их способность эффективно ослаблять целевые виды излучения при сохранении необходимой светопропускной способности.

6. Разработаны, внедрены и исследованы конструкции прозрачных теплозащитных экранов для рабочих мест литейных и термических цехов, применение которых снижает интенсивность теплового излучения в среднем в 2,8 раза. Разработаны, внедрены и исследованы конструкции прозрачных УФ-защитных экранов и стекол для средств индивидуальной защиты (СИЗ), предназначенные для применения на рабочих местах сварочных цехов, применение которых снижает интенсивность УФ-С/В излучения в среднем в 7 раз.

7. Предложенные рекомендации и решения позволили обеспечить соответствие параметров микроклимата в литейном и термическом цехах, а также уровней ультрафиолетового излучения в сварочном цехе санитарным нормам и установить по ним класс условий труда – 2.

Результаты работы подтверждены и апробированы актами внедрения ООО «Комбайновый завод «РОСТСЕЛЬМАШ» и АО «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод». Отдельные результаты диссертационной работы внедрены и используются в образовательном процессе БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

Предложения по дальнейшему развитию темы диссертации:

1. Углубленное исследование долговечности и эксплуатационных характеристик покрытий.

2. Расширение области применения и адаптация технологий для защиты от излучения в других отраслях, а также исследование покрытий на предмет их эффективности в других диапазонах электромагнитного излучения.

3. Исследование влияния на здоровье и экономической эффективности, включая проведение долгосрочных медико-биологических исследований (в сотрудничестве с профильными институтами) для оценки влияния внедренных защитных средств на динамику показателей здоровья персонала и разработку методики комплексного расчета экономического эффекта от внедрения.

Основное содержание диссертации отражено в ряде публикаций в научных изданиях:

*Статьи в журналах, входящих в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК:*

1. **Храпко, Н. Н.** Разработка технологии получения покрытий для защиты рабочих мест, подверженных инфракрасному и ультрафиолетовому излучениям /

Н. Н. Храпко // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 10. – С. 7–12. – ISSN 0409-2961. (Перечень ВАК № 313 от 16.12.2025, K2, 2.10.3; Scopus Q3)

2. **Храпко, Н. Н.** Свойства оксидных пленок YSZ для теплозащитных экранов литейных и термических цехов / Н. Н. Храпко, Т. Н. Патрушева, С. В. Мякин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14, № 4 (72). – С. 147–152. – ISSN 2221-951X. – EDN INTZPQ. (Перечень ВАК № 171 от 16.12.2025, K2, 2.10.3)

3. Электромагнитная безопасность вблизи станций сотовой связи / **Н. Н. Храпко**, С. В. Ершов, Т. Н. Патрушева, А. В. Храмов // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 12 (288). – С. 16–22. – ISSN 1684-6435. – EDN GANFHC. (Перечень ВАК № 309 от 16.12.2025, K2, 2.10.3)

4. Разработка комбинированной защиты от шума и ЭМИ / Н. И. Иванов, С. В. Ершов, **Н. Н. Храпко**, Т. Н. Патрушева // Noise Theory and Practice. – 2025. – Т. 3, № 11. – С. 198–210. – ISBN 2412-8627. (Перечень ВАК № 100 от 16.12.2025, K2, 1.3.7)

*Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science:*

5. **Храпко, Н. Н.** Оксидные пленки с различными характеристиками пропускания и поглощения в УФ-области, полученные экстракционно-пиролитическим методом / Н. Н. Храпко, Т. Н. Патрушева, С. В. Мякин // Химическая технология. – 2023. – Т. 24, № 7. – С. 258–264. – DOI 10.31044/1684-5811-2023-24-7-258-264. (Переводная версия **Khrapko, N.N.** Oxide films produced by the extraction–pyrolytic method with different transmission and absorption characteristics in the UV range / N. N. Khrapko, T. N. Patrusheva, S. V. Myakin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol 58, No. 1. – P. 48–53. – DOI 10.1134/S0040579524700118. - WoS, Scopus Q4)

*Доклады и тезисы докладов на конференциях:*

6. **Храпко, Н. Н.** Разработка оптически селективных покрытий для защиты от УФ-излучения и обеспечения безопасности при сварочных работах / Н. Н. Храпко // Экологическая неделя БРУ – СПбПУ : сборник материалов II научно-практической конференции с международным участием, 14–16 октября 2025 г. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 169–172.

7. Спектральные характеристики защитных тонкопленочных покрытий на основе оксидов редкоземельных элементов / **Н. Н. Храпко**, С. В. Мякин, Т. Н. Патрушева, В. В. Томаев // Традиции и инновации : материалы XVI Научной конференции, посвященной 197-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – Санкт-Петербург, 2025. – С. 311.

8. **Храпко, Н. Н.** Работа в условиях повышенных температур и термобарьерные покрытия / Н. Н. Храпко, В. В. Семенова, Т. Н. Патрушева // Техносферная безопасность: современные научные тенденции, технические и организационные средства и методы обеспечения, специальное образование : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2024. – С. 113–121. – DOI 10.58168/TECHNOSPHERE2024\_113-121.

9. **Храпко, Н. Н.** Защита от УФ-излучения при проведении сварочных работ / Н. Н. Храпко, Т. Н. Патрушева, С. Д. Ломовцева // Экологическая, промышленная и

энергетическая безопасность – 2023 : сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции. – Севастополь, 2023. – С. 325–329. – ISBN 978-5-605-03773-6. – EDN EMDTWF.

10. **Храпко, Н. Н.** Исследование оксидных покрытий с заданной прозрачностью в различных областях УФ-диапазона, полученных экстракционно-пиролитическим методом / Н. Н. Храпко, С. В. Мякин, Т. Н. Патрушева // Функциональные стекла и стеклообразные материалы: Синтез. Структура. Свойства. GlasSPSchool : сборник тезисов Научной школы-конференции с международным участием для молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 145–146. – ISBN 978-5-00105-749-9. – EDN RFMVTK.

11. **Храпко, Н. Н.** Применение наноматериалов для обеспечения защиты от ультрафиолетового излучения / Н. Н. Храпко // Молодежь. Техника. Космос : труды Четырнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции. В 4 т. Т. 4. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 54–57. – (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 89).

12. Green technology for functional coatings / **N. N. Khrapko**, T. N. Patrusheva, S. K. Petrov, P. V. Matveev // V International Conference “Actual Scientific & Technical Issues of Chemical Safety” (ASTICS-2020) : book of abstracts. – 2020. – P. 121–122. – DOI 10.25514/CHS.2020.05.7755. – EDN RBUUAM.

**Храпко Наталья Николаевна**

## **УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ С ИСТОЧНИКАМИ ИНФРАКРАСНОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В печать \_\_.02.2026. Формат 60×84/16.

Объем 1,4 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.

Издательство Балтийского государственного технического университета  
«ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. 190005, г. Санкт-Петербург,

1-я Красноармейская ул., д. 1.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Тираж 100 экз.