

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова»

На правах рукописи



Храпко Наталья Николаевна

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

2.10.3 – Безопасность труда

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Патрушева Тамара Николаевна

Санкт-Петербург

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	16
1.1 Общие положения	16
1.2 Описание объектов исследования	18
1.3 Наиболее характерные опасные и вредные производственные факторы на рабочих местах металлургического и машиностроительного производства .	28
1.3.1 Общие положения	28
1.3.2 Химические вещества и пыли	30
1.3.3 Шум и вибрация.....	32
1.3.4 Тяжесть и напряженность трудового процесса	34
1.3.5 Параметры микроклимата.....	35
1.3.6 Неионизирующие электромагнитные излучения оптического диапазона	35
1.4 Воздействие инфракрасного и ультрафиолетового излучения на человека	38
1.4.1 Воздействие инфракрасного излучения	38
1.4.2 Воздействие ультрафиолетового излучения	41
1.5 Процессы распространения теплового излучения на рабочих местах литейного и термического цехов.....	43
1.6 Ультрафиолетовое излучение на рабочих местах сварочного цеха	47
1.7 Способы, методы и конструкции по снижению теплового и ультрафиолетового излучения.....	49
1.7.1 Защита от теплового излучения	49
1.7.2 Перспективные составы оксидных теплозащитных покрытий	56
1.7.3 Защита от ультрафиолетового излучения	59
1.7.4 Перспективные составы оксидных покрытий для защиты от УФ- излучения	62
1.8 Методы нанесения оксидных пленок	65

1.9 Постановка задачи исследования	70
1.10 Выводы по главе 1	71
Глава 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ЛИТЕЙНОГО, ТЕРМИЧЕСКОГО И СВАРОЧНОГО ЦЕХОВ.....	73
2.1 Результаты анализа опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах литейного и термического цехов.....	73
2.2 Результаты анализа параметров микроклимата на рабочих местах и определение требований к снижению теплового излучения	86
2.3 Результаты анализа опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах сварочного цеха	90
2.4 Результаты анализа уровней неионизирующего излучения оптического диапазона на рабочих местах и определение требований по его снижению	98
2.5 Выводы по главе 2	99
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ С ОКСИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ РАБОТНИКОВ ЛИТЕЙНЫХ, ТЕРМИЧЕСКИХ И СВАРОЧНЫХ ЦЕХОВ	102
3.1 Методика получения защитных пленок экстракционно-пиролитическим методом	102
3.1.1 Описание экстракционно-пиролитического метода	102
3.1.2 Описание лабораторного эксперимента по получению образцов покрытий.....	107
3.1.3 Исследование термического разложения экстрактов	110
3.2 Исследования и характеристики полученных материалов.....	112
3.2.1 Оценка толщины пленок	112
3.2.2 Исследование микроструктуры покрытий	114
3.2.3 Спектры теплозащитных покрытий на основе оксидных пленок в ИК- диапазоне	127
3.2.4 Исследование спектров пропускания оксидных пленок в различных областях УФ-диапазона.....	135
3.2.5 Оценка ширины запрещенной зоны оксидов.....	142

3.2.6	Определение теплоизоляции экранов с теплозащитными покрытиями	147
3.2.7	Измерение снижения уровня УФ-излучения оксидными покрытиями	157
3.2.8	Оценка погрешности результатов измерений.....	161
3.3	Выводы по главе 3	164
Глава 4.	УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ЛИТЕЙНОГО, ТЕРМИЧЕСКОГО И СВАРОЧНОГО ЦЕХОВ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ И АПРОБАЦИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЙ	166
4.1	Рекомендации.....	166
4.2	Апробация защитных конструкций на основе оксидных покрытий.....	171
4.3	Результаты внедрения экранов на основе оксидных покрытий на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов	176
4.3.1	Литейный и термический цеха	176
4.3.2	Сварочный цех	182
4.4	Расчет стоимости покрытий для прозрачных экранов.....	184
4.5	Выводы по главе 4	186
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	188
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	191
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения	211

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АПФД – Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия.

ВИК – высшие изомеры карбоновых кислот.

ИК – инфракрасный.

ОВПФ – опасные и вредные производственные факторы.

РМ – рабочее место.

СИЗ – средства индивидуальной защиты.

СОУТ – специальная оценка условий труда.

ТБП – термобарьерные покрытия.

УФ – ультрафиолетовый.

УФИ – ультрафиолетовое излучение.

ЭПМ – экстракционно-пиролитический метод.

ITO – оксид индия-олова (In-Sn-O).

YSZ – оксид циркония, стабилизированный иттрием (Zr-Y-O).

ВВЕДЕНИЕ

В процессе трудовой деятельности на человека воздействуют опасные и вредные производственные факторы (ОВПФ). На предприятиях металлургического и машиностроительного комплексов к числу таких факторов относятся тепловое (инфракрасное) и ультрафиолетовое излучение от технологического оборудования. Воздействие перечисленных факторов на персонал часто превышает нормативные значения и создает риски для здоровья.

Повышенные уровни данных спектров излучения представляют серьезную угрозу для здоровья человека, обладая выраженным общетоксическим действием. Так, инфракрасное излучение оказывает преимущественно тепловое воздействие, хронический характер которого приводит к термическому поражению тканей, тепловому удару, тепловому истощению, тепловым обморокам и обезвоживанию организма. Совокупное воздействие теплового излучения и других вредных факторов значительно повышает риск развития профессиональных заболеваний, снижает производительность труда и увеличивает показатели общей и профессиональной заболеваемости.

Ультрафиолетовое излучение (УФИ), особенно его коротковолновый диапазон, обладает значительным фотохимическим и мутагенным потенциалом. При воздействии на органы зрения оно может вызывать профессиональные патологии, такие как фотоофтальмия, конъюнктивит, катаракта и другие [1].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью защиты персонала от широко распространенных в современных производственных процессах источников оптического излучения.

Уильям Гершель открыл ИК-излучение в 1800 году при наблюдении за Солнцем, изучая его тепловое воздействие. Иоганн Вильгельм Риттер и Уильям Хайд Волластон независимо друг от друга открыли УФ-излучение в 1801 году, изучая химическое действие света на хлористое серебро. В настоящее время исследования этих диапазонов спектра продолжают в различных областях, от медицины и астрономии до физики и химии, и ими занимается множество ученых.

Изучением вопроса воздействия УФ и ИК-излучений занималось большое количество известных отечественных ученых: А. В. Воробей [2], Н. Ф. Галанин [3], В. И. Харитонов [4], Д. А. Черенков [5] и др. Среди иностранных исследователей данному вопросу посвятили свои труды Д. Слайни [6], Л. Хортон [7], П. Монтеро [8], Л. Фритчи [9], Д. Баркер [10] и др.

В то время как в научной литературе достаточно полно освещены биологические эффекты воздействия ИК- и УФ-излучения на организм, остается нерешенной ключевая прикладная задача – создание научно обоснованной системы защиты персонала от указанных физических факторов на реальных рабочих местах. Результаты специальной оценки условий труда (СОУТ) для работников литейного, термического и сварочного цехов показывают значительные превышения уровней излучений [11, 12].

В настоящее время для экранирования ИК-излучения используются непрозрачные экраны, для защиты работающих от УФ-излучения используются и специальные стекла, содержащие добавки, поглощающие ультрафиолет. Такие стекла имеют высокую стоимость.

Актуальность темы диссертационного исследования определяется потребностью в развитии ресурсосберегающих и масштабируемых технологий для создания средств индивидуальной и коллективной защиты нового поколения. В контексте защиты от оптических излучений на промышленных объектах ключевым технологическим барьером является отсутствие экономичных методов производства крупногабаритных прозрачных экранов с функцией селективного светофильтра.

В данном исследовании рассмотрен экстракционно-пиролитический метод (ЭПМ) как основа для создания такой технологии. ЭПМ обладает значительным потенциалом для безвакуумного формирования однородных оксидных пленок на обширных подложках, однако его применение для синтеза оксидов с заданными оптическими характеристиками (низким пропусканием в ИК/УФ-диапазоне при высокой прозрачности в видимом диапазоне) изучено недостаточно. В рамках данной работы с помощью ЭПМ были получены и исследованы пленки сложных

оксидов циркония-иттрия, циркония-лантана, лантана-церия и индия-олова для защиты от ИК-излучения. Для защиты от УФ-излучения были получены и исследованы пленки оксидов никеля, меди, индия-олова, титана, циркония, церия, лантана.

Государственной политикой в сфере безопасности и охраны труда главной задачей ставится создание условий труда, соответствующих сохранению жизни и здоровья работника.

Научная гипотеза

Формирование селективных оксидных покрытий экстракционно-пиролитическим методом позволяет создавать прозрачные для видимого света фильтры, эффективно ослабляющие ИК- и УФ-излучение за счёт 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 работы – повышение уровня безопасности и улучшение 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.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ ОВПФ на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов с целью выявления преобладающих 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

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 и провести экономическую оценку предложенных защитных покрытий.

Научная новизна исследования

В результате выполненных теоретических исследований:

1. Предложено и экспериментально обосновано формирование защищающих от ИК- и УФ-излучения оксидных покрытий на стеклянных подложках экстракционно-пиролитическим методом для создания прозрачных защитных экранов, обеспечивающих селективное отражение инфракрасного и ультрафиолетового излучения при сохранении высокой светопропускной способности в видимом диапазоне.

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 ИК- и УФ-диапазона.
2. Развитие теории формирования функциональных оксидных покрытий экстракционно-пиролитическим методом для создания прозрачных покрытий с селективными оптическими свойствами.
3. Разработка научных основ для создания 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.
2. На основе эмпирически установленной зависимости предложен инженерный метод расчета оценки эффективности прозрачных теплозащитных экранов с оксидными покрытиями.
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.
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.

Объектом проводимого 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.

Методы исследования базируются на методиках оценки факторов производственной среды и трудового процесса, методах спектрофотометрии в УФ- и ИК-диапазонах, электронной и атомно-силовой микроскопии, термогравиметрии, рентгенофазового анализа и статистической обработки расчетных и экспериментальных данных.

Достоверность предложенных решений базируется на соблюдении методологии специальной оценки условий труда (СОУТ) и требований нормативных документов (СанПиН, ГОСТ) с использованием оборудования, входящего в Государственный реестр средств измерений и соответствующего требованиям охраны труда. Инструментальные измерения параметров микроклимата выполнены с помощью поверенных средств измерения (радиометр БВЕК43 1110.10 РЭ, пирометр FLUKE 59 MAX, анемометр TROTEC BA16, комплекс «Метеоскоп-М+»), измерения ультрафиолетового излучения на рабочих местах проводились с помощью трехканального УФ-радиометра ТКА-ПКМ 12. Это гарантирует, что полученные данные об уровнях воздействия вредных факторов и

эффективности защиты являются достоверными и могут служить основой для разработки организационно-технических мероприятий.

Теоретические исследования основаны на использовании классических законов оптики и теплового излучения, включая законы Стефана – Больцмана, Планка, Вина, Тауца и другие, закономерности отражения, поглощения и пропускания оптического излучения. Для обоснования функциональных характеристик теплозащитных и оптических экранов применены современные методы физико-химического анализа: спектрофотометрия (СФ-56, Avatar Thermo Nicolet 3600), термоанализ (STA 449 F1), атомно-силовая микроскопия (Veeco MultiMode), что позволило установить связь между составом, структурой оксидных покрытий и их ключевыми для безопасности труда свойствами – коэффициентами пропускания и отражения в исследуемых опасных диапазонах спектра.

Достоверность результатов основана на большом объеме теоретических и экспериментальных исследований, которые основаны на современных методах исследований с использованием математического аппарата, применением стандартной измерительной аппаратуры.

Внедрение результатов работы

Основные результаты исследований, приведенные в работе, нашли свое применение на рабочих местах машиностроительных и металлургических предприятий, а также в учебном процессе, что подтверждено актами внедрения (приложения А, Б, В).

Область исследования соответствует пункту 6 паспорта 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.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях:

1) II Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Техносферная безопасность», г. Санкт-Петербург, 2025 г. Доклад на тему «Разработка оптически селективных покрытий для защиты от ИК-излучения рабочих мест литейных и термических цехов»;

2) научно-практической конференции с международным участием «II экологическая неделя БРУ – СПбПУ», г. Санкт-Петербург, 2025 г. Доклад на тему «Разработка оптически селективных покрытий для защиты от УФ-излучения и обеспечения безопасности при сварочных работах»;

3) XVI научной конференции «ТРАДИЦИИ И ИННОВАЦИИ», посвященной 197-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (СПбГТИ(ТУ)), г. Санкт-Петербург, 2025 г. Секция 16. Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды. Доклад на тему «Спектральные характеристики защитных тонкопленочных покрытий на основе оксидов редкоземельных элементов»;

4) Всероссийской научно-практической конференции «Техносферная безопасность: современные научные тенденции, технические и организационные средства и методы обеспечения, специальное образование», г. Воронеж, 2024 г. Доклад на тему «Работа в условиях повышенных температур и термобарьерные покрытия»;

5) Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023», г. Севастополь, 2023 г. Доклад на тему «Защита от УФ-излучения при проведении сварочных работ»;

6) научной школе-конференции с международным участием для молодых ученых «Функциональные стекла и стеклообразные материалы: Синтез. Структура. Свойства. GlasSPSchool», г. Санкт-Петербург, 2022 г. Доклад на тему «Исследование оксидных покрытий с заданной прозрачностью в различных областях УФ-диапазона, полученных экстракционно-пиролитическим методом».

7) Четырнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 2022 г. Доклад

на тему «Применение наноматериалов для обеспечения защиты от ультрафиолетового излучения»;

8) V Международной конференции «Актуальные научно-технические вопросы химической безопасности» (ASTICS-2020)», г. Казань, 2020 г. Доклад на тему: «Зеленые технологии для функциональных покрытий», а также 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 изданиях и тематических сборниках научных трудов по материалам конференций. Всего по теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 2 в международной наукометрической базе SCOPUS, 4 работы в рецензируемых журналах, входящих в «Перечень ведущих научных журналов и изданий» ВАК Минобрнауки РФ (3 в изданиях категории К-2 по научной специальности 2.10.3).

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 оценки эффективности теплозащитного экрана, исследование влияния экранов на условия труда, обработка и анализ данных, а также подготовка научных статей по результатам работы.

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, предназначенных для защиты работников литейных и термических цехов от инфракрасного излучения, а также методика оценки эффективности таких типов экранов и полученные с её 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 натуральных измерений.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 153 наименований, содержит 60 рисунков, 37 таблиц, 3 приложения и изложена на 210 страницах.

Автор выражает благодарность научному руководителю – доктору технических наук Патрушевой Тамаре Николаевне за неоценимую помощь при проведении исследования, а также своим коллегам – сотрудникам кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, за возможность использования оборудования лаборатории.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общие положения

В диссертационной работе исследуются защитные покрытия как средство от воздействия теплового и ультрафиолетового излучения на рабочих местах производственных участков металлургического и машиностроительного предприятия. В рамках работы натурные исследования и моделирование производились для рабочих мест литейного и сварочного цехов металлургического и машиностроительного предприятия оборонно-промышленного комплекса. В первой главе проведен анализ опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах литейных, термических и сварочных цехов, рассмотрены процессы распространения инфракрасного и ультрафиолетового излучений, существующие методы защиты, а также определены направления дальнейших исследований по поиску способов улучшения условий труда работников.

Металлообрабатывающие предприятия и объединения могут быть составной частью машиностроительной, деревообрабатывающей, медицинской и прочих отраслей. Машиностроительная промышленность в России играет важнейшую роль, т. к. поставляемые технологии требуются во всех промышленных отраслях, а также повышают производительность труда. По данным Росстата и отраслевых аналитических агентств [1–2, 13, 14], в России насчитывается порядка 25–30 тысяч предприятий машиностроительного комплекса (включая производство машин, оборудования, транспортных средств и электроники). Предприятий металлургического комплекса (включая металлургию, металлообработку и производство готовых металлических изделий) в нашей стране около 3,5–4 тысяч. В отчете Минпромторга по металлургической промышленности за 2022 г. и исследовании «Эксперт РА» указано, что 85 % работников таких предприятий – производственный персонал [15–17]. Согласно данным Росстата и Союза машиностроителей России, процент производственного персонала в

машиностроении составляет около 75–80 % [13, 16]. Таким образом, по данным статистики, на рабочих местах в цехах промышленных предприятий металлургии и машиностроения занято более 1,5 млн человек.

На машиностроительных производствах на работающих воздействует целый комплекс опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ). Как правило, основные производственные процессы таких производств являются опасными. Наиболее целесообразно рассматривать вопросы состояния условий труда работников основных цехов, поэтому в данной работе рассмотрены литейные и сварочные цеха. Наличие ОВПФ обуславливает необходимость улучшения условий труда работников и обеспечения устойчивого функционирования предприятия путем снижения воздействия ОВПФ производственной среды и трудового процесса [18].

Учитывая специфику работ на предприятиях металлообрабатывающей и машиностроительной промышленности [19] и общее количество задействованного в них персонала, существует необходимость в анализе опасных и вредных производственных факторов, выявлении превалирующих и снижении их до нормативных значений.

В производственных цехах с источниками теплового излучения, таких как литейные, кузнечно-прессовые, прокатные, термические цеха, где персонал имеет непосредственный контакт с высокими температурами и паром, требуется использование специальной защитной одежды, а также защитных экранов с покрытиями из теплозащитных материалов, чтобы обеспечить безопасность работников и предотвратить тепловые травмы.

Ультрафиолетовое облучение, которому подвергаются работники различных профессий, в том числе сварщики, является одним из основных факторов, которые могут нанести вред здоровью человека. Снижение его влияния обеспечивается в том числе экранами со специальными покрытиями. Воздействие УФ-излучения может привести как к травмам, так и к профессиональным заболеваниям.

1.2 Описание объектов исследования

Литейный цех машиностроительного предприятия ОПК предназначен для проведения операций фасонного и точного литья и модельной оснастки. Сущность процесса литья заключается в том, что расплавленный металл определенного химического состава заливается в непостоянные, приготовленные из песчаной смеси формы или в формы постоянные, сделанные из металла и других материалов, полость которых по своим размерам и конфигурации соответствует форме и размерам требуемой заготовки. После остывания заготовки или готовой детали, называемых отливками, их извлекают из формы. Основные процессы литейного производства: изготовление модели, приготовление формовочной и стержневой смеси, изготовление форм, плавка металла, заливка металла в формы и охлаждение. К завершающим этапам изготовления отливок относятся выбивка, обрубка отливок, очистка, термическая обработка, контроль качества отливок [18].

Оборудование литейного цеха включает:

- индукционные печи емкостью 1000 и 2000 кг, с возможностью одновременной выплавки 3000 кг металла (температура внутри 1800 °С);
- высокоскоростные смесители для дозирования компонентов и смешения компонентов;
- электрические печи с максимальной температурой до 700 °С с габаритными размерами 800×1500×2000 мм для подогрева форм;
- печь для газовой сушки песка (до 750 °С внутри);
- газовый стенд подогрева ковшей (до 1600 °С);
- дробеструйные камеры.

Ниже приведена общая характеристика цеха и его места в структуре предприятия.

Режим работы – смены по 7,2 ч или 12 ч в зависимости от специальности (литейщики, сталевары, огнеупорщики, газорезчики – 7,2 ч, сушильщики – 12 ч).

Численность персонала: 18 чел., среди них 2 литейщика, 2 сталевара, 1 огнеупорщик, 3 сушильщика, 3 газорезчика.

Общая площадь цеха 8500 м², высота 21,5 м, планировка участков фасонного и точного литья представлены на рисунках 1.1 и 1.2.



Рисунок 1.1 – Общий вид участка точного литья литейного цеха

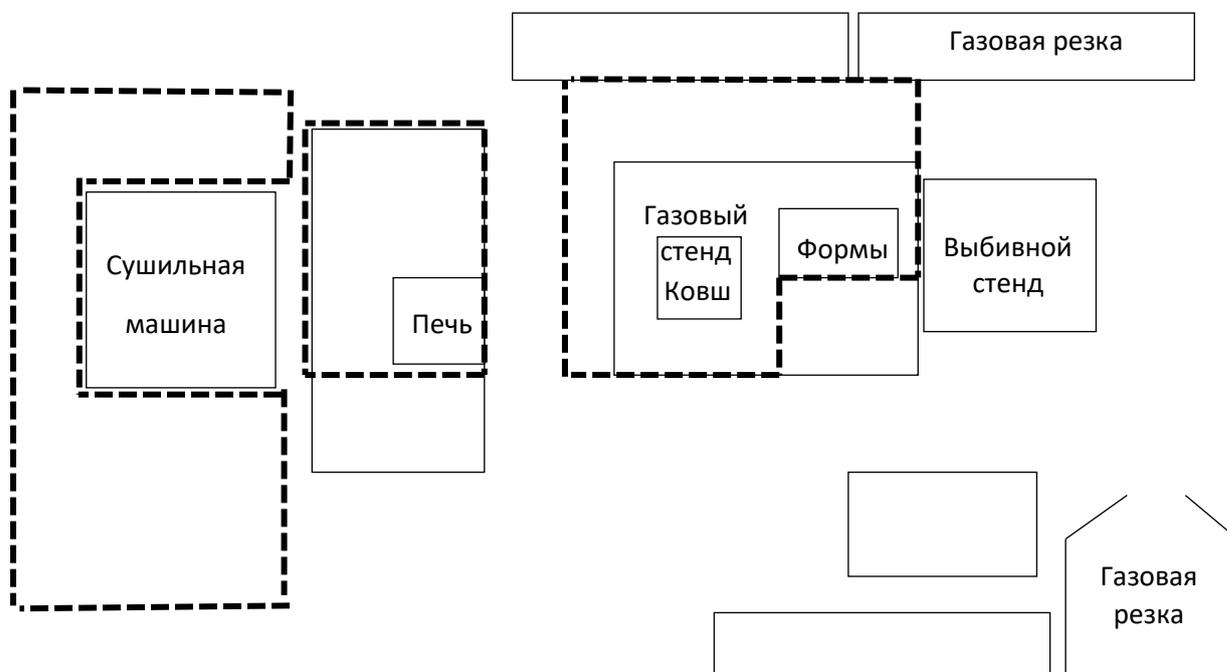


Рисунок 1.2 – Общий вид участка фасонного литья литейного цеха

Рабочие места (РМ) литейного цеха:

– литейщик металлов и сплавов;

- сталевар электропечи;
- сушильщик стержней, форм и формовочных материалов;
- огнеупорщик, занятый на ремонте ковшей в горячем состоянии;
- газорезчик.

Характеристика работ на РМ литейного цеха дана в соответствии с должностными инструкциями организации, а также единым тарифно-квалификационным справочником работ [20] и реестром профессиональных стандартов [21].

К профессиональным обязанностям литейщика металлов и сплавов относится литье деталей в кокиль или форму, наблюдение за ходом плавки, обеспечение нормального хода плавки и устранение неполадок обслуживаемого оборудования, определение качества отливок путем внешнего осмотра. Согласно [22], на данном рабочем месте обязательны к выдаче следующие СИЗ: костюм для защиты от конвективной теплоты и теплового излучения, выплесков расплавленного металла, фартук для защиты от выплесков расплавленного металла, обувь специальная для защиты от контакта с нагретыми поверхностями, искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, механических воздействий (ударов), перчатки для защиты от кратковременного воздействия открытого пламени, конвективной теплоты, теплового излучения и выплесков расплавленного металла, головной убор для защиты от искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, щиток защитный лицевой от теплового излучения, противоаэрозольные, противоаэрозольные с дополнительной защитой от паров и газов средства индивидуальной защиты органов дыхания с фильтрующей лицевой частью – фильтрующие полумаски.

Сталевар электропечи выполняет следующие операции: подготовка плавильных агрегатов, контроль температурных режимов, добавление необходимых компонентов для получения требуемого качества стали, контроль качества сырья и готовой продукции, управление плавильным процессом, обеспечение бесперебойной работы оборудования. Обязательные для данного РМ СИЗ: костюм для защиты от конвективной теплоты, теплового излучения,

кратковременного воздействия открытого пламени и выплесков расплавленного металла, обувь специальная для защиты от механических воздействий (ударов), кратковременного воздействия открытого пламени, контакта с нагретыми поверхностями, перчатки для защиты от конвективной теплоты, теплового излучения, кратковременного воздействия открытого пламени и выплесков расплавленного металла, перчатки для защиты от контакта с нагретой поверхностью, головной убор для защиты от выплесков расплавленного металла, каска защитная от повышенных температур, щиток защитный лицевой от брызг расплавленного металла и горячих частиц, противошумные вкладыши (беруши) или противошумные наушники, включая активные, и их комплектующие, противоаэрозольные, противоаэрозольные с дополнительной защитой от паров и газов средства индивидуальной защиты органов дыхания с фильтрующей лицевой частью – фильтрующие полумаски

К профессиональным обязанностям сушильщика стержней, форм и формовочных материалов относится: сушка сложных форм тонкостенных отливок и стержней в сушилах периодического и непрерывного действия; сушка крупных сложных форм и стержней в сушилах с выкатными тележками, а также на рабочих местах при помощи переносных установок; сушка и охлаждение формовочного материала в установках по методу «в кипящем слое»; загрузка сушил формами и стержнями; сушка форм и стержней и выгрузка их после сушки; управление механизмами при загрузке и выгрузке форм и стержней из печи; регулирование температуры в соответствии с заданным режимом сушки; выявление и устранение неисправностей в работе сушильных устройств; строповка контейнеров, увязка грузов для подъема и перемещения. Обязательные СИЗ для РМ сушильщика стержней, форм и формовочных материалов: костюм для защиты от механических воздействий (истирания), обувь специальная для защиты от механических воздействий (ударов), перчатки для защиты от механических воздействий (истирания), головной убор для защиты от общих производственных загрязнений.

Огнеупорщик, занятый на ремонте ковшей в горячем состоянии, осуществляет следующие операции: выполнение подготовительных работ перед

осуществлением кладки из огнеупорного материала, выполнение работ по кладке и футеровке нагреваемых поверхностей и конструкций, выполнение работ по обмуровке конструкций огнеупорными материалами. Обязательные СИЗ для РМ огнеупорщика: костюм для защиты от конвективной теплоты и теплового излучения, обувь специальная для защиты от кратковременного воздействия открытого пламени, контакта с нагретыми поверхностями, механических воздействий (ударов), перчатки для защиты от контакта с нагретой поверхностью, искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, головной убор для защиты от конвективной теплоты и теплового излучения, каска защитная от повышенных температур, щиток защитный лицевой от брызг расплавленного металла и горячих частиц, противоаэрозольные, противогазовые, противогазоаэрозольные (комбинированные) средства индивидуальной защиты органов дыхания с изолирующей лицевой частью (полумаской, маской, четвертьмаской).

Термический цех машиностроительного предприятия ОПК

Термический цех оснащен следующим оборудованием:

- газовые печи для термической обработки изделий, в том числе крупногабаритных (максимальные температуры до 1100 °С, габаритные размеры (В×Ш×Г) 2000×2000×3500 мм);
- электрические печи – отпускные печи с максимальной температурой до 700 °С с габаритными размерами 800×1500×2000 мм и закалочные печи с максимальной температурой до 1100 °С и габаритными размерами 400×660×1100 мм;
- закалочные баки для охлаждения изделий как в воде, так и в масле;
- соляные электродные ванны для термической обработки изделий в безокислительной среде (максимальные температуры до 1300 °С, габаритные размеры до 300×300×300 мм);
- правильный пресс для правки заготовок;
- дробеструйные камеры.

Ниже приведена общая характеристика цеха и его места в структуре предприятия.

Режим работы – 3 смены по 8 ч.

Численность персонала: 9 чел., среди них 16 термистов.

Общая площадь цеха 3000 м², высота 21,5 м, планировка цеха и рабочих зон представлена на рисунке 1.3.

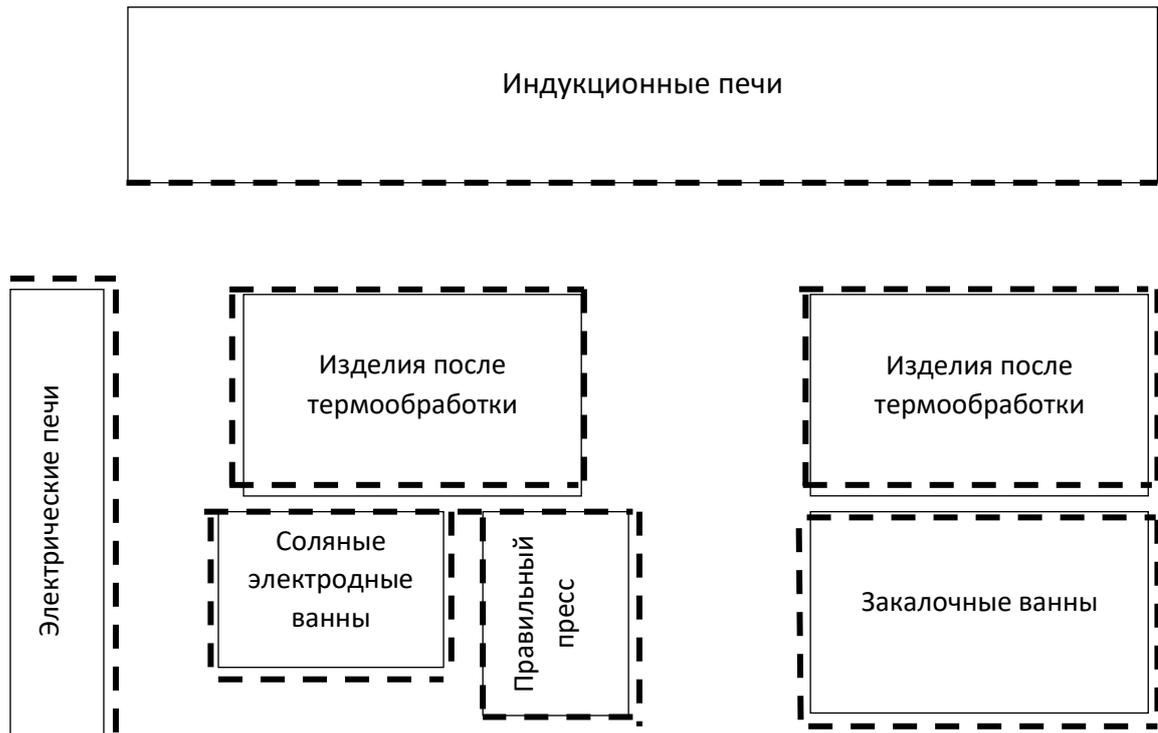


Рисунок 1.3 – Общий вид термического цеха

Рабочие места термического цеха:

- термист;
- оператор гибочного прессы;
- инженер ОТК.

В трудовые обязанности термиста входит: сборка садки, обмуровка ящиков, емкостей и замазывание зазоров в печи, загрузка садки в печь или ванну; подготовка жидкостей для охлаждения; контроль химического состава растворов ванн при термической обработке, проведение подготовительных операций процессов термической обработки изделий различной сложности; контроль

режимов работы термического оборудования в ходе процессов термической обработки изделий; выгрузка из печей, ванн и установок изделий после термической обработки; очистка изделий при помощи моющих машин и сушильного оборудования; выборочный контроль упроченных слоев после термической обработки.

Основные риски на рабочем месте термиста, для защиты от которых выдаются средства индивидуальной защиты, – это горячие поверхности, тепловое излучение, брызги расплавленных солей/металлов, механическое воздействие, пыль (металлическая, аэрозоли), химические вещества (газы, пары, соли). Комплекты выдаваемых СИЗ отличаются в зависимости от вида работ, при этом некоторые СИЗ выдаются для всех видов работ: это каска защитная, подшлемник под каску, ботинки кожаные с защитным подноском, очки защитные или щиток защитный. Костюм с огнезащитной пропиткой или комплект для защиты от повышенных температур выдается при таких видах работ, как закалка, нормализация, отпуск в печах и работа на ваннах. Костюм для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий выдается при газовой цементации в печах, азотировании в печах и цементации твердым карбюризатором в печах. СИЗ для защиты рук также дифференцированы: от механического воздействия и контакта с горячими поверхностями выдаются брезентовые рукавицы, от контакта с агрессивными химическими веществами – резиновые/полимерные перчатки, для защиты от высокой температуры и химических веществ выдаются комбинированные рукавицы/перчатки с покрытием. Наибольший уровень защиты требуется при работе на ваннах, где используется максимальное количество дополнительных СИЗ (огнестойкий костюм + фартук + два типа перчаток), что связано с экстремальными условиями и риском получения тяжелых ожогов.

В сварочном цехе машиностроительного предприятия ОПК проводятся работы по неразъемному соединению металлических деталей и конструкций. В данном цехе представлено следующее оборудование:

– сварочные аппараты:

- 1) Lorch V 50 AC/DC – трехфазный сварочный инвертор для аргодуговой сварки (TIG) с максимальным током 500 А, с возможностью точечной сварки, с переключением тока с АС на DC, и ручной дуговой (MMA) сварки, предназначенный для промышленности;
 - 2) QUAD 450 AC/DC – многофункциональный инверторный сварочный аппарат для различных видов сварки: ручной дуговой сварки (MMA), аргодуговой сварки на постоянном и переменном токе (TIG AC/DC), импульсной аргодуговой сварки, на постоянном и переменном токе (TIG AC/DC PULS), аргодуговой сварки на постоянном и переменном токе с механизированной подачей присадочной проволоки (TIG AC/DC Cold Wire), полуавтоматической сварки в среде защитных газов (MIG/MAG), импульсной полуавтоматической сварки в среде защитных газов (MIG/MAG/pulse);
 - 3) EVOMIG 400 Pro – инверторный сварочный полуавтомат для ручной дуговой сварки (MMA) и аргодуговой сварки (TIG DC Lift);
- ручной электрический инструмент:
- 1) шуруповерты, гайковерты;
 - 2) дрели электрические и перфораторы;
 - 3) углошлифовальные и шлифовальные машины;
- слесарный инструмент:
- 1) слесарные молотки;
 - 2) разводные ключи;
 - 3) плоскогубцы, клещи;
- сварочный позиционер для фиксации и удержания заготовки;
- сварочный стол;
- радиально-сверлильный станок;
- станки фрезерные;
- станки плоскопрофилешлифовальные с ЧПУ.

Ниже дана общая характеристика цеха и его места в структуре предприятия.

Режим работы: две смены по 7,2 ч.

Численность персонала: 14 чел., среди которых 6 сварщиков.

Общая площадь цеха 9000 м², высота помещений 21,5 м, рабочие места, связанные со сваркой, занимают примерно половину цеха, остальное пространство предназначено для других инструментальных работ. Планировка цеха и рабочих зон представлена на рисунке 1.4.

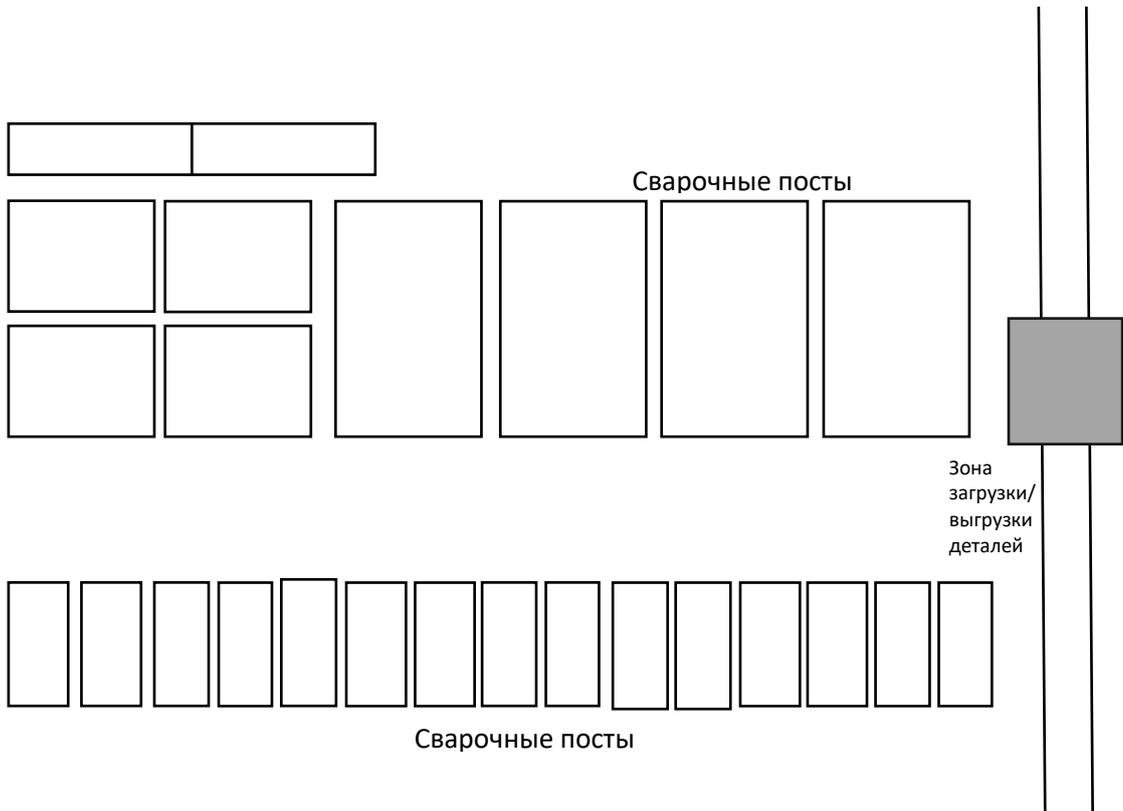


Рисунок 1.4 – Общий вид сварочного цеха

Рабочие места сварочного цеха:

- электрогазосварщик;
- электрогазосварщик ручной сварки;
- слесарь по сборке металлоконструкций;
- наладчик сварочного и газоплазморезательного оборудования;
- сверловщик;
- фрезеровщик;
- шлифовщик.

Сварщик – специалист, который осуществляет сварку различных изделий из металла, его задача заключается в соединении или разрезе металлических

конструкций с помощью сварочного аппарата. Сварщик может работать как на специально оборудованном стационарном сварочном посту, так и не на постоянном рабочем месте, перемещаясь по территории предприятия. Сварочные работы относятся к работам с повышенной опасностью. В основном в цехе для проведения сварочных работ применяется ручная электродуговая сварка. При ремонтных работах применяется также дуговая электросварка металлическим электродом в защитных средах. Защитная среда может быть как инертной (аргон), так и активной (углекислый газ).

В профессиональные обязанности электрогазосварщика входит подготовка, сборка, сварка и зачистка после сварки сварных швов элементов конструкции (изделий, узлов, деталей), сварка (наплавка, резка) сложных и ответственных конструкций (оборудования, изделий, узлов, трубопроводов, деталей) из различных материалов (сталей, чугуна, цветных металлов и сплавов, полимерных материалов), сварка (наплавка, резка) конструкций (оборудования, изделий, узлов, трубопроводов, деталей) любой сложности. Обязательные СИЗ для электрогазосварщика: костюм для защиты от искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, фартук для защиты от искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, обувь специальная для защиты от механических воздействий (ударов), искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, перчатки для защиты от искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, головной убор для защиты от искр и брызг расплавленного металла, металлической окалины, каска защитная от повышенных температур, щиток защитный лицевой от брызг расплавленного металла и горячих частиц, противоаэрозольные, противоаэрозольные с дополнительной защитой от паров и газов средства индивидуальной защиты органов дыхания с фильтрующей лицевой частью – фильтрующие полумаски.

В профессиональные обязанности слесаря – сборщика металлоконструкций входит изготовление деталей металлоконструкций различной сложности, сборка металлоконструкций и узлов металлоконструкций под сварку и клепку, подготовка и проведение гидравлических испытаний. Обязательные СИЗ слесаря по сборке

металлоконструкций: костюм для защиты от механических воздействий (истирания), обувь специальная для защиты от механических воздействий (ударов), перчатки для защиты от механических воздействий (истирания), головной убор для защиты от общих производственных загрязнений, каска защитная от механических воздействий, очки защитные от механических воздействий, в том числе с покрытием от запотевания.

Результаты опроса работающих литейного цеха в условиях влияния УФ-излучения показывают, что фотоофтальмия, покраснение открытых участков кожи и жалобы общего характера (устомление, головная боль) возникают не только у сварщиков, но и у вспомогательного персонала, занятого на смежных участках [23]. При этом персонал на смежных рабочих местах не всегда обеспечивается необходимыми средствами индивидуальной защиты (СИЗ). Поэтому особенно актуальна разработка средств не только индивидуальной, но и коллективной защиты.

1.3 Наиболее характерные опасные и вредные производственные факторы на рабочих местах металлургического и машиностроительного производства

1.3.1 Общие положения

Классический подход к научным работам, посвященным условиям труда, разработал Б. Ч. Месхи [24], который предложил в начале проанализировать основные ОВПФ, а затем, выделив превалирующие факторы, заняться их изучением и снижением их воздействия. В литературе [25–29] не в полном объеме описана проблема ОВПФ на рабочих местах литейных, термических и сварочных цехов металлургических и машиностроительных предприятий, поэтому одними из задач исследования являются:

- выявление основных ОВПФ, изучение и определение превалирующих для дальнейших исследований;

- определение класса условий труда работающих на участках металлообработки.

С целью выявления основных ОВПФ на рабочих местах литейных и сварочных цехов необходимо проанализировать результаты специальной оценки условий труда (СОУТ), проводимой на данных рабочих местах.

СОУТ включает в себя анализ вредных и опасных производственных факторов, а также оценку состояния здоровья работников. Условия труда работающих в литейных, термических и сварочных цехах определяются комплексом производственных факторов [25, 27, 28–30]:

- запыленность и загазованность;
- воздействие шума и вибрации;
- тяжесть трудового процесса;
- параметры микроклимата, среди которых – тепловое излучение, присутствующее на рабочих местах литейного цеха;
- неионизирующие электромагнитные излучения оптического диапазона, характерные для рабочих мест в сварочных цехах.

После проведения анализа ОВПФ необходимо разработать мероприятия по снижению или устранению воздействия вредных и опасных производственных факторов на здоровье работников.

Рассмотрим возможные на рабочих местах литейного и сварочного цеха допустимые (класс 2) и вредные условия труда (класс 3.1, 3.2) [31].

Класс 2 означает, что уровни воздействия на работника вредных и (или) опасных производственных факторов не превышают значений, установленных нормативами, а измеренное функциональное состояние организма работника восстанавливается во время регламентированного отдыха или к началу следующего рабочего дня (смены).

Подкласс 1 класса 3 означает, что измененное в результате воздействия на работника вредных и (или) опасных производственных факторов функциональное состояние организма работника восстанавливается, как правило, при более

длительном, чем до начала следующего рабочего дня (смены), прекращении воздействия данных факторов, и увеличивается риск повреждения здоровья.

Подкласс 2 класса 3 означает, что уровни воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов способны вызвать стойкие функциональные изменения в организме работника, приводящие к появлению и развитию начальных форм профессиональных заболеваний или профессиональных заболеваний легкой степени тяжести (без потери профессиональной трудоспособности), возникающих после продолжительной экспозиции (пятнадцать и более лет).

Общая оценка условий труда по классу (степени) проводится на основании оценок по всем факторам производственной среды и напряженности трудового процесса и устанавливается по наиболее высокому классу и степени вредности. Каждый фактор, превышающий норму, ухудшает класс условий труда. При наличии трех и более факторов производственной среды, относящихся к классу 3.1, общая оценка условий труда соответствует классу 3.2. При наличии двух и более факторов производственной среды, относящихся к классам 3.2, 3.3 и 3.4, общая оценка устанавливается на одну ступень выше.

1.3.2 Химические вещества и пыли

В воздухе рабочей зоны литейных, термических и сварочных цехов могут содержаться различные вредные вещества и пыли, выделяющиеся в результате технологических процессов. Их состав и концентрация зависят от вида обработки металлов, используемых материалов и оборудования. Вещества, выделяющиеся в воздух рабочей зоны, характерные для литейных цехов, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Химические вещества и пыли специфические для воздуха рабочей зоны литейных цехов

Вещество	Источник	Воздействие на организм	ПДК, мг/м³	Класс опасности
1	2	3	4	5
Оксиды углерода:	Горение топлива, восстановление металлов	Удушье, головная боль, риск отравления		4
СО			20	
СО ₂			27 000/9000	

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
Оксиды азота (NO _x) в пересчете на NO ₂	Нагрев металлов в присутствии воздуха	Отек легких, хронические болезни	5	3
Оксиды серы (SO ₂ , SO ₃)	Сера в шихте, топливе	Раздражение дыхательных путей, астма	0,05/10	3
Пары металлов	Плавка цветных металлов	Нейротоксичность, поражение почек		
Свинец и его неоргани- ческие соединения			-/0,05	1
Кадмий и его неоргани- ческие соединения			0,05/0,01	1
Фтористые соединения Азота трифторид (NF ₃)	Рафинирующие добавки	Раздражение кожи и слизистых	30/10	4
Формальдегид	Использование связующих в литейных формах	Канцероген, раздражение глаз и легких	0,5	2
Силикатная пыль	Песчаные и цементо- содержащие смеси	Силикоз лёгких	8/4	3
Диоксид кремния (SiO ₂)			6/2	
Цементная пыль			8	
Фенол	Смолы в ХТС- смесях	Канцероген, аллерген	0,3	2
Амины (диметиламин)	Холоднотверде- ющие смеси	Ожоги слизистых	1	2
Органические пары	Связующие (фурановые смолы)	Поражение печени		
Металлическая пыль	Дробеструйная обработка	Фиброз легких		
Железо (Fe)			-/10	4
Алюминий и его сплавы в пересчете на алюминий (Al)			6/2	3
Абразивная пыль (корунд, карбид кремния)	Очистка отливок	Поражение кожи		
Корунд			-/6	4
Карбид кремния			2/0,5	3
Оксиды металлов	Термическая резка	Профессиональная астма		
Цинк оксид			1,5/0,5	2
Никель оксид			0,05	1
Аммиак (NH ₃)	Разложение азотсодержащих добавок	Раздражение глаз и дыхательных путей	20	4

Таким образом, к основным причинам загрязнения воздуха относятся: образование металлической и абразивной пыли в процессе механической

обработки металлов; выделение газов и образование аэрозолей в процессах сварки и резки металлов; образование оксидов углерода, азота и серы, паров металлов при плавке и разливке металлов; выделение пыли в процессе формовки, а также на выбивных и очистных участках; выделение паров масел и оксидов металлов при термической обработке.

В воздухе термических цехов чаще всего встречаются такие химические вещества, как оксид углерода, диоксид азота и акролеин, большая часть которого выделяется из закалочных масел.

В процессе сварки выделяются вредные вещества в виде твердых частиц и газообразных компонентов. К твердым частицам относятся сварочные аэрозоли, образующиеся в процессе возгонки как металлических, так и неметаллических компонентов. Их химический состав тесно связан с составом сварочных материалов и может включать соединения железа, кремния, марганца, хрома и другие компоненты. К газовым компонентам относятся оксиды азота и углерода, фтористый водород и озон [32, 33].

1.3.3 Шум и вибрация

Повышенный уровень шумового воздействия встречается на многих рабочих местах в сфере металлургического и машиностроительного производства. Нормативным эквивалентным уровнем звука (L_{pAeqT} , дБА) на рабочих местах является 80 дБА [34]. Для литейных производств характерны такие источники шума, как двигатели, насосы, дымососы, вентиляция, воздушные пистолеты и др. Для термических цехов основным источником шума является работа оборудования и системы вентиляции. При электросварочных работах мощным источником широкополосного шума является электрическая дуга, при плазменной резке и сварке струя плазмы, вырывающаяся с высокой скоростью из сопла горелки, создает высокочастотный звук, при газовой резке шум создается струей кислорода, выходящей под высоким давлением из резака. Также шум создается ручным инструментом, используемым для зачистки и шлифовки швов, и другим оборудованием цеха – вентиляцией, компрессорами и др.

По данным ВОЗ [35], при уровне шума свыше 60 дБА уменьшаются скорость перенесения информации, объем кратковременной памяти, количественные и качественные показатели умственной работоспособности, изменяется реакция на различные жизненные ситуации. Последствия ошибок в работе в связи со снижением концентрации внимания из-за мешающего шумового воздействия и частых звуковых сигналов на определенных рабочих местах могут стать причиной травм или гибели работающих и финансового ущерба. Длительное воздействие шума на организм работающего может привести к утомлению слухового анализатора, снижению слуха и при значениях, превышающих нормативные, – к профессиональным заболеваниям органов слуха. Шум как экологический фактор является причиной 15 % всех профессиональных заболеваний [35]. Воздействию шума подвержена центральная нервная система, которая реагирует на уровни акустического давления ниже тех, что вызывают нарушения слуха. Нарушение состояния ЦНС под воздействием шума приводит к снижению внимания и работоспособности, переутомлению, развитию неврозов [35]. Современные исследования показывают, что шум негативно влияет на эндокринную систему, желудочно-кишечный тракт, сердечно-сосудистую систему и может вызывать нарушения функций вестибулярного аппарата [36].

Из-за наличия большого количества оборудования и специфики работы с металлическими заготовками и изделиями, а также за счет общего шумового фона в больших цехах, зачастую не оснащенных преграждающими звук конструкциями для отдельных рабочих мест, повышенные уровни шума, так же как и вредные вещества в воздухе, присутствуют практически на всех рабочих местах.

Уровни шума при ручной электродуговой сварке превышают допустимые значения на 1–4 дБА, при работе на автоматических и полуавтоматических машинах – на 4–8 дБА, при сварке в среде аргона – на 8–12 дБА, при газовой резке – на 7–12 дБА, при зачистке сварных швов ручным инструментом – на 9–14 дБА. По данным измерений СОУТ [30], уровни локальной вибрации при работе с ручными шлифовальными машинками при зачистке сварных швов превышали допустимые значения на 2–6 дБА.

Вред вибрации различается в зависимости от ее уровня и вида. Вибрационное воздействие разделяют на общее и локальное. Для рабочих мест в литейных цехах, таких как гибропескоструйщик, обрубщик, наждачник, чистильщик металла и отливок, формовщик и др., характерна локальная вибрация. Локальная вибрация может привести к развитию вибрационной болезни, особенно у людей, работающих с тяжелым ручным инструментом, что часто встречается в литейных цехах. Это заболевание характеризуется проблемами с суставами, мышцами рук, спазмом сосудов, слабой подвижностью рук, потерей чувствительности, частыми болями и поражением нервной системы (периферических нервов), нарушениями в работе сердечно-сосудистой, нервной и опорно-двигательной систем [37].

К основным техническим способам защиты от шума относятся использование малошумного оборудования, замена пневматического инструмента на электрический, применение виброизолирующих прокладок, креплений, использование звукоизолированных кабин для операторов, установка акустических экранов, установка глушителей в системе вентиляции, а также облицовка стен и потолков звукопоглощающими материалами и монтаж штучных звукопоглотителей в зонах с высоким уровнем шума. Применение звукопоглощающих материалов в цехах с источниками интенсивного тепловыделения ограничено в целях пожарной безопасности.

В связи с актуальностью вопроса снижения шума и вибрации двигателей производственного оборудования, систем вентиляции исследованию вышеуказанных процессов и поиску эффективных виброизолирующих материалов посвящено множество работ [38–40].

1.3.4 Тяжесть и напряженность трудового процесса

Работа в литейных, термических и сварочных цехах сопряжена с высокой физической нагрузкой: это динамическая нагрузка при переносе и укладке заготовок и деталей, статическая нагрузка при фиксации деталей, подъем тяжелых грузов, стереотипные движения и наклоны корпуса. Практически на каждом

рабочем месте присутствуют превышения нормативов тяжести трудового процесса.

Напряженность трудового процесса характеризуется следующими параметрами: интеллектуальные и сенсорные нагрузки при контроле параметров производственного процесса и контроле качества изделий, эмоциональные нагрузки – ответственность за оборудование, монотонность труда.

Все работы по тяжести труда подразделяются на три категории в зависимости от интенсивности энергозатрат организма. Для каждой категории работ в зависимости от их тяжести нормативными документами устанавливаются требования к микроклимату помещения. Благоприятный микроклимат на рабочем месте – важное условие высокопроизводительного труда и профилактики профессиональных заболеваний.

1.3.5 Параметры микроклимата

К контролируемым на рабочем месте параметрам микроклимата относятся температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздуха, давление и интенсивность теплового излучения. На значения допустимых параметров микроклимата оказывают влияние категория работ по уровню энергозатрат и период года.

В литейных и термических цехах параметры микроклимата не соответствуют нормам в основном из-за повышенных значений температуры воздуха, что характерно для рабочих мест, на которых присутствуют источники теплового излучения.

Тепловое излучение – процесс распространения электромагнитных волн в видимой и инфракрасной (ИК) области спектра. Именно инфракрасный участок имеет наибольшую долю энергии, поэтому тепловое излучение наблюдается преимущественно на этом участке.

Инфракрасное излучение – невидимое глазом электромагнитное излучение, которое испускает любое нагретое тело. Длина волны видимого излучения – от 0,38 до 0,77 мкм, инфракрасного – более 0,77 мкм [41].

Инфракрасные лучи расположены между красным концом видимого солнечного света и микроволновым радиоизлучением, охватывают область спектра с длиной волны, лежащей в пределах от 0,76 до 1000 мкм.

К источникам ИК относятся ванны расплавленного металла, горячие заготовки и оборудование, перечисленное в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Теплоизлучающее оборудование на рабочих местах металлургического производства

Оборудование	Температура, °С	Производственные зоны
Плавильные и нагревательные печи	800–2000	Литейные цеха, термические участки
Сталеразливочные ковши	900–1800	Литейные цеха
Кузнечные горны	900–1200	Ковочные цеха, штамповочные участки
Сварочные и плазменные горелки (дуга)	3000–15000	Посты дуговой, плазменной сварки/резки
Индукционные нагреватели	500–1300	Закалочные линии, термообработка
Раскаленные металлические заготовки	500–1200	Прокатные станы, зоны охлаждения отливок
Сушильные камеры	200–400	Участки окраски, литейные формы

Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от источников излучения, нагретых до температуры более 600 °С, не должны превышать 140 Вт/м². При этом облучению не должно подвергаться более 25 % поверхности тела при условии обязательного использования СИЗ, в том числе средств защиты лица и глаз.

Классификация инфракрасных лучей, предложенная Международной комиссией по освещению, используется физиологами [42]. Первая область инфракрасных лучей, согласно этой классификации – ИК-А (λ от 0,74 до 1,4 мкм) – обладает наибольшей проникаемостью через кожу. 14 % лучей с длиной волны $\lambda = 1,0–1,4$ проникает через кожу и 1 % – через кости черепа и твердую мозговую оболочку. По биологической классификации ИК-лучей это точно совпадает с областью ближнего ИК. ИК-Б (λ от 1,4 до 3 мкм) и ИК-С (λ от 3 до 1 мм) по биологической классификации обозначаются как длинноволновый ИК или терагерцовое излучение. Они охватывают излучение с длиной волны от 1,4 до 30 мкм, где диапазон 3–30 мкм приходится на ИК-С.

1.3.6 Неионизирующие электромагнитные излучения оптического диапазона

К неионизирующим электромагнитным излучениям оптического диапазона относятся ультрафиолетовое (УФ) и лазерное излучение.

Основным источником УФ-излучения на рабочих местах литейного производства является сварка, она применяется ограниченно – для ремонта оборудования, доработки отливок и изготовления оснасток. Ультрафиолетовый диапазон излучения также присутствует в спектре излучения перегретого металла. Ультрафиолетовое излучение представляет собой электромагнитные волны в диапазоне 110–400 нм, расположенные между рентгеновским излучением и видимым светом. В охране труда УФ-излучение классифицируется по биологическому воздействию на человека, что определяет меры защиты для работников.

В соответствии с международными стандартами ISO УФ-излучение классифицируют на следующие диапазоны:

- УФ-А (400–315 нм);
- УФ-В (315–280 нм);
- УФ-С (280–110 нм).

Допустимая интенсивность облучения для УФ-А, УФ-В и УФ-С не должна превышать соответственно 50,0 (10,0), 0,05 (0,01), 0,001 (не допускается) Вт/м² при наличии у работающих незащищенных участков поверхности кожи не более 0,2 м и продолжительности облучения до 5 мин с общей продолжительностью воздействия за смену до 60 мин (более 5 мин с общей продолжительностью воздействия 50 % рабочей смены и более). При использовании специальной одежды и средств защиты лица и рук, не пропускающих излучение, допустимая интенсивность облучения в области УФ-В и УФ-С не должна превышать 1 Вт/м² [34].

В настоящем исследовании поставлена задача изучения способов защиты рабочих мест от излучений инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов.

1.4 Воздействие инфракрасного и ультрафиолетового излучения на человека

1.4.1 Воздействие инфракрасного излучения

Основным приемником ИК-излучения являются кожа и глаза. Поглощение энергии этих лучей происходит главным образом в эпидермисе. Инфракрасные лучи оказывают на организм человека в основном тепловое действие, но им их влияние не ограничивается.

В ряде работ описаны биохимические изменения в организме при воздействии инфракрасного излучения: снижение активности ферментов пищеварительной системы, уменьшение числа лейкоцитов и тромбоцитов в крови, снижение электрической активности кожи и её поляризация [43–45].

Действие ИК-излучения на центральную нервную систему сказывается в понижении тонуса вегетативной нервной системы. Повышение температуры тела снижает возбудимость коры головного мозга и скорость реакции, вызывает затруднения в передаче нервного возбуждения в синапсах.

Действие теплового излучения на сердечно-сосудистую систему проявляется в резком учащении сердцебиения, повышении максимального и понижении минимального артериального давления, учащении дыхания, повышении температуры тела и усилении потоотделения.

Длительному воздействию значительных тепловых потоков подвергаются практически все работающие в плавильно-заливочных и других цехах с источниками ИК-излучения.

Из классификатора опасностей для целей нашего исследования считаем необходимым выделить следующие:

- 1) опасность перегрева под воздействием повышенной температуры воздуха;
- 2) опасность ожога при контакте кожных покровов с поверхностью предметов, имеющих высокую температуру;
- 3) опасность ожога при контакте незащищенных частей тела и материалов, жидкостей или газов, имеющих высокую температуру;

4) опасность теплового удара от воздействия окружающих поверхностей оборудования, имеющих высокую температуру;

5) опасность теплового удара при длительном нахождении в помещении с высокой температурой;

6) опасность ожога от воздействия открытого пламени;

7) риск ожога роговицы глаза [46].

Инфракрасное облучение интенсивностью 949 Вт/м^2 вызывает ощущение жара, жжения и повышение температуры кожи до $40\text{--}41 \text{ }^\circ\text{C}$. При интенсивности инфракрасного облучения 1717 Вт/м^2 и более температура кожи повышается на $10\text{--}11 \text{ }^\circ\text{C}$ и появляется нестерпимое жжение кожи [47].

Существует риск возникновения острых тепловых заболеваний, таких как тепловой удар, тепловое истощение, тепловой обморок, тепловые судороги, тепловой отек, обезвоживание.

Ожоги. Продолжительное воздействие лучистой энергии на открытые участки кожи человека может приводить к ожогам [48]. Выделяют четыре степени тепловых ожогов. Ожоги первой степени характеризуются покраснением, припухлостью кожи, болью на месте ожога. Для ожогов второй степени характерно появление водяных пузырей, покраснение и отек кожи по краям. Более неприятные симптомы наблюдаются при третьей степени тепловых ожогов: повреждение всей толщи кожи, покрытие ее темными струпами. А затем наступает четвертая степень, к которой относится омертвление кожи с повреждением мышц, сухожилий, костей.

Тепловой удар. Это острое тепловое поражение, сопровождающееся при легкой степени такими неспецифичными симптомами, как повышенная утомляемость, сонливость, головокружение, тошнота. Также наблюдаются симптомы нарушения терморегуляции: умеренное потоотделение, повышение частоты сердечных сокращений.

При тепловом ударе средней тяжести наблюдаются общая усталость, повышенная сонливость и головная боль, рвота, температура повышается до $40\text{--}41 \text{ }^\circ\text{C}$, отмечаются учащение пульса и повышение артериального давления.

В тяжелых случаях быстро нарастает поражение центральной нервной системы: потеря сознания, тошнота и рвота, появление судорог, параличи, возможны кома, остановка дыхания.

После перенесенного острого теплового поражения наблюдается снижение толерантности к теплу, нарушение терморегуляции, астенический синдром.

Тепловое истощение. Это состояние, вызванное недостаточным потреблением жидкости, потерей солей и нарушением функции потоотделения при работе в условиях высоких температур.

Неспецифические симптомы данного заболевания: усталость, сонливость, головная боль, тошнота. Главный симптом нарушения терморегуляции вследствие повышения температуры – потливость.

Тепловой обморок (тепловой коллапс). Это острое расстройство сердечно-сосудистой системы, вызванное интенсивной мышечной работой при высокой температуре окружающей среды. К симптомам теплового обморока относятся потеря сознания, бледность, учащенное сердцебиение, учащенный пульс, головокружение, повышенное потоотделение.

Тепловые судороги. Это мышечные спазмы, обусловленные прогрессирующим обезвоживанием и нарушением водно-солевого обмена в острой фазе: внеклеточной дегидратацией и внутриклеточной гипергидратацией.

Симптомы: мышечные спазмы в группах мышц – икр, бедер, плеч, предплечий, резкая боль при движении. Кожа сухая и холодная, частота сердечных сокращений повышается до 110–120 в течение 2 мин, артериальное давление понижено, голос низкий.

Тепловой отек. Это нарушение жидкостного и солевого обмена, которое приводит к накоплению жидкости в организме. Симптом данного заболевания – отек нижних конечностей, со временем перетекающий к верхним конечностям.

В промышленных условиях нередко случаи, когда глаза и кожа работников, не защищенные средствами индивидуальной защиты, подвергаются воздействию ИК-излучения, что может привести к необратимым изменениям в тканях.

Коротковолновое излучение, полностью или частично проникая через глазные среды внутрь глаза и интенсивно поглощаясь хрусталиком, вызывает такие патологические изменения, как конъюнктивит, помутнение роговицы, спазм зрачков, помутнение хрусталика, ожог сетчатки. ИК-излучение является причиной конъюнктивитов пекарей, сталеваров и кузнецов. Длительное воздействие (10–20 лет) коротковолновой инфракрасной радиации большой интенсивности на глаза может вызвать поражение хрусталика – так называемую «инфракрасную катаракту» – у сталеваров, прокатчиков, кузнецов [49].

Через глаз проходит 27 % общего потока лучистой энергии, из которых 2/3 приходится на ИК-диапазон. Наиболее частым и тяжелым поражением глаз при воздействии ИК-излучения является катаракта. Также ИК-излучение провоцирует депигментацию радужки [50].

1.4.2 Воздействие ультрафиолетового излучения

УФ-излучение вызывает повреждение ДНК, угнетение иммунной системы, фототоксические и фотоаллергические реакции. Пониженная устойчивость иммунитета относится к факторам риска развития онкологии, а также может провоцировать реактивацию вирусов.

Хроническое воздействие УФ-излучения на глаз человека может иметь следующие последствия:

- 1) развитие птеригиума (крыловидная пленка – утолщение конъюнктивы, наползающее на роговицу);
- 2) поражение эпителия роговицы (электроофтальмия/фотокератит), характерного при слишком интенсивном воздействии УФ-В излучения, который проявляется усиленным слезотечением, светобоязнью, болью, чувством инородного тела, блефароспазмом;
- 3) катаракта, помутнение хрусталика глаза, чаще всего вызвана старением, но также может быть обусловлена травмами, генетикой, общими заболеваниями, длительным приемом лекарств и воздействием ультрафиолетового излучения [51].

УФ-излучение на кожу человека может привести к онкологическим заболеваниям, среди которых:

1) рак базальных клеток кожи, возникающий из клеток, составляющих базальный слой кожи, самый глубокий слой эпидермиса, который прилегает к дерме. Обычно этот слой производит новые кожные клетки, формирующие структуру эпителия, в то время как клетки верхнего слоя кожного покрова постепенно становятся плоскими и ороговевшими. Рак базальных клеток кожи представляет собой твердое пятно или участок уплотнения бледного, розового или красноватого оттенка;

2) плоскоклеточный рак кожи образуется из кератиноцитов, расположенных в шиповатом слое. Клетки шиповатого слоя продуцируют кератин – структурный белок, который отличается повышенной прочностью и служит строительной основой для многих производных эпидермиса. Опухоль развивается на любых участках тела, чаще в местах, которые подвергаются ультрафиолетовому излучению. Обычно новообразования разной геометрической формы выступают над поверхностью остальной кожи. Поверхность может покрываться роговыми чешуйками, которые периодически отслаиваются. В некоторых случаях опухоль выглядит как незаживающая язва, которая постепенно расширяется и углубляется;

3) меланома образуется из меланоцитов – кожных клеток, которые вырабатывают меланин. Пигмент придает коже естественный оттенок. Под воздействием солнечного излучения меланоциты продуцируют больше меланина, что обуславливает потемнение кожных покровов. Скопления меланоцитов образуют родинки, которые темнее остальных участков кожи;

4) преждевременное старение кожи – потеря эластичности кожи в молодом возрасте и снижение скорости ее восстановления после повреждений [52].

Существующие результаты исследований доказывают негативное биологическое воздействие ИК- и УФ-излучения на человеческий организм. Поэтому особенно важны профилактические мероприятия, нацеленные на эффективное уменьшение воздействия данных факторов производственной среды

на организм работников. Особое внимание следует уделить защите органов зрения и кожи лица.

В связи с вышесказанным необходимо разработать план мероприятий по защите рабочих металлургических предприятий от воздействия излучений на основе ГОСТ 12.0.230–2007 (СУОТ) и СанПиН 2.2.4.3359-16 (физические факторы). Кроме того, необходимо внедрить технические и организационные меры защиты персонала (см. раздел 4).

1.5 Процессы распространения теплового излучения на рабочих местах литейного и термического цехов

Теплопередача от нагретых предметов к менее нагретым происходит согласно второму закону термодинамики. В условиях литейного и термического производства тепловая энергия от нагретых поверхностей, расплавов и оборудования передается в окружающую среду и к рабочим местам посредством трех основных механизмов: теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Их соотношение зависит от температуры источника, свойств среды и геометрических параметров. На теплопередачу инфракрасным излучением приходится до 70 % [53].

Теплопроводность имеет место при непосредственном контакте тел с разной температурой. В литейном и термическом цехах проявляется:

- в конструкциях печей, ковшей и форм, где тепло передается через металлические стенки;
- при касании работником горячих поверхностей (например, инструмента или ограждений).

Высокая теплопроводность металлов (например, у стали $\lambda \approx 50$ Вт/(м·К)) ускоряет передачу тепла. Использование огнеупорных материалов (шамот, асбест) снижает теплотери через стенки оборудования.

Конвекция заключается в переносе тепла за счет движения газа. В цехе выделяют естественную конвекцию – нагретый воздух поднимается от печей,

создавая восходящие потоки, и принудительную конвекцию – вызванную вентиляцией или движением механизмов (например, обдув отливок).

Тепловое излучение является доминирующим механизмом для высокотемпературных источников (печи, расплавы). Энергия передается электромагнитным излучением без участия среды. Так как тепловое излучение имеет ту же природу, что и видимое, закономерно проводить аналогию со световым излучением, которое нам больше известно и доступно любому наблюдателю [54].

Основополагающие законы теплового излучения:

Закон Стефана – Больцмана выражает зависимость плотности теплового излучения абсолютно черного тела от абсолютной температуры T в четвертой степени согласно (1.1). Если тело не является абсолютно черным, вводится степень черноты тела ε ($0 < \varepsilon < 1$) и выражение принимает вид (1.2).

$$E = \sigma \cdot T^4, \quad (1.1)$$

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (1.2)$$

где σ – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($\sigma = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$).

2. *Закон Планка* устанавливает связь спектральной плотности теплового излучения абсолютно черного тела $E_{0\lambda}$ (Вт/м^2) с длиной волны излучения (м) и абсолютной температурой тела:

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{(C_2/\lambda T) - 1}}, \quad (1.3)$$

где $C_1 = 3,7412 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/м}^2$ и $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянные излучения.

3. *Закон смещения Вина*: с ростом температуры тела T максимум спектральной плотности потока излучения λ_{max} смещается в коротковолновую область:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}, \quad (1.4)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Производственные источники по характеру спектрального излучения условно можно разделить на четыре группы [34]:

1) с температурой излучающей поверхности до 500 °С (паропроводы, сушильные установки, низкотемпературные аппараты, наружная поверхность различных печей и др.); их спектр содержит инфракрасные лучи с длиной волны 3,7–9,3 мкм;

2) с температурой поверхности от 500 до 1300 °С (открытое пламя, открытые проемы нагревательных печей и топок, нагретый металл – слитки, заготовки, расплавленные чугун и бронза и др.); их спектр содержит преимущественно инфракрасные лучи с длиной волны 1,9–3,7 мкм, но появляются и видимые лучи;

3) с температурой 1300–1800 °С (открытые проемы плавильных печей, расплавленная сталь и др.); их спектр содержит как инфракрасные лучи вплоть до коротких 1,2–1,9 мкм, так и видимое излучение большой яркости;

4) с температурой выше 1800 °С (пламя электродуговых печей, сварочных аппаратов и др.); их спектр излучения содержит наряду с инфракрасным (0,8–1,2 мкм) и видимым (0,4–0,8 мкм) также и ультрафиолетовое излучение.

Для литейного цеха основная доля излучения приходится на инфракрасный диапазон ($\lambda = 0,7–100$ мкм). Интенсивность излучения зависит от степени черноты поверхности (ϵ). Например, для окисленной стали $\epsilon \approx 0,8$.

В литейных и металлургических цехах рабочие подвергаются интенсивному ИК-излучению от литейного оборудования или воздействия искр и брызг расплавленного металла во время плавки, разлива металла, нагрева и литья. Такие рабочие места требуют обязательного использования специальной защитной одежды и СИЗ, а также теплозащитных экранов, чтобы обеспечить безопасность и предотвратить тепловые травмы у работников.

Приведем данные об уровне теплового излучения в производственных помещениях предприятий черной металлургии и машиностроения [48]:

– в основных цехах заводов черной металлургии (доменные, конверторные, мартеновские, электросталеплавильные, прокатные и др.) интенсивность инфракрасной радиации колеблется в пределах 348–13 920 Вт/м²;

– в горячих цехах машиностроительной промышленности (литейных, кузнечных, термических, где происходит плавка, заливка металла, нагрев и обработка деталей) интенсивность теплоизлучения составляет 1392–3480 Вт/м².

Эти данные носят приближенный характер, но они полезны для выполнения предварительной оценки.

Анализ литературы по исследуемому вопросу показал, что процессы распространения теплового излучения в литейных цехах изучены преимущественно с позиций общей теплотехники и гигиены труда, однако спектральному составу инфракрасного излучения и эффективности современных экранирующих материалов в реальных производственных условиях уделено недостаточно внимания.

В частности, отсутствуют комплексные данные, связывающие спектральные характеристики источников теплового излучения, параметры микроклимата и эффективность средств коллективной защиты.

Обобщая результаты обзора, к задачам настоящего исследования считаем целесообразным отнести следующие:

1. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования спектральных характеристик оксидных покрытий для создания теплозащитных экранов для работников литейных и термических цехов.

2. Разработать метод прогнозирования состава оксидного покрытия в зависимости от спектральной характеристики источника теплового излучения и геометрии размещения источников излучения.

3. Обосновать и разработать рекомендации по снижению уровней инфракрасного облучения за счет применения прозрачных теплозащитных экранов с оксидными покрытиями.

4. Разработать конструкции эффективных экранов, обеспечивающих снижение теплового воздействия до нормативных значений при сохранении возможности полноценного наблюдения за технологическим процессом.

1.6 Ультрафиолетовое излучение на рабочих местах сварочного цеха

Основными источниками ультрафиолетового (УФ) излучения в сварочных цехах являются сварочные дуги, плазменные горелки и другое оборудование для термической обработки металлов.

Интенсивность УФ-излучения зависит от:

- типа сварочного процесса (наибольшая – при аргонодуговой и плазменной сварке);
- используемых материалов и покрытий;
- силы тока и напряжения дуги;
- расстояния от источника до рабочего места.

Спектр излучения сварочной дуги включает в себя участок излучения инфракрасного диапазона (3430–760 нм), видимый диапазон (760–400 нм) и ультрафиолетовый диапазон (400–180 нм). При этом доля ИК-излучения в спектре составляет 30–70 % от общей энергии излучения дуги. Наибольшее значение с точки зрения охраны труда имеет УФ-диапазон излучения, т. к. даже кратковременное воздействие на незащищенный глаз способно вызвать ожог роговицы [33].

Сварочные работы проводятся в литейных цехах для исправления литейных дефектов. В таблице 1.3 приведены уровни интенсивности ультрафиолетового излучения от различных видов сварки.

Таблица 1.3 – Интенсивность ультрафиолетового излучения при сварочных работах

Виды сварочных работ	Интенсивность ультрафиолетового излучения, Вт/м ²					
	УФ-А		УФ-В		УФ-С	
	min–max	среднее	min–max	среднее	min–max	среднее
Ручная электродуговая сварка	5,8–23,4	9,4	1,9–13,4	6,6	2,8–19,0	10,6
Полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа	4,7–21,2	11,4	3,6–12,4	5,5	2,2–13,4	6,9
Электросварка в среде аргона	4,3–14,6	7,6	2,5–5,6	4,2	8,9–23,4	16,8
Газовая сварка	0-0,22	0,14	0-0,10	0,06	0-0,06	0,03

Из таблицы 1.3 видно, что допустимые значения ультрафиолетового излучения превышены для всех видов сварочных работ. Наиболее высокие уровни УФ-А наблюдаются во время ручной дуговой и полуавтоматической сварки. В средневолновой области УФ-В параметры излучений при всех видах электросварки примерно одинаковы, а в коротковолновой области УФ-С максимальные значения выявлены при электросварке в среде аргона.

Во время сварочных работ также наблюдается воздействие инфракрасного диапазона излучения. Интенсивность инфракрасного (теплого) излучения превышает допустимые значения и находится в интервале 210–290 Вт/м² при ручной электродуговой сварке, 170–220 Вт/м² при работе на автоматических и полуавтоматических машинах, 160–200 Вт/м² при сварке в среде аргона, 270–380 Вт/м² при газовой резке [30].

Анализ литературы показал, что при наличии достаточного числа исследований, посвященных спектральным характеристикам сварочной дуги, остаются недостаточно изученными вопросы эффективности современных защитных экранов и светофильтров при различных режимах сварки.

Существует необходимость разработки новых типов защитных экранов с применением новых экономичных и технологичных методов.

Кроме того, ограниченное число работ рассматривает вопросы оптимизации спектральных характеристик защитных материалов при сохранении прозрачности и удобства визуального контроля технологического процесса.

Исходя из существующей проблемы, связанной с превышением допустимых уровней УФ-излучения и отсутствием эффективных, технологичных и прозрачных средств коллективной защиты, считаем целесообразным изучить параметры ультрафиолетового излучения на рабочих местах сварочного цеха в сравнении с нормативными требованиями для получения количественных значений необходимого снижения интенсивности излучения до допустимых пределов, а также разработать конструкцию прозрачных экранов, обеспечивающих селективное поглощение и отражение ультрафиолетового диапазона.

Обобщая результаты анализа, к основным направлениям последующих исследований считаем необходимым отнести:

1) проведение теоретических и экспериментальных исследований спектральных характеристик покрытий, защищающих от УФ-излучения в сварочных зонах литейных цехов;

2) обоснование критериев выбора оптических параметров экранных материалов, обеспечивающих защиту от УФ-излучения;

4) разработку и экспериментальную проверку конструкций прозрачных экранов с оксидными покрытиями, снижающих уровни ультрафиолетового облучения до нормативных значений при сохранении обзора сварочной зоны.

1.7 Способы, методы и конструкции по снижению теплового и ультрафиолетового излучения

1.7.1 Защита от теплового излучения

В зависимости от условий работы, характера и расположения источника излучения для защиты от возможного перегрева используются следующие методы [55–57]:

1) удаление от источника теплового излучения (дистанционное управление);

2) ограничение времени воздействия излучения (применение такой организации труда, которая допускает чередование лиц, работающих в сильно облучаемых местах);

3) использование средств индивидуальной защиты (защитные очки, маски, одежда);

4) тепловая изоляция нагретых поверхностей;

5) экранирование источников теплового излучения;

б) установка системы охлаждения воздуха и вентиляции, воздушное душирование.

Последние три метода относятся к инженерным способам защиты от теплового излучения.

Повсеместное внедрение новых технологических процессов и оборудования, а также автоматизация производства могут устранить негативное влияние ИК-излучения на здоровье человека. Например, автоматизация и дистанционное управление процессами непрерывной разливки и прокатки стали позволили практически полностью исключить ряд «горячих» профессий в металлургическом производстве. В настоящее время для рабочих мест операторов на производстве актуально создание комфортного микроклимата.

Важным фактором, способствующим повышению работоспособности рабочих горячих цехов, является рациональный режим труда и отдыха. Он составляется в зависимости от конкретных условий труда. Частые короткие перерывы более эффективны для поддержания работоспособности, чем редкие, но продолжительные. При физических работах средней тяжести и с температурой воздуха до 25 °С внутренний режим предусматривает 10-минутные перерывы после 50–60 мин работы, при температуре воздуха 25–33 °С рекомендуются 15-минутный перерыв после 45 мин работы и разрыв рабочей смены на 4–5 часов в период наиболее жаркого времени [58].

При этом отдых работающих должен проходить в специально оборудованных зонах с комфортной, более низкой, чем в цехе с жаркими условиями работы, температурой. Эти зоны могут включать в себя специально оборудованные места отдыха для работников или участки цеха с более низкой температурой, обеспечиваемые принудительной подачей свежего воздуха. Такие зоны с более комфортными условиями называют «оазисы».

Большое практическое значение имеет использование эффективных средств индивидуальной защиты поверхности тела и органов зрения для защиты человека от воздействия ИК-излучения.

Также эффективным и часто применяемым способом защиты от ИК-излучения являются коллективные теплозащитные средства. К ним относятся теплоизоляция поверхностей, экранирование источников или рабочих мест, общеобменная вентиляция, воздушное душирование. Наибольший интерес представляют экраны.

Теплозащитные экраны используются для локализации источников лучистого тепла на рабочем месте и снижения температуры поверхностей, окружающих рабочее место [59]. Ослабление теплового потока за экраном обусловлено его поглощающей и отражательной способностями. В зависимости от того, какая способность экрана более выражена, по принципу действия выделяют теплоотражающие, теплопоглощающие и теплоотводящие, а по прозрачности – непрозрачные, полупрозрачные и прозрачные экраны [60].

К теплоотражающим экранам относятся жесткие глухие преграды, изготовленные из материалов с высокой степенью отражения, такие как алюминий листовой, белая жель, альфоль (алюминиевая фольга), а также закаленные стекла с пленочным покрытием. В последнее время получила распространение вакуумно-многослойная изоляция, изготовленная из множества полированных металлических пластин с зазорами, из которых откачан воздух. Эти экраны отличает высокая эффективность (отражается до 58 % излучения), малая масса, экономичность. Однако конструкция таких экранов не выдерживает высоких механических нагрузок, эффективность их существенно снижается при отложении на них пыли, при окислении.

В настоящее время нашли широкое применение экраны, выполненные из металлической плотной сетки или из металлических мелких цепей, подвешенных против излучающего проема в один или несколько рядов. Хотя цепные экраны не могут защищать от излучения так хорошо, как глухие (цепные завесы снижают тепловой поток на 60–70 %), их применение в ряде случаев оправдано, поскольку они позволяют наблюдать за ходом технологического процесса.

Теплоотводящие экраны (водяные и вододисперсные завесы) применяют в тех случаях, когда через экран необходимо вводить инструмент или заготовки. Коэффициент эффективности водяных завес в значительной степени зависит от спектрального состава излучения и толщины слоя и может достигать 80 %. Экраны в виде водяной пленки, стекающей по стеклу, более устойчивы по сравнению со свободными водяными завесами. Их эффективность составляет порядка 90 %.

В определении оптимальных условий защиты от теплового излучения немаловажное значение имеет характер его спектрального состава, так как материал экрана должен поглотить или отразить лучи, несущие максимум энергии. Как видно из рисунка 1.5, для организации эффективной защиты от теплового излучения необходимо устранить в лучистом потоке по возможности наибольший диапазон длинноволнового излучения, которое хорошо поглощается поверхностью кожи человека.

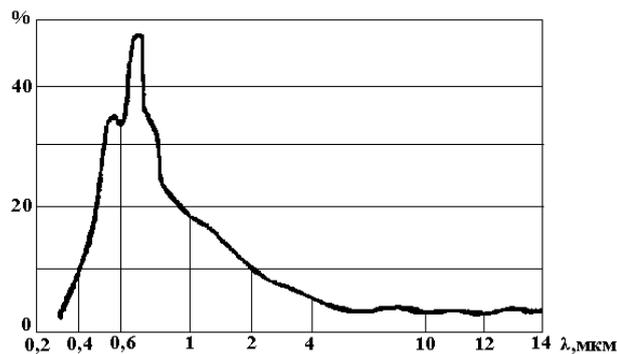


Рисунок 1.5 – Степень отражения тепловых лучей кожей человека в зависимости от длины волны теплового излучения

В этом отношении хорошо зарекомендовали себя прозрачные водяные завесы в виде сплошной тонкой водяной пленки, образующейся при равномерном стекании воды с гладкой поверхности.

Вода является активным поглотителем инфракрасных лучей. Наиболее сильное поглощение отмечается в зоне лучей с длиной волны $\lambda = 1,5\text{--}6,0$ мкм.

Слой воды толщиной 1 мм полностью поглощает участок спектра с $\lambda = 3$ мкм, а слой 10 мм – тепловой поток с длиной волны $\lambda = 1,5$ мкм.

Таким образом, слой воды, применяемый в защитных экранах, должен иметь толщину порядка нескольких миллиметров, однако при этом коротковолновое излучение высокотемпературных источников не будет поглощено, что проявляется, например, в видимости светового излучения, являющегося коротковолновой частью теплового излучения. Поэтому тонкие водяные завесы эффективны в основном для экранирования излучений от низкотемпературных источников (до 800 °С).

Сравнение эффективности теплозащитных экранов приведено в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Классификация теплозащитных экранов, предел их интенсивности облучения и эффективность

Степень прозрачности экрана	Тип действия	Виды материалов экрана	Предел интенсивности теплового излучения, Вт/м ²	Эффективность, %
Непрозрачные	Тепло-поглощающие	Футерованные	до 10 000	30
		Асбестовые	До 30 000	60
	Теплоотводящие	Футерованные	Любая интенсивность	
		Нефутерованные	5000–14 000	
Полупрозрачные	Тепло-поглощающие	Металлические сетки	350–1050	30-50
		Цепные завесы и армированное стальной сеткой стекло	700–5000	70
	Теплоотводящие	Металлические сетки, орошаемые водяной пленкой	700–2100	До 75
Прозрачные	Тепло-поглощающие	Стекла: силикатное, органическое, кварцевое	350	86
	Теплоотводящие	Водяные завесы	350–1400	80

Теплозащитные материалы представляют собой специализированные материалы и покрытия, которые наносятся на поверхности оборудования, конструкций или изделий с целью защиты от высоких температур. Основная функция таких материалов – создание теплового барьера, который снижает теплопередачу и предотвращает перегрев защищаемых объектов.

Покрытия и материалы для защиты от повышенных температур можно классифицировать по ряду признаков – по толщине покрытия и по материалам покрытий.

По толщине покрытия подразделяются на:

- 1) ультратонкие – менее 1 мкм;
- 2) высокотонкие – 1–10 мкм;

- 3) микротонкие – 10–40 мкм;
- 4) миллитонкие – 40–300 мкм;
- 5) тонкие – 300–1000 мкм;
- 6) средние – 1–3 мм;
- 7) толстые – 3–8 мм;
- 8) сверхтолстые – более 8 мм [61].

В зависимости от материала теплозащитные покрытия разделяют на металлические, неорганические теплоизоляционные, пористые полимерные.

Пористые полимерные покрытия. Полимерные термозащитные материалы имеют низкую стоимость по сравнению с волокнистыми материалами. Также преимуществами данного покрытия являются возможность изготовления изделий сложных форм и более высокие звукоизоляционные показатели.

Пенополистирол (пенопласт на основе полистирола) – жесткий термопласт, состоящий из склеенных гранул. Материал на 98 % состоит из воздуха и на 2 % из полистирола. Полистирольный пенопласт применяется при строительстве и реконструкция зданий, дорог, холодильных камер, складов и т. д. [62].

Пенополиуретан (ППУ) – это ячеистый материал. Он бывает жестким и эластичным. Эластичный ППУ (плотность от 22 до 55 кг/м³) используется в производстве мягкой мебели, мягких стульев и т. д. Жесткий ППУ обладает низкой теплопроводностью и поэтому нашел широкое применение в качестве теплоизоляционного материала. Изоляция из пенополиуретана безопасна для здоровья человека, так как этот материал не содержит волокон и не является источником вредной пыли в отличие от волокнистых теплозащитных материалов [63].

Неорганические теплоизоляционные покрытия. Доля неорганических теплоизоляционных материалов составляет более 70 % от общего объема производимых теплоизоляционных материалов. Обычно под неорганическими материалами подразумевают волокнистые материалы – минеральную вату и стекловату.

Наиболее часто применяемая в качестве теплозащитного материала минеральная вата характеризуется негорючестью, высокой плотностью и

прочностью, широким температурным диапазоном применения, долговечностью. Марки минеральной ваты в зависимости от свойств могут выдерживать различные нагрузки и применяться для строительных целей. Основные недостатки этого утеплителя – комкование при длительном хранении, образование отходов при производстве, необходимость их утилизации.

Металлические покрытия. Жаростойкостью обладают некоторые металлы: Al, Zn, Sn, Pb, Cr, Mn, Be. Для высокотемпературной эксплуатации применяют покрытия из хрома. Наиболее широкое применение для производства жаростойких покрытий получили сплавы на основе железа, никеля, железоникелевых сталей и сплавов, легированных хромом и другими элементами (Al, Si, Y и др.), повышающими защитные свойства оксида хрома. Нанесение жаростойких покрытий из хрома осуществляют с помощью конденсационных, химических, электрохимических и газофазных методов осаждения [64]. Для защиты от нагрева в различных технических системах, а также в оптических приложениях (в том числе в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах) используют покрытия на основе оксидов металлов. Однако их применение ограничено, так как существующие промышленные способы получения оксидных покрытий требуют вакуумных камер, что ограничивает размер подложек размерами камеры, и дорогостоящих оксидных мишеней для получения покрытий [65].

Обычное оконное стекло пропускает видимый свет, ИК-излучение стекло пропускает не полностью. Существуют специальные покрытия и виды стекол, которые могут значительно снижать проницаемость для ИК-излучения, при этом сохраняя прозрачность стекла. Приведем характеристики некоторых из них.

Стекло с низкоэмиссионным (Low-E) покрытием, которое представляет собой металлический нанослой, нанесенный на поверхность стекла. В настоящее время в качестве материала для изготовления такого слоя чаще всего применяют серебро. Для защиты напыления от разрушения Low-E стекло применяется в составе стеклопакетов.

Селективное тонированное стекло – это стекло, окрашенное в массу с помощью добавок оксидов металлов (железа, кобальта и др.). Тонированное стекло

поглощает часть видимого света и инфракрасное излучение, преобразуя его в тепло, которое затем рассеивается с наружной стороны. Чем темнее стекло, тем больше тепла оно поглощает. Поскольку стекло нагревается, оно создает большую тепловую нагрузку на конструкцию и может привести к термическим напряжениям. Его эффективность ниже, чем у Low-E стекла.

Многослойное стекло, между слоями которого ламинируется специальная полимерная пленка. Современные высокотехнологичные пленки, интегрируемые в триплекс, могут иметь свойства, аналогичные Low-E покрытию, одновременно обеспечивая безопасность и защиту от УФ-излучения.

Стеклопакет – совокупность двух и более листов стекла, заключающих герметично закрытое воздушное или газовое пространство. Само стекло не обладает теплоизоляционными свойствами, но имеет воздушное пространство между слоями стекла, часто используется газ аргон, реже криптон. Воздух и инертные газы имеют очень низкую теплопроводность, в замкнутом пространстве между стеклами они играют роль эффективного теплоизолятора.

Стекло с наноструктурированным покрытием, которое содержит наночастицы или имеет сложную микроструктуру, способную избирательно отражать ИК-излучение за счет физических, а не химических принципов (например, на основе оксида индия-олова, ITO).

1.7.2 Перспективные составы оксидных теплозащитных покрытий

Одним из перспективных способов повышения эффективности средств защиты от ИК-излучения является использование покрытий, непрозрачных в ИК-диапазоне излучения, остающихся прозрачными в видимом диапазоне, для создания светопрозрачных защитных конструкций. Прозрачность в видимом диапазоне позволяет осуществлять беспрепятственный визуальный доступ к производственному процессу.

1. Оксиды и сплавы на основе оксидов более предпочтительны для получения термозащитных покрытий. Жаростойкие покрытия монооксидов (Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , CeO_2) имеют высокую температуру эксплуатации 1100–1700 °С. Среди

широкого спектра жаростойких материалов в качестве термозащитного покрытия наиболее интересен диоксид циркония (ZrO_2) – материал с низкой теплопроводностью, относительно высокой прочностью, износостойкостью, вязкостью разрушения, хорошим коэффициентом термического расширения [66]. Для того, чтобы получить наилучшие результаты, ZrO_2 частично стабилизируется путем его легирования с различными оксидами, такими как Y_2O_3 , CeO_2 , CaO или MgO [67–70].

2. Пирохлор. Для применения при температурах выше $1300\text{ }^\circ\text{C}$ рассматриваются оксидные соединения со структурой пирохлора $A_2B_2O_7$, где А – редкоземельный элемент, В – переходный металл. Достаточно хорошо исследованы пирохлориды редкоземельных цирконатов, т. е. соединения типа $Ln_2Zr_2O_7$, где Ln – La, Gd, Sm, Nd, Eu, Yb, соединения на основе гафния $La_2Hf_2PO_7$, $Gd_2Hf_2O_7$ и соединения на основе церия $La_2Ce_2O_7$, $La_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7$ [71]. В настоящее время активно исследуют покрытие $La_2Zr_2O_7$ и покрытие $Gd_2Zr_2O_7$ (GZ), предложенные в качестве термобарьерных покрытий (ТБП) в конце девяностых годов XX века [72].

3. Гексаалюминаты. Гексаалюминаты лантаната ($LnMAAl_{11}O_{19}$, (Ln: La, Pr, Nd, Sm, Eu и Gd; M: Mg, Mn-Zn, Cr, Sm, Li)) со структурой магнитоплюмбита уже используются в области лазерной техники, катализа и магнетизма [73]. Благодаря высокой температуре плавления, высокому тепловому расширению, низкой теплопроводности, стойкости к длительному спеканию и структурной стабильности до $1800\text{ }^\circ\text{C}$ эти материалы также можно признать перспективными для нанесения ТБП [74]. В частности, $LaMgAl_{11}O_{19}$ (LaMA) считается наиболее перспективным материалом [75].

4. Перовскиты. Класс соединений с ABO_3 кристаллической структурой ($SrZrO_3$), способной к растворению широкого спектра ионов, в том числе с большой атомной массой. Перовскиты имеют температуру плавления выше $2000\text{ }^\circ\text{C}$, теплопроводность на 20 % ниже, чем у YSZ, и хорошая термическая стабильность при высоких температурах. Однако перовскиты имеют недостаток в виде низкой

трещиностойкости. В данной группе соединений выделяют цирконаты и сложные (комплексные) соединения, пригодные для нанесения ТБП-покрытий [76].

Термобарьерные покрытия на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием, широко используется в качестве керамического верхнего слоя для обеспечения теплоизоляции, так как обладают низкой теплопроводностью ($\sim 2,3$ Вт/(м·К) при 1000 °С и высокой вязкостью разрушения [77]. Наибольший интерес представляют оксиды (ZrO_2 , частично стабилизируемый легированием Y_2O и $In_2O_3(SnO_2)$) и пирокслоры ($La_2Zr_2O_7$, $La_2Ce_2O_7$)).

5. Использование частично стабилизированного иттрием диоксида циркония ZrO_2/Y_2O_3 (YSZ) в качестве износостойкого, термобарьерного, огнеупорного, коррозионностойкого покрытия обусловлено его высокой механической и химической прочностью до температуры 2200–2400 °С, низкой теплопроводности ($\sim 2,3$ Вт/(м·К) при 1000 °С), относительно высокой прочностью [76]. Керамическое покрытие YSZ используется для авиационных ракетных двигателей, предохраняя их от экстремальных механических напряжений и температуры до 3300 °С.

На сегодняшний день, хорошо зарекомендовавшим себя и используемым в промышленности, является состав покрытия YSZ – диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттрия 6–8 мас.% [76].

Редкоземельные цирконаты ($RE_2Zr_2O_7$, где RE – Gd, Nd, Sm, La, Ce) обладают более низкой теплопроводностью ($\sim 1–1,5$ Вт/(м·К)), более высокой температурой плавления и лучшей фазовой стабильностью, чем традиционный YSZ [78]. $La_2Zr_2O_7$ представляется одним из наиболее перспективных для применения в качестве ТБП, благодаря своим объемным свойствам по сравнению со стандартным YSZ с высокой термостойкостью до 2000 °С, низкой теплопроводностью 1,56 Вт/(м·К) и низкой склонностью к спеканию [76].

Свойства покрытий на основе оксида индия, легированного оловом (ITO)

За последнее время область применения прозрачных пленок расширяется стремительными темпами. Наиболее прозрачным и востребованным проводящим оксидом является оксид индия-олова In_9SnO_x (ITO). ITO-пленки обладают высокой

прозрачностью в видимом диапазоне спектра, высоким отражением в ИК-области и близкой к металлам проводимостью. К таким покрытиям относятся нестехиометричные и легированные оксидные пленки олова, индия, кадмия, цинка и их различные соединения [79]. Тонкие пленки оксида индия, легированного оловом (ITO), широко используются как инфракрасные отражатели (рефлекторы) и электроды, прозрачные в видимой области электромагнитного спектра [80–84].

Исследования спектральных свойств оксидных пленок ITO [85], полученных экстракционно-пиролитическим методом, показали, что в ближнем ИК-диапазоне (1–2 мкм) происходит постепенное снижение пропускания ИК-излучения от 80 до 50 %. В среднем и дальнем диапазонах ИК-пропускание стремится к нулю. ITO пропускают в видимом и ближнем ИК-диапазоне и поглощают в среднем и дальнем ИК (рисунок 1.6). Волнообразный характер спектров обусловлен текстурой покрытия, характерной для растворных методов нанесения.

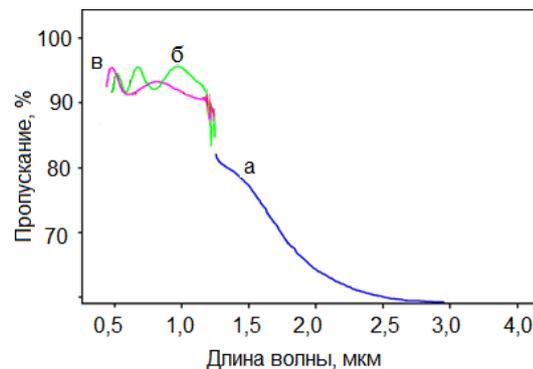


Рисунок 1.6 – Спектры ИК диапазона ITO покрытий на кремнии (а), на стекле (б) и на кварце (в)

1.7.3 Защита от ультрафиолетового излучения

Основными способами защиты организма человека от воздействия УФ-излучения являются следующие:

1) защита «расстоянием» – это способ, при котором обслуживающий персонал удален на безопасное расстояние от источников УФ-излучения, причем расстояние определяется только экспериментальным путем, в каждом конкретном случае, в зависимости от условий работы, состава производственной атмосферы,

вида источника излучения, отражающих свойств конструкций помещения и оборудования и т. д. [86];

2) рациональное размещение рабочих мест [87];

3) использование специальной окраски помещений – этот способ заключается в окрашивании помещений в светлые тона (серый, желтый, голубой) красок, в которые, как правило, добавляют оксид цинка или титана;

4) применение средств индивидуальной защиты, к которым принято относить спецодежду (куртки, брюки и т. п.), рукавицы, фартуки из специальных тканей, щитки и маски со светофильтром. Защитная одежда из поплина или других тканей должна иметь длинные рукава и капюшон. Глаза защищают специальными стеклами, содержащими оксид свинца. При проведении электросварочных работ необходимо использовать защитную одежду из материалов, не пропускающих УФ-излучения, к ним относятся спиллок, кожа, ткани с пленочным покрытием. При наружных, сварочных и других работах, связанных с воздействием ультрафиолетового излучения диапазонов А, В и С, необходимо использовать дерматологические СИЗ, способные блокировать излучение не только солнца, но и искусственных источников УФ-излучения. [88]. Требования к средствам индивидуальной защиты глаз и лица при сварке включают надежную защиту от ультрафиолетового, инфракрасного излучения и брызг, удобную регулировку оголовья, а также соответствие стандартам безопасности, таким как ГОСТ 12.4.253–2013 [89], ГОСТ 12.4.254–2013 [90] и ГОСТ Р ЕН 379–2011 [91] – для автоматических светофильтров. Для проверки светофильтров используется спектрофотометрический анализ – с помощью приборов спектрофотометров с УФ-диапазоном (280-400 нм) измеряют оптическую плотность (пропускание) линз в УФ-диапазоне в соответствии с EN 167 [92]. Дополнительно могут проводиться механические испытания на ударопрочность по EN 168 [93];

5) экранирование рабочих мест – это способ, при котором рабочие места ограждают ширмами, щитками или изготавливаются специальные кабины;

б) экранирование источников излучения – один из наиболее рациональных методов защиты, в качестве материалов для изготовления экранов могут

применяться различные материалы и светофильтры, не пропускающие или снижающие интенсивность излучений.

В качестве прозрачных и полупрозрачных экранов для защиты от УФ-излучения наибольшее распространение получили стекла [94]:

Тонированные стекла. Пропускание УФ-излучения тонированных стекол снижается на 5–10 %, а видимого света на 30–50 % [95].

Светоотражающее стекло – прозрачное или тонированное стекло, имеющее на поверхности очень тонкий слой металла или оксида металла. Отражающее стекло уменьшает приток теплового и ультрафиолетового излучения.

Закаленное стекло – это тип стекла, которое в два или более раз прочнее отожженного стекла. При разрушении он разбивается на множество мелких фрагментов, предотвращая серьезные травмы. Этот тип стекла предназначен для использования там, где важны прочность, термостойкость и безопасность.

Низкоэмиссионное стекло с покрытиями, отражающими от 40 до 70 % теплового излучения, пропуская при этом все количество видимого света. В качестве низкоэмиссионного покрытия обычно используют ионы серебра.

Ламинированное стекло. Наиболее простое ламинированное стекло – однослойное, с наклеенной на поверхность пленкой. Односторонняя ламинация позволяет улучшить безопасность – разбитое стекло не разлетается, а остается висеть на пленке. Более сложная конструкция у триплекса. Это двухслойное стекло с расположенной между слоями пленкой или слоем полимерной смолы. Триплекс не только обеспечивает повышенный уровень безопасности, но и гарантирует увеличение прочности светопропускающей конструкции. Материал более устойчив к ударной нагрузке.

Электрохромное стекло, которое затемняется или просветляется под действием электрического тока. В затемненном состоянии оно эффективно блокирует и видимый свет, и ИК-излучение.

Сравнение эффективности защитных свойств стекол от разных диапазонов УФ-излучения приведено в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Эффективность защитных свойств стекол в зависимости от вида УФ-излучения [94, 95, 96–99]

Тип стекла	УФ-А (315-400 нм)	УФ-В (280-315 нм)	УФ-С (100-280 нм)
Тонированное	50–65 %	55–70 %	60–85 %
Светоотражающее	55–70 %	65–80 %	60–85 %
Закаленное	45–60 %	50–65 %	60–85 %
Изоляционное	60–75 %	70–85 %	60–85 %
Низкоэмиссионное	65–80 %	70–85 %	60–85 %
Ламинированное	80–95 %	85–95 %	70–90 %
Электро/фотохромное стекло	80–95 %	85–95 %	80–90 %

Простой метод защиты от воздействия УФ-излучения – защита барьером, непроницаемым для данного вида излучения. Для этого могут быть использованы как непрозрачные, так и полупрозрачные материалы; последние исследования показали, что существуют материалы с селективной прозрачностью – не пропускающие УФ-излучение, оставаясь прозрачными в видимом диапазоне.

Было разработано множество неорганических поглощающих УФ-излучение систем на основе частиц или тонкопленочных покрытий. Важнейшим подходом к защите от вредного воздействия УФ-излучения является использование специальных покрытий на основе различных материалов, включая тонкие слои металлов и оксидов.

1.7.4 Перспективные составы оксидных покрытий для защиты от УФ-излучения

Неорганические оксиды, такие как TiO_2 , CeO_2 , ZnO и др., используются для защиты от УФ-излучения [100–105]. Ослабление УФ-излучения в этих материалах достигается как за счет поглощения, так и за счет рассеяния света [106]. Поглощение электромагнитного излучения – процесс потери энергии потоком электромагнитного излучения вследствие взаимодействия с веществом. Рассеяние – это излучение, которое распространяется в разных направлениях от пучка излучения, когда пучок взаимодействует с веществом.

Ширина запрещенной зоны (E_g) материала определяет минимальную энергию фотонов, которые могут быть поглощены за счет межзонных переходов. Если энергия фотона меньше E_g , он не поглощается этим механизмом и может пройти через материал (при отсутствии других механизмов поглощения). Чтобы материал был непрозрачным в определенном спектральном диапазоне, его E_g должна быть меньше энергии фотонов этого диапазона. Для снижения прозрачности в УФ-С (начиная от 200 нм) и УФ-В диапазонах ширина запрещенной зоны материала должна быть $E_g \leq 3,94$ эВ; чтобы блокировать УФ начиная со 100 нм необходимо, чтобы $E_g \leq 4,43$ эВ.

В тонких пленках (до 500 нм) рассеяние УФ-излучения играет меньшую роль по сравнению с поглощением. Однако оно вносит свой вклад в общее ослабление излучения и происходит за счет нескольких физических механизмов: рассеяние на границах раздела, рассеяние из-за наличия неоднородностей в пленке, а также на границе зерен, рэлеевское рассеяние на частицах или неоднородностях, размер которых значительно меньше длины волны падающего света. Поликристаллические пленки состоят из множества мелких кристаллов (зерен). Границы между этими зернами имеют отличные оптические свойства и являются центрами рассеяния. Присутствие частиц другого материала или аморфной фазы в кристаллической матрице (или наоборот) также способствуют рассеянию излучения.

Интенсивность рассеяния света является функцией размера частиц, а также показателей преломления частиц и среды. Благодаря контролю размера частиц можно добиться максимального рассеяния УФ-излучения, в тоже время необходимо избегать рассеяния видимого света для достижения высокой прозрачности.

TiO₂ и ZnO имеют ширину запрещенной зоны, соответствующую длинам волн 365 нм и 380 нм соответственно. Свет ниже этих длин волн имеет достаточную энергию для возбуждения электронов и, следовательно, поглощается TiO₂ и ZnO. Свет, длина волны которого превышает ширину запрещенной зоны, не будет поглощаться. Пленки смешанного состава CeO₂-TiO₂ являются

эффективными УФ-поглотителями. Оксид цинка (ZnO), широкозонный полупроводник (ширина запрещенной зоны 3.37 eV при комнатной температуре) с большой энергией связи (60 meV), – важный функциональный материал, применяемый во многих областях техники [107].

Наночастицы TiO₂, SiO₂ и ZnO используются в качестве поглотителей ультрафиолета в солнцезащитной косметике [108]. Гибридные органонеорганические матрицы также использовались для диспергирования неорганических поглотителей УФ-излучения в тонких пленках.

Для диоксида циркония (ZrO₂) характерен оптический переход в ультрафиолетовой области спектра. Материал имеет широкую запрещенную зону (около 4,8–5,1 эВ) и эффективно поглощает излучение в среднем УФ-диапазоне (200–260 нм) [109].

Диоксид титана обычно проявляет светоблокирующую способность, особенно в ультрафиолетовой области с длиной волны менее 400 нм. Это связано с относительно большой запрещенной зоной диоксида титана (примерно 3,2 эВ), которая позволяет ему поглощать ультрафиолетовый свет и генерировать фотогенерируемые электроны и дырки [110-112].

Отжиг представляет собой критически важную обработку после осаждения, которая оказывает существенное влияние на структурные, морфологические и оптические свойства композитных пленок из меди и оксида титана [112]. В процессе отжига тепловая энергия способствует атомной диффузии, что приводит к повышению кристалличности, фазовым превращениям и более однородному распределению меди в матрице оксида титана.

Морфологические изменения, такие как рост зерен и изменения плотности пленки, могут улучшить поглощение света и подвижность носителей заряда, тем самым улучшая общие оптические свойства [110]. Кроме того, обширные исследования показали, что температура и продолжительность отжига являются ключевыми параметрами при определении конечных свойств тонких пленок, при этом оптимизированные условия приводят к повышению фотокаталитической активности и улучшению электропроводности [113-115].

Оксид индия-олова ITO является известным вырожденным полупроводником *n*-типа 4 с оптической шириной запрещенной зоны 3,5–4,3 эВ, что позволяет этому оксиду эффективно поглощать УФ-В [116]. Кроме того, предыдущими исследованиями показано, что покрытия ITO обладают защитными свойствами в различных диапазонах электромагнитного излучения, включая ИК и радиочастотный диапазон [117, 118], а также увеличивают звукоизоляцию стекла, что способствует защите от шума [118].

Использование многослойных оксидных структур ($\text{TiO}_2\text{--SnO}_2$, $\text{ZrO}_2\text{--In}_2\text{O}_3$ и др.) позволяет достичь селективного отражения ИК- и УФ-излучения, что делает их наиболее перспективными для применения в защитных экранах.

1.8 Методы нанесения оксидных пленок

Оксидные пленки обычно наносят методами, применяемыми в микроэлектронике (электродуговое напыление, магнетронное и электронно-лучевое распыление, ионная бомбардировка и др.), а также методами газотермического напыления, плазменного напыления в открытой атмосфере, газопламенного напыления, осаждением из паровой фазы в вакууме и др. [119].

В таблице 1.6 кратко описаны существующие методы нанесения тонкопленочных структур. Также описаны плюсы и минусы данных методов [120].

Таблица 1.6 – Методы нанесения тонких пленок на поверхность

Наименование метода	Условия реализации метода	Основные виды покрытий	Преимущества метода	Недостатки метода
1	2	3	4	5
Электронно-лучевое испарение	Рабочая среда: вакуум 10^{-4} Па и ниже, в атмосфере газов N_2 , O_2 , CH_4 . Испарение металлов сфокусированным электронным пучком с дополнительной ионизацией	Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2 , $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$	Испарение с большой скоростью даже самых тугоплавких материалов. Высокая скорость осаждения.	Трудно обеспечить равномерность толщины и стехиометрии на изделиях сложной конфигурации. Низкая степень загрузки изделиями объема рабочей камеры

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4	5
Лазерная абляция (PLD)	Рабочая среда: вакуум $10^{-5} \dots 10^{-3}$ Па. Испарение материалов различного состава лазерным импульсом длительностью от мкс до фс.	Покрyтия для микроэлектроники: Sb_2S_3 , As_2S_3 , $SrTiO_3$, $BaTiO_3$, $GaAs$	Получение покрyтий сложных соединений Высокая чистота покрyтий (минимум примесей)	Сложность реализации
Магнетронное распыление	Рабочая среда: чистые газы Ar , N_2 , O_2 , CH_4 ; $P = 0,05-1$ Па, $T = 60 \dots 6000$ °C Ионное распыление металлов в магнетронном разряде	TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , наноккомпозиты: ZrO_2/Al_2O_3	Возможность нанесения покрyтий на термочувствительные материалы при низких температурах. Наиболее широкий спектр покрyтий различного назначения; высокая скорость осаждения	Высокая стоимость оборудования

Метод электронно-лучевого испарения. В вакуумной камере с уровнем вакуума 10^{-4} Па и ниже размещается электронно-лучевой испаритель. Чаще всего он состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого тигля, емкость которого может различаться в зависимости от модели. В электронной пушке происходит испускание свободных электронов с поверхности катода и формирование их в пучок, который выводится в рабочую камеру к тиглю с испаряемым материалом. Из-за этого последний нагревается до температуры, при которой испарение происходит с требуемой скоростью. В образовавшемся потоке пара располагается подложка, на которой происходит конденсация. Для управления электронным пучком требуются дополнительные средства измерения и контроля, чтобы процесс напыления происходил максимально качественно. Потому что именно хорошая фокусировка электронного пучка позволяет получить большую концентрацию мощности, а значит, и высокую температуру для увеличения скорости испарения даже тугоплавких материалов. Автотигельное испарение материала в данном методе позволяет получить высокую

чистоту и однородность осаждаемой пленки. Электронный пучок может быть направлен на материал сверху либо под углом к поверхности [121, 122].

Импульсное лазерное напыление – это универсальный метод нанесения тонких пленок. Процесс формирования пленок на подложке при помощи процесса лазерной абляции называется импульсным лазерным осаждением (pulsed laser deposition, PLD). Материал мишени распыляется в среду в результате воздействия на него высокоэнергетического лазерного излучения с последующим переносом в вакууме распыленного материала от мишени к подложке и его осаждения [123]. Метод лазерного распыления [124] для производства покрытий позволяет распылять практически любые по составу мишени, причем состав получаемых покрытий близок к составу мишеней. Довольно высокая стоимость оборудования окупается его эффективностью и простотой управления процессом. Распыляемый материал осаждается на нагреваемую подложку. Осаждение может вестись как в вакууме, так и в атмосфере определенного состава.

Наибольшую распространенность получили методы нанесения тонких пленок из газовой фазы – *конденсация из паровой фазы* (Physical Vapor Deposition, PVD) и *химическое осаждение из паровой фазы* (Chemical Vapor Deposition, CVD). Эти методы позволяют регулировать толщину создаваемой пленки и скорость ее образования.

Метод физического осаждения из пара является более распространенным. Он представляет собой испарение частиц с подложки в вакууме с последующим осаждением этих частиц на поверхность с помощью газа или плазмы. На первом шаге при вакуумном испарении, материал подвергается нагреву при высоком вакууме. На втором шаге испарившиеся частицы осаждаются на подложку. Этим методом можно наносить тонкие пленки на любую поверхность и почти любой материал, а также они имеют хорошую коррозионную устойчивость [125]. PVD-процессы являются более экологически чистыми методами вакуумного осаждения и состоят из трех основных этапов:

– формирование паровой фазы твердого материала с помощью высокотемпературных методов или распыления ускоренными частицами в плазме;

– транспортировка пара в вакууме или частичном вакууме к поверхности подложки;

– конденсация на подложке с формированием тонкой пленки.

Сам процесс образования тонкопленочных структур методом PVD представляет собой прилипание частицы на поверхность подложки, а затем прилипание к этой частице остальных частиц. Так, на поверхности материала происходит объединение отдельных частиц с образованием сплошной пленки.

Существуют три возможных типа роста пленки:

1) островковый рост – происходит в случае, когда атомы вещества, которое мы наносим на подложку, взаимодействуют между собой сильнее, чем с атомами подложки;

2) послойный рост – обратное островковому росту явление, при котором атомы наносимого вещества сильнее взаимодействуют с атомами подложки;

3) смешанный рост – происходит тогда, когда взаимодействие между атомами наносимого вещества и атомами подложки примерно одинаково. При этом сначала образуется послойная пленка толщиной несколько атомов, а потом начинают расти островки [126].

Магнетронное распыление характеризуется высокой повторяемостью и стабильностью осаждаемых покрытий как по скорости распыления, так и по характеристикам получаемых пленок. Эта особенность магнетронных систем, в отличие, например, от электронно-лучевого испарения, при хорошо подобранных и поставленных режимах нанесения отдельных слоев позволяет получать достаточно сложные многослойные оптические конструкции без систем контроля толщины осаждаемого покрытия. Помимо этого, получаемые покрытия обладают низким внутренним напряжением, что является существенным фактором при осаждении покрытия на тонкие полимерные подложки или стеклянные изделия, где требуется сохранить высокое качество оптической поверхности. Благодаря высоким уровням энергетической эффективности и степени ионизации магнетронное распыление позволяет добиться получения «плотных» слоев вещества, например оксидов с высоким показателем преломления, на холодной

подложке, что имеет существенное значение для материалов подложек, которые не допускают нагрева [127]. Процесс магнетронного плазменного распыления [128] наиболее распространен. Этот процесс включает плазму на поверхности мишени в закрытом магнитном поле, порожденном одним или несколькими магнитами, расположенными позади мишени. Благодаря высокой скорости формирования покрытия процесс магнетронного распыления на постоянном токе, который сочетает в себе ток разряда и процесс магнетронного распыления, используется в настоящее время как аппарат массового производства покрытий. В последнее время используется усовершенствованная модель аппарата магнетронного распыления на постоянном токе, способная выполнять распыление по всей поверхности мишени, когда эксцентрично вращающийся магнит расположен за мишенью. Недостаток метода распыления состоит в том, что его нельзя отнести к чистым, поскольку мишени крепятся к стене камеры, что приводит к появлению примесей в покрытие. Кроме того, поскольку давление кислорода не может быть высоким, контроль состава ограничен. Далее, так как процесс не может проводиться при высоком вакууме, требуемый низкий уровень или нулевой уровень кислорода не может быть эффективно реализован.

Все описанные выше методы нанесения тонкопленочных структур требуют наличия вакуумных камер, как следствие – высоких энергозатрат. Также, несмотря на свой внушительный размер, фактический размер рабочих камер довольно мал. Использование вышеперечисленных методов требует громоздкого оборудования, больших энергозатрат на создание вакуума или плазмы. Поэтому целесообразно использование растворных методов для нанесения оксидных покрытий.

Золь-гель-метод – это традиционный метод подготовки покрытия, который заключается в приготовлении золя из алкоксидов металлов, а затем нанесении или пропитке золем поверхности композиционного материала, после высыхания образуется гель, и, наконец, производится отжиг для удаления органического растворителя. Однако длительное время подготовки приводит к образованию трещин в процессе сушки, что является основной причиной преждевременного выхода покрытий из строя в процессе эксплуатации. Методом золь-геля [129]

можно производить высококачественные покрытия низкой стоимости с широкими возможностями изменения свойств покрытий варьированием состава раствора.

Метод пропитки суспензией [130] заключается в смешивании порошкового материала, диспергатора, связующего вещества, растворителя, пеногасителя для приготовления стабильной и однородной суспензии, дальнейшем нанесении «зеленого» покрытия на поверхность композита с керамической матрицей путем погружения или нанесения кистью, а затем прокаливании при высокой температуре для удаления растворителя, связующего, диспергатора и, наконец, получения ТБП. Данный метод плохо совместим с металлическими поверхностями.

Новый *растворный экстракционно-пиролитический метод* [131] нанесения тонких оксидных пленок из растворов карбоксилатов металлов позволяет, во-первых, обеспечить чистоту растворов прекурсоров с использованием процессов экстракции металлов в органическую фазу экстракта, во-вторых, получить гомогенные наноструктурные пленки оксидов металлов.

Современные методы (вакуумное напыление, ионное распыление) обеспечивают высокое качество покрытий, однако требуют сложного оборудования и значительных энергозатрат. В этой связи актуальной становится разработка альтернативных методов формирования покрытий.

1.9 Постановка задачи исследования

Обзор состояния вопроса позволил выделить основные задачи исследования:

1. Выполнить численный анализ и измерения основных ОВПФ, определяющих условия труда на рабочих местах сварщиков и рабочих литейных и термических цехов и выбрать превалирующие факторы.

2. Изучить параметры микроклимата в сравнении с нормами с целью получения численных значений по снижению теплового излучения до нормативных параметров.

3. Провести анализ неионизирующего (УФ) излучения оптического диапазона на рабочих местах и определение требований по его снижению.

4. Установить эмпирическую зависимость эффективности экрана в зависимости от расстояния до источника.

5. Выполнить экспериментальные исследования по получению оксидных пленок экстракционно-пиролитическим методом.

6. Провести исследования спектральных характеристик полученных образцов и выявить наиболее эффективные составы покрытий для снижения уровней УФ- и ИК-излучения.

7. Представить основные методики исследований полученных экстракционно-пиролитическим методом материалов и определения особенностей их микроструктуры.

8. Провести расчеты лакуарности, фрактальной размерности и запрещенной зоны полученных оксидных материалов для обеспечения требуемых защитных характеристик.

9. Разработать конструкции, обеспечивающие снижение уровня УФ- и ИК-излучения на рабочих местах до требуемых норм, и выполнить расчет его эффективности.

10. Провести экспериментальные исследования эффективности разработанных конструкций в сравнении с расчетными значениями.

1.10 Выводы по главе 1

1. Проведен анализ опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах литейных, термических и сварочных цехов. Установлено, что одним из наиболее значимых физических факторов, определяющих класс условий труда, является тепловое (для литейных и термических цехов) и ультрафиолетовое (для сварочных цехов) излучение, превышающее допустимые значения по интенсивности в 2–5 раз.

2. Рассмотрены механизмы распространения теплового излучения в производственных помещениях и выявлено, что в литейных цехах доля теплового потока, передаваемого излучением, достигает до 70 % от общего энергообмена.

3. Установлено, что основным источником УФ-излучения на предприятиях машиностроительного профиля являются сварочные процессы, при которых уровни облучения многократно превышают предельно допустимые нормы.

4. Проведен обзор существующих методов и конструкций защиты от теплового и ультрафиолетового излучения. Доказано, что традиционные металлические и композитные экраны часто недостаточно эффективны из-за высокой стоимости, сложности монтажа и потери прозрачности.

5. Проанализированы перспективные составы оксидных покрытий (TiO_2 , ZrO_2 , SnO_2 , In_2O_3 , ИТО и др.), обладающих высоким отражением ИК-излучения при сохранении светопропускания в видимой области.

6. Показано, что существующие технологии нанесения тонких пленок обеспечивают высокое качество покрытий, но характеризуются высокой себестоимостью и энергоемкостью, что ограничивает их промышленное применение.

7. Обоснована необходимость разработки защитных экранов с оксидными покрытиями, полученными экстракционно-пиролитическим методом, отличающимся простотой реализации для больших и сложных поверхностей и низкой стоимостью.

8. Сформулированы основные задачи дальнейших исследований, направленных на разработку эффективных прозрачных теплозащитных экранов для улучшения условий труда работников.

Глава 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ЛИТЕЙНОГО, ТЕРМИЧЕСКОГО И СВАРОЧНОГО ЦЕХОВ

Проведено исследование опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов. Измеренные на рабочих местах параметры опасных и вредных производственных факторов были скорректированы в соответствии с данными карт специальной оценки условий труда и протоколами измерений.

При выполнении работ на металлообрабатывающих предприятиях требуется соблюдение условий труда, в которых ОВПФ не превышают нормативных или предельно допустимых уровней. В этом случае снижается риск отклонений в состоянии здоровья, поддерживается оптимальная работоспособность, сохраняется функциональность профессиональных умений. Исходя из этого рассмотрим параметры рабочей среды для ОВПФ, характерных для рабочих мест в литейном, термическом и сварочном цехах.

В числе основных задач системы управления охраной труда предприятий металлообрабатывающего комплекса первоочередными являются обеспечение безопасности и улучшение условий труда работников, исключение и (или) минимизация профессиональных рисков, вредных и (или) опасных производственных факторов. В связи с этим важно своевременное проведение специальной оценки условий труда (СОУТ) и определение различных рисков и опасностей при выполнении трудовых функций работниками литейного, термического и сварочного цехов.

2.1 Результаты анализа опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах литейного и термического цехов

Рассматриваемые рабочие места литейного цеха: литейщик металлов и сплавов, сталевар электропечи, сушильщик стержней, форм и формовочных материалов, огнеупорщик, занятый на ремонте ковшей в горячем состоянии.

Рабочая смена составляет 8 часов. В термическом цехе оценка ОВПФ проводилась на рабочем месте термиста на участках, где осуществляются различные операции по термообработке: отжиг, отпуск, закалка, нормализация, аустенизация, а также правка заготовок после термообработки и другие.

В соответствии с Приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 21.11.2023 № 817н [132] при проведении специальной оценки условий труда необходимо исследовать следующие факторы:

- примеси химических веществ в воздухе (окиси углерода и азота, фенол и др.) и пыли;
- виброакустические факторы (шум, инфразвук, ультразвук, локальная вибрация);
- неионизирующее излучение: переменное электромагнитное поле промышленной частоты 50 Гц;
- тяжесть труда (работа стоя, масса поднимаемых и переносимых грузов);
- микроклимат (температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение).

Обязательные требования к обеспечению безопасных условий труда и нормирование опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах производственных помещений, к которым относятся рабочие места металлообрабатывающих производств, регламентируются несколькими основными документами СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда», СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», а также правилами по охране труда при обработке металлов [19, 34, 133].

Химические факторы

На рассмотренных рабочих местах присутствуют следующие вредные вещества в воздухе рабочей зоны: оксид углерода, диоксид азота, никель, железо, фенол, формальдегид, образующиеся в процессе нагревания и плавления металлов, сжигания топлива, механической обработки металлов, термического разложения

форм при заливке горячего металла и других технологических процессах. На рабочих местах термиста в воздухе рабочей зоны присутствует акролеин, выделяющийся преимущественно из закалочных масел. Количество вредных веществ в воздухе рабочей зоны нормируется согласно СанПиН 1.2.3685-21.

Оксид углерода CO (угарный газ; углерода окись): максимально разовая предельно допустимая концентрация CO в воздухе рабочей зоны составляет 20 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в газообразном состоянии, класс опасности – 4 (малоопасные), имеет остронаправленное действие. Токсическое воздействие заключается в связывании с гемоглобином и образовании карбоксигемоглобина, который не может переносить O₂, что приводит к гипоксии. Концентрация оксида углерода на рабочих местах сталевара и литейщика – 18,6 мг/м³, находится в пределах допустимой концентрации, класс условий труда соответствует классу 2 (допустимый). На рабочем месте термиста концентрация не превышает 10 мг/м³, что также соответствует второму классу условий труда.

Диоксид азота NO₂ (азота оксиды /в пересчете на NO₂ (азота окислы)): максимально разовая предельно допустимая концентрация NO₂ в воздухе рабочей зоны составляет 5 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в газообразном состоянии, класс опасности – 3 (умеренно опасные), имеет остронаправленное действие, оказывает общетоксическое действие на организм, раздражает дыхательные пути, вызывает нарушение кислородного обмена. Диоксид азота идентифицирован на рабочих местах сталевара и литейщика с концентрацией, не превышающей ПДК, – 1,3 мг/м³, на рабочем месте термиста концентрация составляет менее 1 мг/м³, класс условий труда 2.

Никель Ni (никеля оксиды, сульфиды и смеси соединений никеля (файнштейн, никелевый концентрат и агломерат, оборотная пыль очистных устройств) (по никелю)): максимально разовая предельно допустимая концентрация Ni в воздухе рабочей зоны составляет 0,05 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде аэрозолей, класс опасности – 1 (чрезвычайно опасные), воздействие соединений никеля на организм

человека оценивается как канцерогенное и sensibiliziruyushcheye. На рабочих местах сталевара и литейщика данное вещество обнаружено в количестве, не превышающем ПДК, – 0,028 мг/м³, класс условий труда 2.

Железо Fe: среднесменная предельно допустимая концентрация Fe в воздухе рабочей зоны составляет 10 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде аэрозолей, класс опасности – 4, относится к аэрозолям преимущественно фиброгенного действия, при длительном воздействии накапливается в организме и вызывает заболевания, такие как пневмокониоз и сидероз. Железо в виде оксидов и пылей идентифицировано на рабочих местах сталевара и литейщика с концентрацией равной 0,8 мг/м³, среднесменное значение концентрации железа составило менее 0,5 мг/м³, что не превышает ПДК, класс условий труда 2.

Фенол C₆H₆O (гидроксibenзол): максимально разовая предельно допустимая концентрация фенола в воздухе рабочей зоны составляет 1 мг/м³, среднесменная предельно допустимая концентрация ПДК 0,3 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде паров, класс опасности – 2 (высокоопасные), при длительном воздействии негативно влияет на состояние дыхательных путей и работу нервной системы. На рабочих местах сталевара и литейщика концентрация фенола составила 0,25 мг/м³, ПДК не превышена, класс условий труда 2.

Формальдегид CH₂O (метаналь): максимально разовая предельно допустимая концентрация формальдегида в воздухе рабочей зоны составляет 0,5 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде паров, класс опасности – 2. Воздействие вещества на организм человека оценивается как sensibiliziruyushcheye и ostronapравленное: раздражающее и нейротоксичное. Концентрация формальдегида на рабочем месте сушильщика превышает ПДК в 2,3 раза и составляет 1,15 мг/м³, класс условий труда вредный – 3.2. На рабочих местах литейщика, сталевара и огнеупорщика концентрация формальдегида превышает ПДК в 3,7 раза и составляет 1,85 мг/м³, класс условий труда 3.2 (вредный).

Акролеин C_3H_4O (акриlaldehyde): максимально разовая предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны $0,2 \text{ мг/м}^3$. В воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде паров, класс опасности – 2. Акролеин обладает токсичным, канцерогенным и сенсибилизирующим действием. Его воздействие поражает в первую очередь дыхательную систему, но также может негативно влиять на нервную систему и способствовать развитию онкологических заболеваний. Концентрация акролеина на рабочем месте термиста – $0,17 \text{ мг/м}^3$, класс условий труда 2.

Таким образом, в связи с повышенной концентрацией формальдегида, превышающей норму на всех рабочих местах, химический фактор на рабочих местах литейного цеха соответствует классу условий труда 3.2 – вредный. На рабочем месте термиста класс условий труда 2 – допустимый, поскольку концентрации всех веществ находятся в пределах нормы.

Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (АПФД)

На рассмотренных рабочих местах в ходе технологических операций выделяются пыли веществ, преимущественно фиброгенного действия: цементная пыль на рабочем месте огнеупорщика, которая выделяется из цементосодержащих смесей для футеровки печей; силикатная пыль на рабочем месте литейщика и сталевара, выделяющаяся при частичной деградации литейных форм и стержней во время заливки металла; кремниевая пыль, выделяющаяся при сушке литейных формам и стержней на рабочем месте сушильщика.

Цементная пыль 1856: ее среднесменная предельно допустимая концентрация составляет 8 мг/м^3 , в воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде аэрозолей, класс опасности – 3. На рабочем месте огнеупорщика среднесменные значения концентрации цементной пыли составляют $5,2 \text{ мг/м}^3$, что входит в предельно допустимое значение для данного вещества, класс условий труда – 2.

Силикатная пыль 1846: ее максимально разовая предельно допустимая концентрация вещества в воздухе рабочей зоны составляет 8 мг/м^3 , среднесменная предельно допустимая концентрация – 4 мг/м^3 , в воздухе в условиях производства

преимущественно находится в виде аэрозолей, класс опасности – 3. На рабочих местах литейщика и сталевара массовая концентрация силикатной пыли составила $7,5 \text{ мг/м}^3$, среднесменные значения концентрации составляют менее 1 мг/м^3 , что входит в предельные значения допустимых концентраций, класс условий труда – 2.

Кремния диоксид кристаллический 1157: максимально разовая предельно допустимая концентрация диоксида кремния в воздухе рабочей зоны составляет 6 мг/м^3 , среднесменная предельно допустимая концентрация 2 мг/м^3 , в воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде аэрозолей, класс опасности – 3. На рабочем месте сушильщика массовая концентрация кремниевой пыли составила $3,6 \text{ мг/м}^3$, среднесменные значения концентрации составляют $1,8 \text{ мг/м}^3$, оба показателя не превышают ПДК, класс условий труда – 2.

Таким образом, концентрация пыли веществ преимущественно фиброгенного действия не превышает нормативные значения и класс условий труда по фактору АПФД на всех исследуемых рабочих местах – 2, допустимый. На рабочих местах термического цеха наличие в воздухе рабочей зоны АПФД не зафиксировано.

Тяжесть труда

Тяжесть трудового процесса определяется длиной пути перемещения груза, мышечным усилием, массой перемещаемых грузов, углом наклона корпуса тела работника и количеством наклонов за рабочий день (смену), временем удержания груза, количеством стереотипных рабочих движений, рабочим положением тела работника в течение рабочего дня (смены).

Категория работ по уровню энергозатрат в литейных и термических цехах на механизированных участках относится к Ib (140–174 Вт, работы, производимые не только в положении сидя, стоя, и (или) связанные с ходьбой) и IIa (75–232 Вт, работы, связанные с ходьбой и перемещением изделий или предметов до 1 кг в положении стоя и (или) сидя). На участках, где используется ручной труд, могут присутствовать работы, относящиеся к категории IIb (233–290 Вт, работы, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением) и III (более 290 Вт,

работы, связанные с постоянными передвижениями, а также перемещением и переноской тяжестей свыше 10 кг).

На рассматриваемых рабочих местах литейного и термического цехов осуществляются подъем и перемещение грузов постоянно в течение смены (более 2 раз в час) весом от 3 до 5 кг и разово (до 2 раз в час) весом от 5 до 30 кг. Подъем грузов осуществляется как с рабочей поверхности, так и с пола, при нормативных значениях 15 и 30 кг для разового и постоянного перемещения соответственно.

Общая физическая динамическая нагрузка в килограммах на метр, составляет от 1755 до 7630. При предельно допустимом уровне до 25 000 кг·м.

Количество стереотипных движений за рабочий день (смену) при локальной/региональной нагрузке от 0/3150 до 3515/6960 соответственно. Предельно допустимое значение стереотипных движений за рабочий день при локальной и региональной нагрузке составляют 40 000 и 20 000 соответственно.

Статическая нагрузка за рабочий день (смену) характеризуется общей статической нагрузкой от 28 717 до 58 060 кгс·с, при разрешенной общей статической нагрузке до 36 000 кгс·с. Превышение по общей статической нагрузке выявлено на рабочем месте огнеупорщика, где класс условий труда по данному фактору составил 3.1 (вредный). Для остальных рабочих мест класс условий труда – допустимый.

На рабочих местах огнеупорщика и сталевара идентифицированы такие положения тела, которые характеризуются как «стоя» и «неудобные». На рабочем месте огнеупорщика работник проводит в положении стоя 40 % рабочего времени, в неудобной рабочей позе работник проводит 30 % рабочего времени. На рабочем месте сталевара работник проводит 70 % рабочего времени в положении стоя и 10 % рабочего времени в неудобной позе. На рабочих местах литейщика и сушильщика идентифицировано рабочее положение тела стоя, в которой работники проводят 70–75 % рабочего времени. На рабочем месте термиста работы в позе стоя проводятся в течение 65 % рабочего времени, в свободной позе – 25 %, и 10 % в неудобной позе. Допустимые значения процента рабочего времени, проводимого в рабочем положении стоя, – не более 60 % рабочего времени.

В неудобной рабочей позе, согласно нормативному значению, разрешено находиться не более 25 % рабочего времени. Таким образом, класс условий труда на всех рассмотренных рабочих местах классифицируется как 3.1 – вредный.

Количество наклонов корпуса тела работников более 30° за рабочий день (смену) варьирует от 48 до 77 при нормативном значении – до 100 наклонов.

Суммарное перемещение работников в пространстве составляет от 1 до 2,1 км. Нормативное значение суммарного перемещения работников в пространстве составляет 8 км.

Таким образом, в связи с рабочей позой «стоя» в течение большей части рабочего времени, а также из-за проведения работы в неудобной позе, фактор тяжести трудового процесса на рабочих местах сталевара, литейщика и сушильщика относится к классу условий труда 3.1. На рабочем месте огнеупорщика класс условий труда – 3.2 в связи с выполняемыми одной рукой операциями по удержанию груза с приложением усилий, превышающих предельно допустимый уровень.

Шум

Нормативным эквивалентным уровнем звука (L_{pAeqT} , дБА) на рабочих местах является 80 дБА [34].

Из-за наличия большого количества шумящего производственного оборудования в литейном цехе и проведения в нем технологических операций, сопровождающихся звуковым излучением, фактический эквивалентный уровень звука за рабочую смену на рабочих местах превышает предельно допустимое значение и соответствует 92 дБА на РМ огнеупорщика, 86,4 дБА на РМ сталевара и литейщика и 82,1 на РМ сушильщика. Условия труда по шуму для рабочих мест огнеупорщика, сталевара и литейщика соответствуют классу 3.2, для рабочего места сушильщика – 3.1. При производственных работах в термическом цехе основными источниками шума являются производственное оборудование и вентиляция, эквивалентный уровень звука за рабочую смену не превышает ПДК и составляет 77,7 дБА на рабочем месте термиста.

Предельно допустимые уровни инфразвука и ультразвука на рабочих местах представлены в таблицах 2.1 и 2.2 [34].

Таблица 2.1 – Предельно допустимые уровни инфразвука на рабочих местах

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Уровни звукового давления, дБ, не более
2,0	100
4,0	95
8,0	90
16,0	85

Таблица 2.2 – Предельно допустимые уровни воздушного ультразвука на рабочих местах

Третьоктавные полосы частот, кГц	Уровни звукового давления, дБ
12,5	80
16,0	90
20,0	100
25,0	105
31,5–100,0	110

На рассматриваемых рабочих местах источники повышенного воздействия излучения в ультразвуковом и инфразвуковом диапазонах идентифицированы не были.

Вибрация

Нормирование (общей и локальной) вибрации на рабочих местах представлено в таблице 2.3 [34].

Таблица 2.3 – Предельно допустимые значения и уровни производственной вибрации

Вид вибрации	Категория вибрации	Направление действия	Фильтр частотной коррекции	Эквивалентные скорректированные уровни виброускорения	
				м/с ²	дБ
Локальная	-	Хл, Ул, Зл	Wh	2,0	126
Общая	Технологическая вибрация на стационарных рабочих местах	Zo	Wk	0,1	100
		Хо, Yo	Wd	0,071	97

Воздействие локальной вибрации зафиксировано на РМ огнеупорщика при работе с пневмомолотком. Фактический эквивалентный скорректированный уровень виброускорения по осям X , Y , Z составил 112,9, 115,1 и 118,3 м/с² соответственно. Итоговый класс условий труда по фактору локальной вибрации составил 2 (допустимый).

Параметры микроклимата

Для рассматриваемых рабочих мест сталевара, литейщика, сушильщика и термиста категория работ соответствует *IIб*, для огнеупорщика – *III*. В холодный период года температура воздуха на рабочих местах производственных помещений категории *IIб* должна быть не менее 15 и не более 22 °С, для категории работ *III* – не менее 13 и не более 21 °С, относительная влажность должна быть не менее 15 и не более 75 %, скорость движения воздуха должна находиться в пределах 0,2–0,4 м/с [34].

Для рассматриваемых рабочих мест *III* категории диапазон температур ниже оптимальных величин в холодный период года составляет 13,0–15,9 °С, а диапазон выше оптимальных величин 18,1–21,0 °С. Для рабочих мест категории работ *IIб* диапазон температур ниже оптимальных величин в холодный период года составляет 15,0–16,9 °С, а диапазон выше оптимальных величин 19,1–22,0 °С.

Фактическая температура на рассмотренных рабочих местах на высоте измерения 0,1 и 1,5 м от пола составляет 21,8 и 22,7 °С соответственно на РМ огнеупорщика; 33,5 и 35,8 °С на РМ сталевара и литейщика; 31,8 и 32,6 °С на РМ сушильщика; 32,6 и 35,0 °С на РМ термиста.

Фактическая скорость движения воздуха на рассмотренных рабочих местах на высоте 0,1 и 1,5 м составляет 0,5 и 0,28 м/с соответственно на РМ огнеупорщика; 0,29 и 0,36 м/с на РМ сталевара и литейщика; 0,3 и 0,38 м/с на РМ сушильщика; 0,4 и 0,35 м/с на РМ термиста.

Фактическая относительная влажность составляет 20–35 % и соответствует допустимому значению на всех рабочих местах.

На рабочих местах, на которых скорость движения воздуха не превышает 0,6 м/с, а интенсивность теплового облучения – 1200 Вт/м² для интегральной

оценки тепловой нагрузки среды рекомендуется использовать индекс тепловой нагрузки среды (ТНС-индекс). Для категории работ *IIб* нормативное значение ТНС-индекса находится в пределах от 19,5 до 23,9 °С, для *III* категории работ нормативное значение ТНС-индекса находится в пределах от 18,0 до 21,8 °С.

Фактические значения ТНС-индекса на рассмотренных рабочих местах на высоте 0,1 и 1,5 м от пола составляют 21,8 и 22,7 °С соответственно на РМ огнеупорщика; 26,4 и 28,5 °С на РМ сталевара и литейщика; 19,6 и 19,7 °С на РМ сушильщика; 36,6 и 36,7 °С на РМ термиста.

Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от источников излучения, нагретых до температуры более 600 °С, не должны превышать 140 Вт/м².

Фактическая интенсивность теплового облучения на рассмотренных рабочих местах на высоте 0,5, 1,0 и 1,5 м от пола составляет: 144,8, 184,5 и 201,5 Вт/м² соответственно на РМ огнеупорщика; 218,0, 357,5 и 318,5 Вт/м² на РМ сталевара и литейщика; 275,5, 346,5 и 379,5 Вт/м² на РМ сушильщика; 236,5, 433,5 и 650 Вт/м² на РМ термиста.

Таким образом, повышенные значения ТНС-индекса и интенсивности теплового облучения на всех рассмотренных рабочих местах определяют класс условий труда как 3.1 – вредный. На рабочем месте термиста по данному фактору класс условий труда – 3.2.

Неионизирующие излучения

Предельно допустимый уровень электромагнитного поля (ЭП) частотой 50 Гц на рабочем месте составляет 5 кВ/м [34]. На рассматриваемых рабочих местах источники повышенного воздействия неионизирующего излучения идентифицированы не были.

Определение класса (и подкласса) условий труда

При совокупном воздействии трех и более вредных и (или) опасных производственных факторов, отнесенных к подклассу 3.1 вредных условий труда, итоговый класс (подкласс) условий труда определяется как подкласс 3.2 вредных условий труда.

При совокупном воздействии двух и более вредных и (или) опасных производственных факторов, отнесенных к подклассам 3.2, 3.3, 3.4 вредных условий труда, итоговый класс (подкласс) повышается на одну степень [31].

По результатам проведения экспериментальных исследований и исследований, осуществляемых в рамках специальной оценки условий труда, на рабочих местах литейного и термического цехов идентифицированы вредные и (или) опасные факторы производственной среды и трудового процесса, такие как параметры микроклимата, вредные вещества, шум, локальная вибрация, а также тяжесть труда. Результаты оценки приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения опасных и вредных производственных факторов

Наименование производственного фактора, ед. изм.	РМ	Допустимый уровень	Фактический уровень	Величина отклонения	Класс условий труда
1	2	3	4	5	6
Оксид углерода, мг/м ³	Ст, Л Т	20,0	18,6 10,0	-	2
Диоксид азота, мг/м ³	Ст, Л Т	5,0	1,3 1,0	-	2
Акролеин, мг/м ³	Т	0,2	0,17	-	2
Никель, мг/м ³	Ст, Л	0,050	0,028	-	2
Железо, мг/м ³	Ст, Л	-/10,0	0,8/<0,5	-	2
Фенол, мг/м ³	Ст, Л	1,00/0,30	0,25/0,13	-	2
Формальдегид, мг/м ³	О Ст, Л С,	0,50	1,82 1,85 1,17	1,32 1,35 0,67	3.2
Цементная пыль, мг/м ³	О	-/8,0	15,2/5,2	-	2
Силикатная пыль, мг/м ³	Ст, Л	8,0/4,0	7,5/<1,0	-	2
Кремния диоксид кристаллический, мг/м ³	С	6,0/2,0	3,6/1,8	-	2
Эквивалентный уровень звука, дБА	О Ст, Л С Т	80	92,0 86,4 82,1 77,7	12,0 6,4 2,1 -	3.2 3.2 3.1 2
Эквивалентный уровень виброскорости по осям X, Y, Z, дБ	О	126 126 126	112,9 115,1 118,3	-	2

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5	6
Температура воздуха о.с. (категория Ш), °С	О	13,0–21,0	26,7–29,5	5,7–8,5	2
Температура воздуха о.с. (категория Пб), °С	С Ст, Л Т	15,0–22,0	31,8–32,6 33,5–35,8 32,6–35,0	9,8–10,6 11,5–13,8 10,6–13,0	2 2
Индекс тепловой нагрузки (ТНС-индекс, категория Ш), °С	О	<21,9	21,8–22,7	0,8	3.2
Индекс тепловой нагрузки (ТНС-индекс, категория Пб), °С	С, Ст, Л Т	<24,0	19,6–19,7 26,4–28,5 36,6–36,7	- 2,4–4,5 12,6–12,7	2 3.3–3.4 4
Скорость движения воздуха (категория Пб), м/с	С, Ст, Л Т	0,2–0,4	0,3–0,38 0,29–0,36 0,35–0,4	-	2
Скорость движения воздуха (категория Ш), м/с	О	0,2–0,4	0,28–0,50	0,1	2
Влажность воздуха, %	О, Ст, Л, С, Т	15–75	20,5–35,0	-	2
Интенсивность теплового излучения, Вт/м ²	С, Ст, Л, О, Т	140	144–275 184–346 201–379 237–650	4–135 44–206 61–235 97–510	3.1 3.1 3.1 3.2
Тяжесть труда	О Ст, Л, С, Т	-	-	-	3.2 3.1
Общая оценка условий труда	С, Т О, Л, Ст	-	-	-	3.2 3.3

Примечание: Ст – сталевар электропечи, Л – литейщик металлов и сплавов, С – сушильщик стержней, форм и формовочных материалов, О – огнеупорщик, занятый на ремонте ковшей в горячем состоянии, Т – термист.

Результаты исследований показали, что параметры микроклимата являются одним из преобладающих факторов, определяющих класс и подкласс условий труда, что особенно характерно для термического цеха.

Таким образом, класс (подкласс) условий труда рабочих мест литейного цеха для рабочего места сушильщика определяется как *вредный* – 3.2, для рабочих мест огнеупорщика, литейщика и сталевара как *вредный* – 3.3, на рабочих местах термиста в термическом цехе класс условий труда *вредный* – 3.2.

2.2 Результаты анализа параметров микроклимата на рабочих местах и определение требований к снижению теплового излучения

Были выполнены измерения температуры, скорости движения воздуха, относительной влажности и интенсивности теплового излучения, определен индекс тепловой нагрузки (ТНС-индекс). Измерения проводились на рабочих местах литейного и термического цехов предприятия металлообрабатывающей промышленности. Измерения температуры и скорости движения воздуха проводились на высоте 0,1 и 1,5 м, определение ТНС-индекса проводилось на тех же высотах. Измерения интенсивности теплового излучения проводились на высотах 0,5, 1,0 и 1,5 м.

Данные измерений параметров микроклимата на рабочих местах литейного и термического цехов сведены в таблицу 2.5. Сравнение данных измерений с допустимыми нормами [34] приведено на рисунках 2.1–2.5.

Требуемые снижения параметров микроклимата на рабочих местах литейного и термического цехов приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – 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 ²		
	$h = 0,1$ 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

Таблица 2.6 – Значения превышений параметров микроклимата на рабочих местах литейного цеха

Точки измерений	Температура, °С		ТНС-индекс, °С		Скорость движения воздуха, м/с		Относительная влажность воздуха, %	Интенсивность теплового излучения, Вт/м ²		
	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 (Ш)	5,7	8,5	2,4	2,5	0,1	-	-	4,8	44,5	61,5
РМ сталевара (Пб)	11,5	13,8	2,4	2,5	-	-	-	78,0	235,5	178,5
РМ литейщика (Пб)	11,5	13,8	-	-	-	-	-	78,0	235,5	178,5
РМ сушильщика (Пб)	9,8	10,6	12,6	12,7	-	-	-	135,5	206,5	239,8
РМ термиста (Пб)	10,6	13,0	2,4	2,5	-	-	-	96,5	293,5	510,0

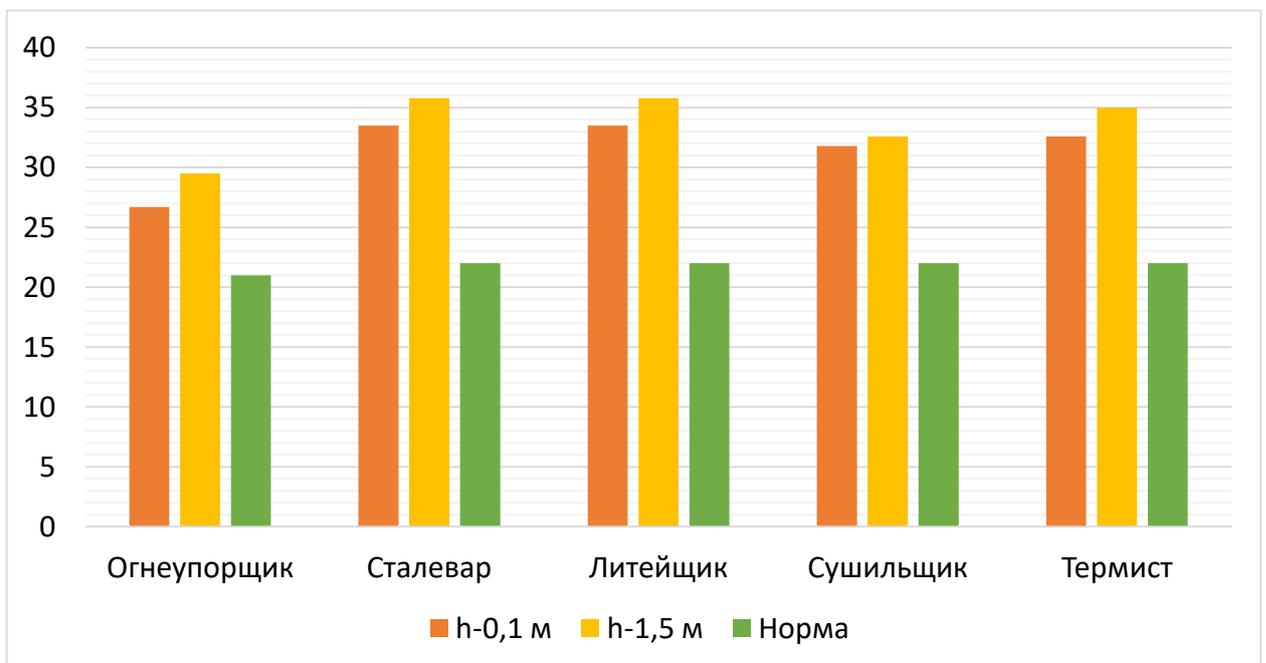


Рисунок 2.1 – Данные измерений температуры, °С, на рабочих местах огнеупорщика, сталевара, литейщика, сушильщика, термиста в сравнении с нормами

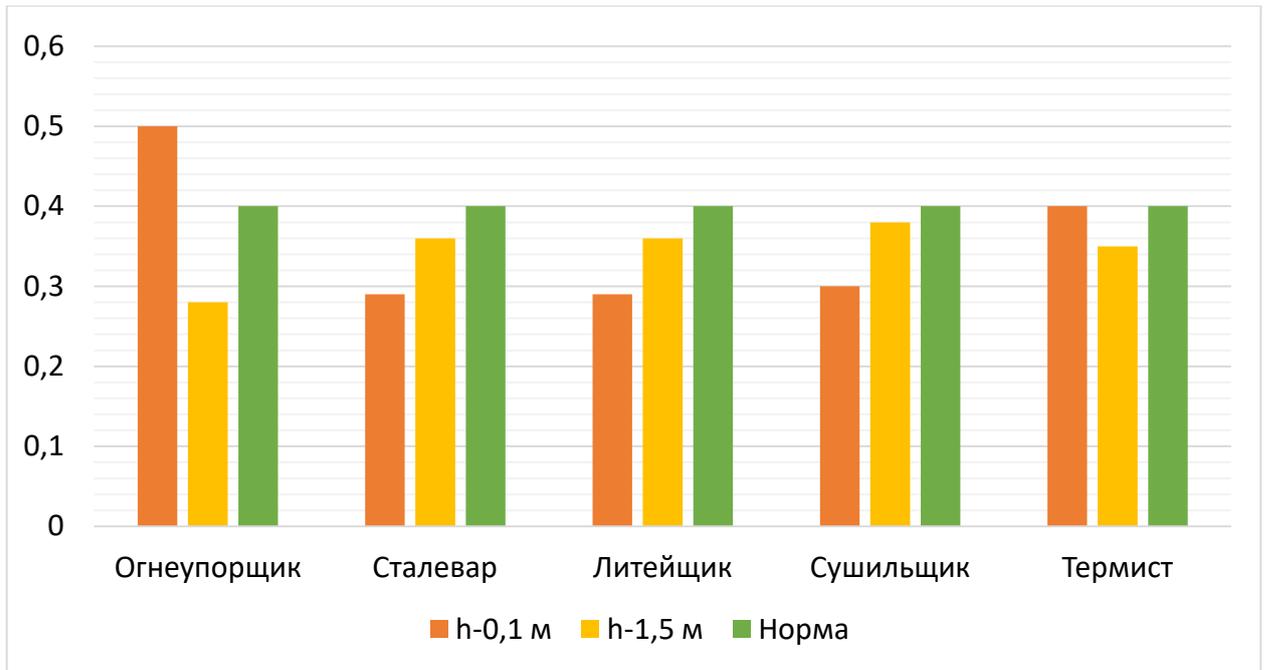


Рисунок 2.2 – Данные измерений скорости воздушного потока, м/с, на рабочих местах огнеупорщика, сталевара, литейщика, сушильщика, термиста в сравнении с нормами

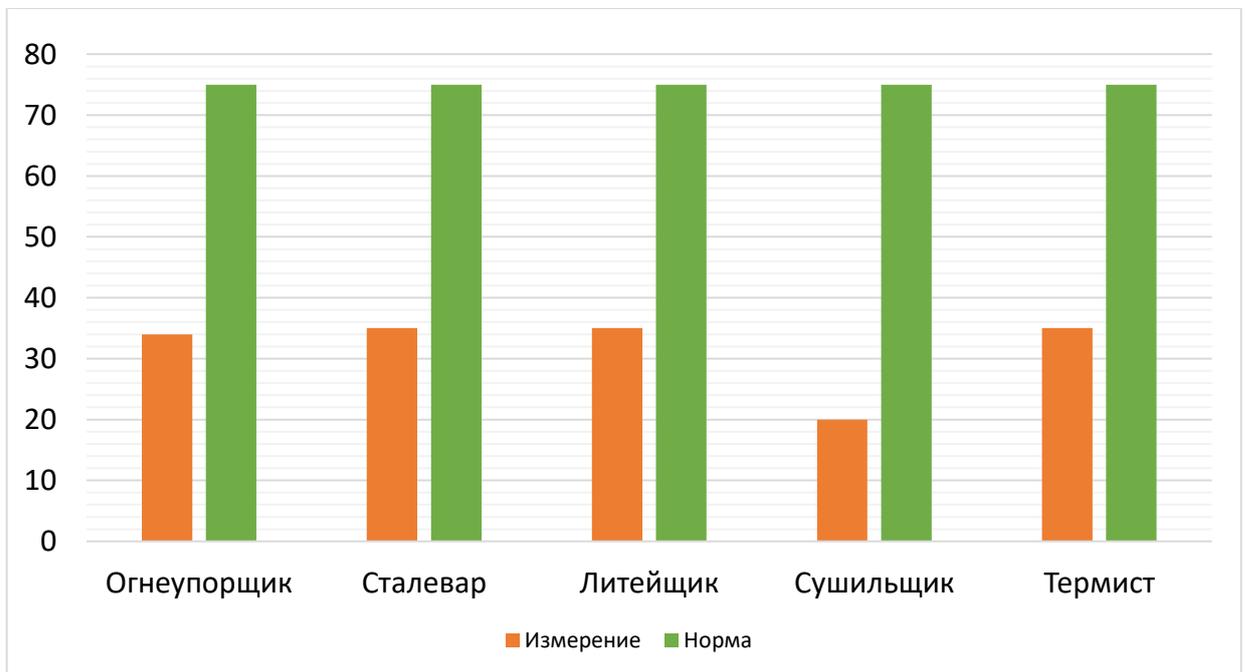


Рисунок 2.3 – Данные измерений относительной влажности воздуха, %, на рабочих местах огнеупорщика, сталевара, литейщика, сушильщика, термиста в сравнении с нормами

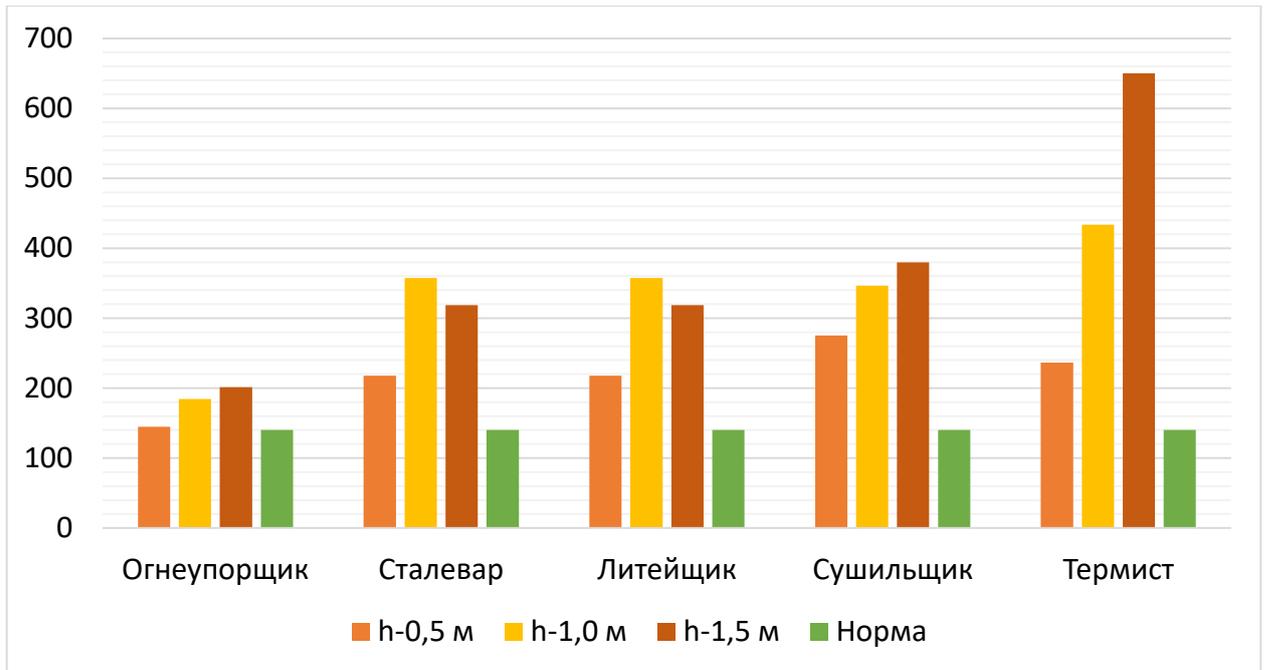


Рисунок 2.4 – Данные измерений интенсивности теплового излучения, Вт/м², на рабочих местах огнеупорщика, сталевара, литейщика, сушильщика, термиста в сравнении с нормами

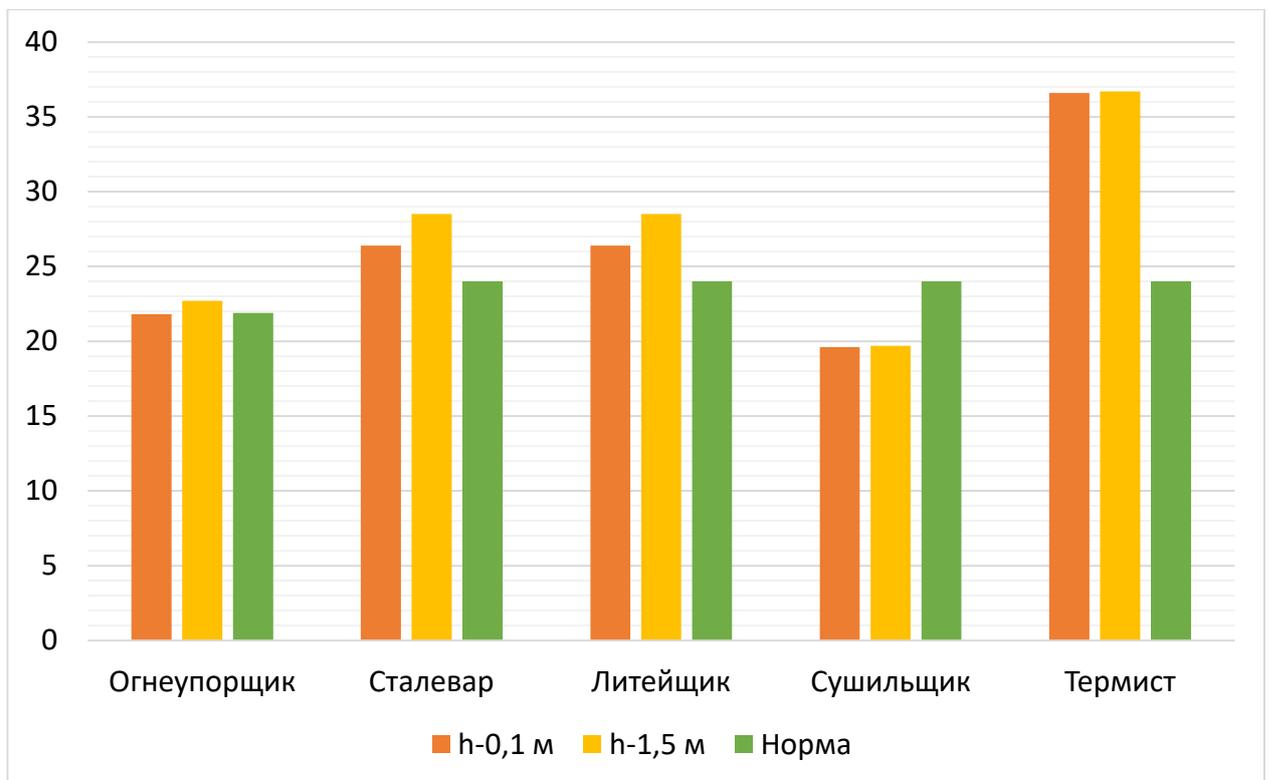


Рисунок 2.5 – Данные ТНС-индекса, °С на рабочих местах огнеупорщика, сталевара, литейщика, сушильщика, термиста в сравнении с нормой

Из анализа данных, приведенных на рисунках 2.1–2.5 и в таблице 2.6, можно сделать следующие выводы относительно требований к снижению теплового излучения на рабочих местах литейного цеха:

- среди рассмотренных параметров микроклимата наибольшие превышения предельно допустимых уровней (до 2,7 раза) выявлены по фактору теплового излучения, воздействие теплового излучения повышает температуру окружающих тел и, как следствие, нагрев от них воздуха рабочей зоны;
- интенсивность теплового излучения зависит от высоты от пола/рабочей поверхности;
- наибольшие превышения интенсивности теплового излучения на рабочих местах отмечены на высоте 1 и 1,5 м;
- наибольшее превышение уровня теплового излучения и ТНС-индекса зарегистрировано в термическом цехе на рабочем месте термиста;
- наибольшие превышения интенсивности теплового излучения в литейном цехе отмечены на рабочем месте сушильщика стержней, форм и формовочных материалов, что можно объяснить воздействием на его рабочее место дополнительных источников тепла сушильного оборудования;
- наименьшее превышение теплового излучения зарегистрировано на рабочем месте огнеупорщика, занятого на ремонте ковшей в горячем состоянии.

2.3 Результаты анализа опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах сварочного цеха

Рассматриваемые рабочие места сварочного цеха: электрогазосварщик, электросварщик ручной сварки, слесарь по сборке металлоконструкций, слесарь-инструментальщик. Рабочий день – восьмичасовой.

В соответствии с Приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 21.11.2023 № 817н [132] при проведении специальной оценки условий труда необходимо исследовать следующие факторы:

- примеси химических веществ в воздухе (окиси углерода и азота, озон и др.);
- виброакустические факторы (шум, локальная вибрация);
- неионизирующее излучение (переменное электромагнитное поле – промышленная частота 50 Гц, ультрафиолетовое излучение).

Также к производственным факторам работников сварочного цеха относятся пыль (в т. ч. металлическая), тяжесть труда.

Химические факторы

На рассмотренных рабочих местах присутствуют следующие вредные вещества в воздухе рабочей зоны, выделяющиеся в процессе нагревания и испарения металлов: оксид углерода, диоксид азота, марганец. Под воздействием ультрафиолетового излучения образуется озон, который также является вредным веществом для воздуха рабочей зоны. Количество вредных веществ в воздухе рабочей зоны нормируется СанПиН 1.2.3685-21.

Оксид углерода 2122 CO (угарный газ): максимально разовая предельно допустимая концентрация CO в воздухе рабочей зоны составляет 20 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в газообразном состоянии, класс опасности – 4, имеет остронаправленное действие. Фактическое содержание CO на рабочих местах сварщика и сварщика ручной сварки находится в диапазоне 24,3–28,3 мг/м³, на рабочих местах слесаря по сборке металлоконструкций – 23,0–28,3 мг/м³ и превышает предельно допустимую концентрацию, определяя класс условий труда как 3.1 (вредный). На рабочем месте слесаря-инструментальщика концентрация оксида углерода составляет 19,7 мг/м³, класс условий труда – 2 (допустимый).

Азота оксиды в пересчете на NO₂ 13 (азота окислы): максимально разовая предельно допустимая концентрация NO₂ в воздухе рабочей зоны равна 5 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в газообразном состоянии, класс опасности – 3. Фактическое содержание на рассмотренных рабочих местах сварочного цеха составило 2,2–2,3 мг/м³ для рабочих мест

сварщика и сварщика ручной сварки; 2,1–2,3 мг/м³ на рабочих местах слесаря по сборке металлоконструкций; 1,9 на рабочем месте слесаря-инструментальщика. Таким образом, ПДК по NO₂ не превышена, и условия труда соответствуют 2 классу.

Озон 1582 (O₃): максимально разовая предельно допустимая концентрация вещества в воздухе рабочей зоны 0,1 мг/м³, в воздухе в условиях производства преимущественно находится в газообразном состоянии, класс опасности – 1. Озон обладает остронаправленным действием. Фактическая концентрация озона в воздухе рабочей зоны всех рассмотренных рабочих мест составила менее 0,1 мг/м³, класс условий труда 2 (допустимый).

Марганец (Mn): при содержании до 20 % в сварочных аэрозолях относится ко второму классу опасности. Максимально разовая предельно допустимая концентрация марганца в воздухе рабочей зоны 0,6 мг/м³, среднесменная предельно допустимая концентрация 0,2 мг/м³. Фактическая среднесменная концентрация марганца в воздухе рабочей зоны рассматриваемых рабочих мест сварочного цеха составляет от 0,06 до 0,08 мг/м³, что соответствует классу условий труда 2. Максимально разовая зафиксированная концентрация марганца на рабочих местах сварочного цеха 0,47 мг/м³, что также не превышает предельно допустимую концентрацию и соответствует 2-му классу условий труда.

Таким образом, из-за повышенной среднесменной концентрации оксида углерода, превышающей норму на рабочих местах сварщика, сварщика ручной сварки и слесаря по сборке металлоконструкций, условия труда на перечисленных рабочих местах по химическому фактору относятся к классу условий труда 3.1 – вредный. На рабочем месте слесаря-инструментальщика превышения по концентрации вредных веществ не зафиксировано, класс условий труда соответствует 2 – допустимый.

Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия

В ходе технологических операций, связанных с резкой и шлифовкой металлов, выделяется железная пыль преимущественно фиброгенного действия. Такие вещества раздражают дыхательные пути, склонны накапливаться в легких,

вызывая фиброз, повреждают альвеолы легких. Диоксид железа Fe_2O_3 , FeO (железа (III) оксид): среднесменная предельно допустимая концентрация составляет 6 мг/м^3 , в воздухе в условиях производства преимущественно находится в виде аэрозолей, класс опасности – 4. Присутствие железной пыли идентифицировано на рабочих местах слесаря по сборке металлоконструкций, среднесменные значения концентрации составляют менее $1,0 \text{ мг/м}^3$, класс условий труда по АПФД соответствует 2 – допустимый.

Шум

Нормативным эквивалентным уровнем звука (L_{pAeqT} , дБА) на рабочих местах является 80 дБА [34].

Наличие на рабочих местах сварочного цеха такого вредного производственного фактора, как шум, объясняется наличием производственного оборудования, создающего акустическое воздействие, и проведением шумных технологических операций по резке и шлифовке металлов, зачистке сварных швов и т. д. Фактический эквивалентный уровень звука за рабочую смену на рабочих местах сварочного цеха составляет 83,3–88,2 дБА на рабочих местах электрогазосварщика, 89,8–94,0 дБА на рабочих местах сварщика ручной сварки, 87,6–91,4 дБА на рабочих местах слесаря по сборке металлоконструкций и 79,7 на рабочем месте слесаря-инструментальщика. Источником шума, вносящим основной вклад является зачистка сварных швов с помощью угловой шлифовальной машины. Класс условий труда по шуму для рабочих мест сварщика, сварщика ручной сварки и слесаря по сборке металлоконструкций определяется как 3.2 – вредный. Для рабочего места слесаря-инструментальщика – 2, допустимый.

На рассматриваемых рабочих местах источники повышенного воздействия излучения в ультразвуковом и инфразвуковом диапазоне идентифицированы не были.

Вибрация

Нормирование (общей и локальной) вибрации на рабочих местах представлено в таблице 2.1 [34].

Воздействие локальной вибрации зафиксировано на рабочих местах электрогазосварщика, электросварщика ручной сварки при работе с ручным электрическим инструментом и слесаря по сборке металлоконструкций при работе с машиной сетевой углошлифовальной. Фактический эквивалентный скорректированный уровень виброускорения по оси X составил 112,9–115,9 м/с², по оси Y – 115,1–119,7 м/с², по оси Z – 118,3–122,4 м/с². Итоговый класс условий труда по фактору локальная вибрация составил 2 (допустимый).

Тяжесть труда

В сварочном цехе работы по уровню энергозатрат можно отнести к категориям *Iб*, *IIа* и *IIб*. Категория *Iб* включает работы, связанные с ходьбой и перемещением, но с умеренным физическим напряжением, например сварку в положении стоя. Категории *IIа* и *IIб* соответствуют более высоким уровням энергозатрат, связанным с ходьбой, перемещением грузов и значительным физическим напряжением, например, при ручной сварке с переноской деталей.

Суммарная физическая динамическая нагрузка составляет 1606 кг·м на всех рассматриваемых рабочих местах сварочного цеха, при предельно допустимом уровне до 25 000 кг·м. Данный показатель, как и все последующие, совпадает для всех рассматриваемых рабочих мест сварочного цеха.

На рассматриваемых рабочих местах осуществляются подъем и перемещение тяжестей постоянно в течение рабочего дня (более 2 раз в час) весом 5 кг и разово (до 2 раз в час) весом 15 кг. Подъем грузов осуществляется как с рабочей поверхности, так и с пол, при нормативных значениях до 15 кг для разового перемещения и до 30 кг для постоянного.

Количество стереотипных движений за рабочий день (смену) при локальной нагрузке – 3756, при региональной нагрузке – 3481. Предельно допустимые значения стереотипных движений за рабочий день при локальной и региональной нагрузке составляют 40 000 и 20 000 соответственно.

Статическая нагрузка за рабочий день (смену) на рассмотренных рабочих местах сварочного цеха характеризуется общей статической нагрузкой при

удержании груза и приложении усилий 12 485 кгс·с при разрешенной общей статической нагрузке до 36 000 кгс·с.

Рабочее положение тела работника в позе стоя занимает 45 % рабочего времени, в неудобной рабочей позе работник проводит 30 % рабочего времени, в фиксированном положении – 15 %, остальные 20 % времени поза свободная. Допустимые значения процента рабочего времени, проводимого в рабочем положении стоя, – не более 60 % рабочего времени. В неудобной рабочей позе, согласно нормативному значению, разрешено находиться не более 25 % рабочего времени. Таким образом класс условий труда на всех рассмотренных рабочих местах классифицируется как 3.1 – вредный.

Количество наклонов корпуса тела работников более 30° за рабочий день (смену) составляет 25 при нормативном значении до 100 наклонов.

Таким образом, класс условий труда по фактору тяжести трудового процесса на рабочих местах сварочного цеха определяется как 3.1 – вредный.

Неионизирующие излучения

Источниками электромагнитного поля в сварочном цехе являются работающее оборудование и ручной инструмент. Предельно допустимые уровни электрического поля промышленной частоты 50 Гц на рабочем месте – 5 кВ/м. ПДУ магнитной индукции – 1000 мкТл. На рассматриваемых рабочих местах напряженность электрического поля составила 0,78–0,98 кВ/м, магнитная индукция – 1,6–3,2 мкТл.

Гигиенические нормативы допустимых уровней ультрафиолетового излучения устанавливаются с учетом спектрального состава излучения: длинноволновой (УФ-А) – 400–315 нм; средневолновой (УФ-В) – 315–280 нм; коротковолновой (УФ-С) – 280–200 нм.

При использовании специальной одежды и средств защиты лица и рук, не пропускающих излучение, допустимая интенсивность облучения в области УФ-В и УФ-С не должна превышать 1 Вт/м.

Таким образом, на рабочем месте сварщика при работе со сварочными аппаратами в спецодежде и при наличии СИЗ (маски сварщика) предельно

допустимые уровни интенсивности ультрафиолетового излучения составляют 1 Вт/м^2 при воздействии диапазонов излучения УФ-В + УФ-С.

Фактические измеренные уровни излучения УФ-В, УФ-С и УФ-В + УФ-С на рабочих местах сварочного цеха приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Фактические измеренные уровни ультрафиолетового диапазона на рабочих местах сварочного цеха

РМ	Интенсивность ультрафиолетового излучения УФ-В, Вт/м ²	Интенсивность ультрафиолетового излучения УФ-С, Вт/м ²	Интенсивность ультрафиолетового излучения УФ-В + УФ-С, Вт/м ²	Время, мин	Класс условий труда
ПДУ	-	-	1		
ЭГС1	0,8±0,1; 1,8±0,3	0,9±0,1; 1,7±0,2	3,5	240	3.1
ЭГС2	0,9±0,1; 1,8±0,2	0,9±0,2; 1,9±0,3	3,7	288	3.1
ЭГС РС 1	0,8±0,1; 1,8±0,3	0,9±0,1; 1,7±0,2	3,5	360	3.1
ЭГС РС 2	0,9±0,1; 1,8±0,2	0,9±0,2; 1,9±0,3	3,7	468	3.1
СС МК 1	0,8±0,1; 1,8±0,3	0,9±0,1; 1,7±0,2	3,5	180	3.1
СС МК 2	0,9±0,1; 1,8±0,2	0,9±0,2; 1,9±0,3	3,7	144	3.1
СИ	0,6±0,1; 1,2±0,2	0,5±0,1; 1,4±0,2	2,6	48	3.1

Примечание: ЭГС – электрогазосварщик; ЭГС РС – электросварщик ручной сварки, СС МК – слесарь по сборке металлоконструкций, СИ – слесарь-инструментальщик.

Таким образом, повышенные значения ультрафиолетового излучения, превышающие предельно допустимый уровень, определяют класс условий труда на данных рабочих местах как 3.1 – вредный.

Определение класса (и подкласса) условий труда

По результатам проведения экспериментальных исследований и исследований, осуществляемых в рамках специальной оценки условий труда, на рабочих местах сварочного цеха идентифицированы вредные и (или) опасные факторы производственной среды и трудового процесса, такие как присутствие вредных химических веществ в виде газов и пылей, шум, локальная вибрация, ультрафиолетовое излучение и электрическое поле промышленной частоты, а также тяжесть труда. Результаты оценки приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Значения опасных и вредных производственных факторов

Наименование производственного фактора, ед. изм.	PM	Допустимый уровень	Фактический уровень	Величина отклонения	Класс условий труда
1	2	3	4	5	6
Оксид углерода, мг/м ³	ЭГС, ЭГС _{РС} СС МК СИ	20	24,3–28,3 23,0–28,3 19,7	4,3–8,3 3–5,3 -	3,1 3,1 2
Диоксид азота, мг/м ³	ЭГС, ЭГС _{РС} СС МК СИ	5	2,2–2,3 2,1–2,3 1,9	- - -	2 2 2
Марганец, мг/м ³	ЭГС, ЭГС _{РС} СС МК СИ	0,6/0,2	0,07–0,08/0,05 0,06–0,08/0,05 0,06/0,05	- - -	2 2 2
Озон, мг/м ³	ЭГС, ЭГС _{РС} , СС МК, СИ	0,1	<0,1	-	2
Дижелезо триоксид, мг/м ³	ЭГС, ЭГС _{РС} , СС МК, СИ	-/6	3,5–4,1/<1	-	2
Эквивалентный уровень звука, дБА	ЭГС ЭГС _{РС} СС МК СИ	80	83,8–88,2	3,8–8,2	3,2
			89,8–94,0	9,8–14,0	3,2
			87,6–91,4	7,6–11,4	3,2
			79,7	-	2
Эквивалентный уровень виброскорости, дБ	ЭГС, ЭГС _{РС}	126	112,9	-	2
		126	115,1	-	2
		126	118,3	-	2
	СС МК	126	115,9	-	2
		126	118,1	-	2
		126	121,4	-	2
	СИ	126	114,2	-	2
		126	119,7	-	2
		126	122,4	-	2
Напряженность электрического поля, кВ/м	ЭГС, СИ, ЭГС РС, СС МК	5	0,78	-	2
Магнитная индукция, мкТл	ЭГС, СИ, ЭГС РС, СС МК	1000	1,6	-	2
Уровень интенсивности ультрафиолетового излучения, Вт/м ²	-	-	-	-	-
УФ-В	ЭГС ЭГС _{РС} СС МК СИ	-	0,8; 1,8 0,9; 1,8 0,9; 1,8 0,6; 1,2	-	-

Продолжение таблицы 2.8

1	2	3	4	5	6
УФ-С	ЭГС ЭГС _{РС} СС МК СИ	-	0,9;1,7 0,9;1,9 0,9;1,9 0,5; 1,4	-	-
УФ-В + УФ-С	ЭГС ЭГС _{РС} СС МК СИ	1	3.5 3.7 3.7 2.6	2.5 2.7 2.7 1.6	3.1 3.1 3.1 3.1
Тяжесть труда	ЭГС, ЭГС _{РС} , СС МК, СИ	-	-	-	3.1
Общая оценка условий труда	ЭГС ЭГС_{РС} СС МК СИ	-	-	-	3.2 3.2 3.2 3.1

Примечание: ЭГС – электрогазосварщик; ЭГС_{РС} – электросварщик ручной сварки; СС МК – слесарь по сборке металлоконструкций; СИ – слесарь-инструментальщик.

Результаты исследований показали, что воздействие ультрафиолетового излучения является одними из преобладающих факторов, определяющих класс и подкласс условий труда.

Таким образом, класс (подкласс) условий труда рабочих мест сварочного цеха для рабочих мест электрогазосварщика, электросварщика ручной сварки и слесаря по сборке металлоконструкций определяется как *вредный* – 3.2. Класс условий труда на рабочем месте слесаря-инструментальщика определяется как *вредный* – 3.1.

2.4 Результаты анализа уровней неионизирующего излучения оптического диапазона на рабочих местах и определение требований по его снижению

Полученные измерениями интенсивности ультрафиолетового излучения, а также допустимые нормы [34] приведены в таблице 2.9. Измерения проводились во время проведения сварочных работ.

Таблица 2.9 – Интенсивности ультрафиолетового излучения, полученные в ходе измерений, Вт/м²

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

Из анализа данных в таблице 2.9 можно сделать следующие выводы:

- интенсивность ультрафиолетового излучения превышает нормы на всех рабочих местах рассмотренного цеха;
- ультрафиолетовое излучение наблюдается во всех диапазонах ультрафиолетового излучения;
- интенсивность излучения в коротковолновом диапазоне выше, чем в средневолновом диапазоне (1,2–1,8 Вт/м²), и составляет от 1,4 до 1,9 Вт/м²;
- самая короткая длина волны УФ-излучения, на которую должно рассчитываться защитное средство, составляет 200 нм.

2.5 Выводы по главе 2

1. Анализ параметров микроклимата на рабочих местах литейного и термического цехов показал, что наибольший вклад в превышение предельно допустимых факторов по микроклимату на рабочих местах вносит тепловое излучение. Интенсивность теплового излучения зависит от высоты от пола – чем выше, тем выше уровень излучения. Превышение интенсивности теплового

излучения на рабочем месте огнеупорщика, занятого на ремонте ковшей в горячем состоянии, составляет 4,8 Вт/м² на высоте 0,5 м, 44,5 Вт/м² на высоте 1,0 м и 61,5 Вт/м² на высоте 1,5 м. Превышение интенсивности теплового излучения на рабочих местах сталевара электропечи и литейщика металлов и сплавов составляет 78,0 Вт/м² на высоте 0,5 м, 235,5 Вт/м² на высоте 1,0 м и 178,5 Вт/м² на высоте 1,5 м. Превышение интенсивности теплового излучения на рабочем месте сушильщика стержней, форм и формовочных материалов составляет 135,5 Вт/м² на высоте 0,5 м, 206,5 Вт/м² на высоте 1,0 м и 239,8 Вт/м² на высоте 1,5 м и является наибольшим среди рассмотренных рабочих мест литейного цеха. Наибольшее превышение интенсивности теплового излучения зафиксировано на рабочем месте термиста термического цеха на высоте 1,5 м и составляет 650,8 Вт/м², оно является наибольшим среди рабочих мест литейного и термического цехов.

2. На рабочих местах сварочного цеха зарегистрированы уровни интенсивности ультрафиолетового излучения, в 2,6–3,5 раза превышающие норму, т. е. на 1,6 и 2,5 Вт/м². Наибольшее превышение интенсивности УФ-излучения зарегистрировано на рабочих местах электрогазосварщика ручной сварки и слесаря по сборке металлоконструкций и составляет 2,7 Вт/м². На рабочих местах электрогазосварщика превышение интенсивности УФ-излучения составило 2,5 Вт/м². Наименьшее превышение УФ-излучения зарегистрировано на рабочем месте слесаря-инструментальщика, и оно составило 1,6 Вт/м². 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.

3. Исследованы условия труда на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов путем определения ОВПФ на предмет соответствия их нормативам. Всего рассмотрено 19 видов ОВПФ на рабочих местах литейного цеха, 14 из которых оказались в пределах нормативных значений, а 5 превышают предельно допустимые уровни: содержание формальдегида в воздухе РЗ, шум, индекс тепловой нагрузки, интенсивность теплового излучения, тяжесть труда. Установлено, что условия труда по вредности соответствует классу 3.2 для

рабочего места сушильщика стержней, форм и формовочных материалов и 3.3 для рабочих мест литейщика металлов и сплавов, сталевара электропечи и огнеупорщика, занятого на ремонте ковшей в горячем состоянии. На рабочих местах термистов термического цеха наибольшие превышения зафиксированы по параметрам микроклимата (3.2) и тяжести труда (3.1), итоговый класс условий труда 3.2. На рабочих местах сварочного цеха проанализировано 13 ОВПФ, 9 из которых оказались в пределах нормативных значений, а 4 превышают предельно допустимые уровни: содержание оксида углерода в воздухе РЗ, шум, интенсивность ультрафиолетового излучения и тяжесть труда. Установлен класс вредности условий труда 3.1 для рабочего места слесаря-инструментальщика и 3.2 для рабочих мест электрогазосварщика, электросварщика ручной сварки, слесаря по сборке металлоконструкций.

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ С ОКСИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ РАБОТНИКОВ ЛИТЕЙНЫХ, ТЕРМИЧЕСКИХ И СВАРОЧНЫХ ЦЕХОВ

Исходя из обзора литературы можно сделать вывод о том, что оксидные покрытия могут служить хорошей альтернативой специальным защитным устройствам. Использование оксидных пленок для экранирования излучений позволяет значительно снизить затраты материальных и энергетических ресурсов для изготовления экранов. Установлены перспективные составы оксидных пленок, защищающих от ИК- и УФ-излучения.

Для получения прозрачных экранов, защищающих от УФ и ИК-излучения, целесообразно использование растворных методов нанесения оксидных покрытий. Разрабатываемая автором настоящего исследования экстракционно-пиролитическая технология получения оксидных покрытий использует экстракты металлов для получения рабочих растворов, которые можно нанести на сложные и масштабные поверхности в атмосферных условиях. Метод обеспечивает такие преимущества, как хорошая однородность и чистота покрытий.

3.1 Методика получения защитных пленок экстракционно-пиролитическим методом

3.1.1 Описание экстракционно-пиролитического метода

Экстракционно-пиролитический метод используется для получения оксидных пленок [134, 135]. Для того чтобы составить более детальное описание сути данного метода, рассмотрим два составляющих его процесса.

Экстракция представляет собой выделение целевого элемента (иона металла) из неорганического раствора соли металла с помощью жидкого экстрагента. В процессе смешения исходного раствора и экстрагента происходит разделение на две фракции – органический экстракт и водную фазу исходного

раствора. Экстракт представляет собой ценную часть, которая содержит в себе извлекаемое вещество.

Чтобы получить рабочий раствор, остается отделить его от водной фазы. Полученный рабочий раствор используется для нанесения смачивающих пленок на подложку.

Исходными растворами являются 1М водные растворы неорганических солей металлов. В качестве экстрагентов используются карбоновые кислоты. Экстракция происходит по катионообменному механизму. В результате экстракции в органической фазе формируются карбоксилаты металлов.

Смешивание экстрактов металлов в правильных стехиометрических соотношениях обеспечивается уточнением концентрации каждого металла в экстрактах методом атомной абсорбции, и получаются растворы прекурсоров, которые обычно содержат желаемую стехиометрию тонкой пленки. Регулирование свойств окончательного раствора для покрытия во время синтеза осуществляют использованием добавок, таких как химические стабилизаторы.

Второй процесс данного метода – *пиролиз*, при котором происходит разложение органических веществ с выделением CO_2 в процессе этой реакции, и образование слоя оксида. Термин «пиролиз» обычно определяется как преобразование органических материалов в газы и твердые тела – косвенным нагревом при исключении воздуха или кислорода соответственно. Материал в реакционной камере нагревается до температуры от 400 до 800 °С. В случае применения растворной технологии используют окислительный пиролиз – разложение органической матрицы на воздухе или в атмосфере кислорода. При этом могут быть использованы многочисленные вариации условий термической обработки. Например, если желаемая толщина пленки не достигается в первом цикле нанесения покрытия, осаждение и последовательность термического процесса повторяют для получения более толстых пленок. По достижении желаемой толщины пленки прибегают к окончательной термообработке при еще более высокой температуре для инициирования кристаллизации, приводящей к улучшению микроструктуры или повышению плотности пленки. Если в процессе

пиролиза формируется гомогенная смесь оксидов, то для получения монофазного сложного оксида проводится отжиг – более высокотемпературная реакция. Чаще всего при пиролизе используются горячие плиты в сочетании с обычной печью. В особых случаях, например для термочувствительных подложек, возможно использование лазеров для отжига.

Преимущество метода заключается в возможности равномерного нанесения пленки на большие площади и объекты сложных форм. Наносить пленкообразующий раствор можно различными методами:

- накатывание – распределение раствора по поверхности стеклянной палочкой или кистью;

- окунание – погружение покрываемого образца в раствор, детали покрываются жидкой пленкой при извлечении их из пленкообразующего раствора. Данный метод наиболее универсален и экономичен при нанесении пленок на большие поверхности;

- полив – деталь неподвижна, а жидкость сливается;

- центрифугирование – распределение раствора по детали в процессе вращения подложки, обеспечивающее равномерное нанесение раствора на поверхность, применяется только для круглых подложек небольших размеров;

- пульверизация – распыление раствора на нагретую подложку, метод позволяет наносить покрытия на изделия различной формы и размеров.

На рисунке 3.1 представлена принципиальная схема получения пленок экстракционно-пиролитическим методом.

Первый этап – получение пленкообразующего раствора методом экстракции. Экстракты металлов получают посредством жидкофазной экстракции из неорганического раствора соответствующих солей ($ZnCl_2$, $ZrOCl$, $TiO(SO_4)$, $NiCl_2$, $CuCl_2$, YCl_3 , $In(NO_3)_3$, $SnCl_2$ и др.) в органическую фазу экстрагента – смеси нерастворимых в воде карбоновых кислот (каприловой, капроновой, энантовой, пеларгоновой и др.). Основные требования, предъявляемые к экстракционным системам, включают обеспечение эффективного разделения металлов.

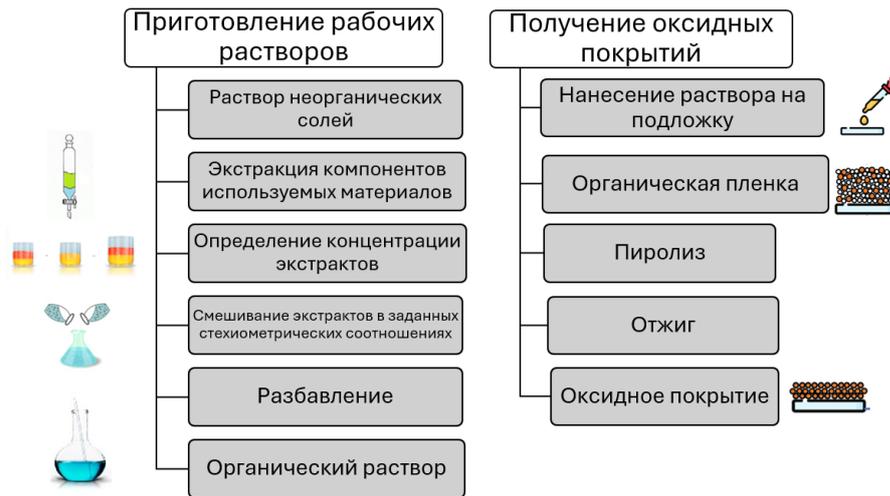


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема экстракционно-пиролитического метода получения прозрачных оксидных покрытий

Для активации процесса в делительную воронку, содержащую отдельные водную и органическую фазы, вводят раствор гидроксида натрия в расчетном количестве для получения необходимой концентрации целевого металла в экстракте.

Расчет компонентов для экстракции одномолярного раствора неорганической соли показан на примере цинка.

Молярная масса нитрата цинка: $MM_{Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O} = 189,40$ у.е.

1 моль = 189,40 г/л = 18,9 г/100 мл.

$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ + каприловая кислота + 4М NaOH.

Согласно закону сохранения масс $C_1 V_1 M_1 = C_2 V_2 M_2$.

$$0,5M \cdot 50 \text{ мл} \cdot 2 = 4M \cdot V_{NaOH} \cdot 1$$

$$V_{NaOH} = \frac{0,5 \cdot 50 \cdot 2}{4 \cdot 1} = 12,5 \text{ мл.}$$

Для получения одномолярного раствора нитрата цинка, потребуется 18,9 г нитрата цинка. В реакции участвуют 50 мл раствора нитрата цинка, 50 мл экстрагента – каприловой кислоты, и 12,5 мл NaOH.

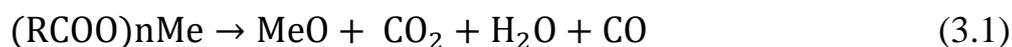
Второй этап – подготовка подложки: механическая очистка заранее подготовленной подложки и обезжиривание ее органическим растворителем – толуолом. Наиболее эффективный способ очистки подложек – очистка в

ультразвуковой ванне, однако такой метод требует наличия дополнительного оборудования.

Третий этап – нанесение пленкообразующего раствора. Раствор для покрытия можно наносить несколькими способами: погружением, вращением, пульверизацией, накатыванием. При этом метод распыления и появившийся недавно метод струйной печати – методы более сложные, позволяющие нанести покрытие с пониженным расходом материала. В методе накатывания капля раствора помещается в центр подложки, затем распределяется от центра к краям пластины, вдоль сторон, затем по диагонали от одного угла к противоположному углу.

Четвертый этап – влажная нанесенная пленка сушится, пиролизуется и отжигается для кристаллизации, дальнейшего уплотнения или манипуляции с микроструктурой. Преобразование в желаемую кристаллическую пленку производится посредством контролируемых термических процессов в диапазоне температур от 200 до 600 °С. Обычно для этого процесса используются горячие плиты в сочетании с обычной печью или печи быстрого термического отжига (RTA).

В процессе отжига пленки в печи выделяются органические карбоновые кислоты (каприловая (C₇H₁₅COOH), капроновая (C₅H₁₁COOH), энантовая (C₆H₁₃COOH), пеларгоновая (C₈H₁₇COOH)). Также при отжиге образуется остаток: карбоксилаты металлов (RCOOMe), которые разлагаются в печи до оксидов:



При этом парообразный избыток карбоновых кислот *RCOOH* составляет примерно 69 %, CO₂, H₂O, CO, R, R – CHO в сумме составляют 31 %.

Пиролиз органических материалов проводится в реакционной камере косвенным нагревом до температуры от 400 до 800 °С в воздушной атмосфере. В процессе пиролиза происходит разложение органической матрицы, которая пиролизуется в окислительной среде практически без остатка углерода.

Последующее нанесение слоя смачивающей пленки приводит к заполнению пор в оксидной пленке и формированию сплошного слоя. Процесс нанесения

пленки и пиролиза повторяли от 2 до 10 раз, в зависимости от вида покрытия. Данный способ получения слоев позволяет контролировать и менять толщину пленки, изменяя количество циклов нанесения покрытия. Когда желаемая толщина пленки достигнута, производится окончательная термообработка при еще более высокой температуре для инициирования кристаллизации, улучшения микроструктуры или для увеличения плотности пленки.

3.1.2 Описание лабораторного эксперимента по получению образцов покрытий

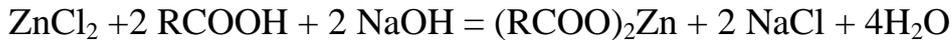
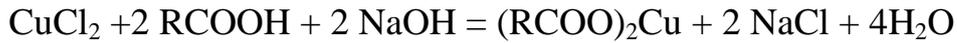
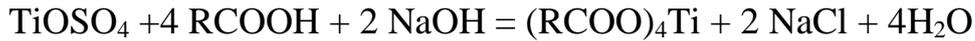
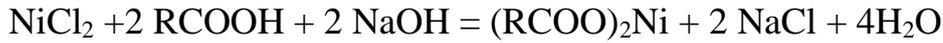
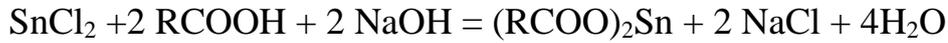
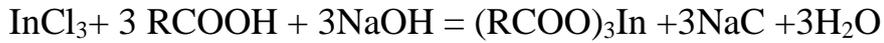
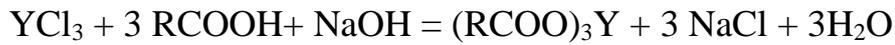
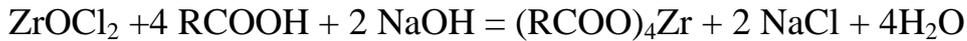
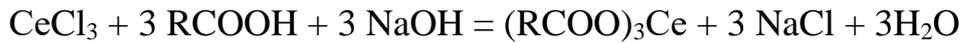
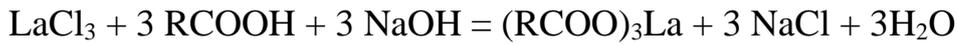
Проведена экстракция компонентов оксидов металлов, первым этапом которой является растворение исходных веществ (солей металлов) в дистиллированной воде с последующей фильтрацией. Проводим расчет количества щелочи NaOH по количеству исходного вещества для катализации процесса экстракции, результаты расчета приведены в таблице 3.1 при объеме исходного неорганического раствора соли 50 мл и объеме экстрагента 50 мл.

Таблица 3.1 – Количество щелочи NaOH по количеству исходного вещества

Исходное вещество	Молярная масса исходного вещества, г/моль	Объем NaOH, мл	Расчетная концентрация готового раствора, М
La ₂ (SO ₄) ₃ 8H ₂ O	709,9	11,5	0,3
Ce(SO ₄) ₂ H ₂ O	350,2	12,5	0,5
Zr(SO ₄) ₂ 4H ₂ O	355,4	7,5	0,3
YCl ₃ 6H ₂ O	303,3	3,8	0,1
InCl ₃ H ₂ O	239,2	5,6	0,15
SnSO ₄ H ₂ O	232,8	6,3	0,25
NiCl ₂ 6H ₂ O	237,6	12,5	0,5
TiCl ₄ H ₂ O	207,7	5,0	0,1
CuSO ₄ H ₂ O	177,6	7,5	0,3
Zn(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	189,4	9,25	0,37

В делительной воронке смешали водный раствор соли металла с экстрагентом. После разделения смеси на два компонента порционно добавляли раствор NaOH в воде и интенсивно перемешивали.

Для получения покрытий были получены следующие экстракты по уравнениям [136]:



После разделения смеси нижнюю часть, в которой остаются ионы в водной фазе, сливали. Верхнюю часть – экстракт металла – выделяли и подвергали фильтрованию для удаления твердых частиц экстракта.

Далее использовали жидкий экстракт. Раствор можно наносить как однокомпонентный, так и смешанный.

Концентрацию металлов в экстрактах уточняли методом атомной абсорбции и взвешиванием пиролизованного остатка. Экстракты с заданной концентрацией после уточнения содержания металлов смешивали в необходимых соотношениях: Zr:Y = 97:3, La:Zr = 1:1, La:Ce = 1:1 и In:Sn = 9:1. Для получения многокомпонентных растворов экстракты смешивали в требуемом соотношении, рассчитанном по закону сохранения масс: $C_1V_1M_1 = C_2V_2M_2$. Результаты расчета приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчет объемов экстрактов для приготовления многокомпонентных растворов

Состав карбоксилатов – концентрация, М	Соотношение компонентов	Объем растворов, мл
Zr – 0,5 М Y – 0,13 М	32,3:1	65 мл Zr + 1 мл Y
La – 0,31 М Zr – 0,5 М	1:1	1,63 мл La + 1,0 мл Zr
La – 0,31 М Ce – 0,5 М	1:1	1,63 мл La + 1,00 мл Ce
In – 0,23 М Sn – 0,15 М	9:1	13,5 мл In + 1,5 мл Sn

Для подготовки подложек (стекло, кварц, кремний) проводили механическую очистку от пыли, декапирование (удаление оксидных островков) 10 %-м раствором HCl, промывку водой и гидрофобизацию толуолом. Экстракты металлов наносились на подготовленные подложки с помощью стеклянной палочки методом накатывания.

Полученные экстракты – соли органических кислот $(RCOO)_2Zr$, $(RCOO)_3Y$, $(RCOO)_3La$, $(RCOO)_3In$, $(RCOO)_2Sn$, $(RCOO)_3Ce$ – хорошо смачивают стеклянные подложки и образуют самоорганизующиеся тонкие пленки.

Подложка с нанесенной смачивающей пленкой предварительно нагревалась над печью для удаления избытка раствора экстрагента и помещалась в печь на три минуты. В тонких пленках окислительный пиролиз происходит достаточно быстро при температурах 300–400 °С, согласно термогравиметрическим исследованиям определенных оксидов.

Схема установки для проведения отжига приведена на рисунке 3.2. Установка состоит из вертикальной печи, куда помещается подложка, закрепленная щипцами за один из краев вдоль короткой стороны. В печи находится термопара, подключенная к термостату, поддерживающему в печи заданную температуру. Напряжение на печь подается с лабораторного трансформатора.

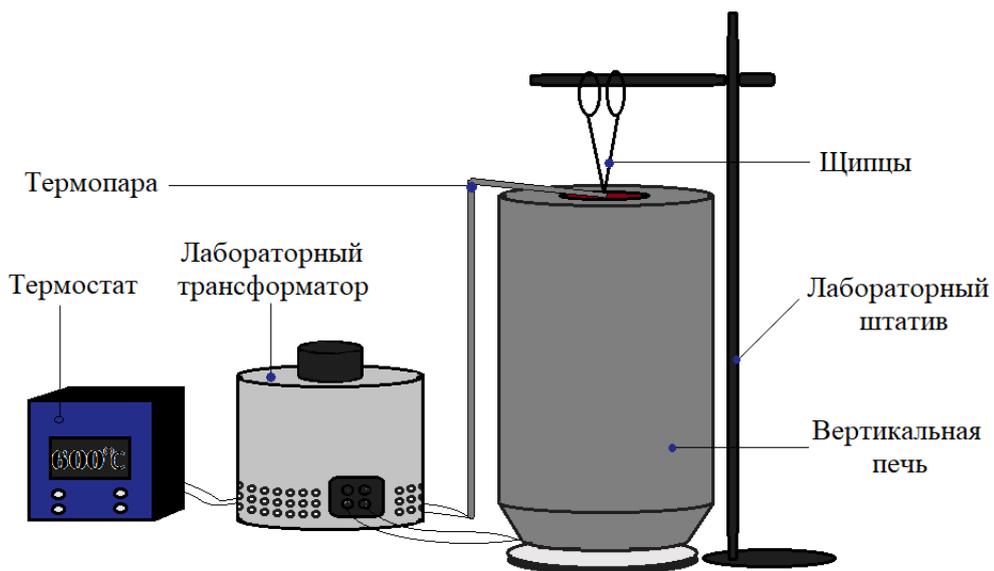


Рисунок 3.2 – Схема лабораторной установки получения оксидных пленок экстракционно-пиролитическим методом

Перед нанесением каждого следующего слоя подложка охлаждалась на воздухе.

3.1.3 Исследование термического разложения экстрактов

Термографический метод использован для определения температуры термического разложения экстрактов, необходимой для выбора оптимальных условий получения твердых продуктов. Исследование термического разложения экстрактов проводили методом дериватографии. Метод исследования реакций, происходящих в веществе при изменении температуры, заключается в построении и интерпретации кривых термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциально-термического анализа (ДТА) с помощью прибора «Дериватограф Q-1000» и аналитического программного обеспечения. Кривая изменения массы образца ТГ (зеленые кривые на рисунках 3.3–3.5) показывает, при каких температурах происходят процессы с потерей массы. Кривая ДТГ (синие кривые на рисунках 3.3–3.5) – первая производная от кривой ТГ, показывает скорость изменения массы в зависимости от температуры. Кривая ДТА (красные кривые на рисунках 3.3–3.5) показывает разницу температур между образцом и инертным эталоном. Она регистрирует тепловые эффекты процессов. Представляет собой линию с пиками, направленными как вверх (экзотермические процессы), так и вниз (эндотермические процессы). Позволяет отличить физические процессы (испарение, плавление, дегидратация – обычно эндотермические) от химических (разложение, окисление, кристаллизация – обычно экзотермические).

Кривые термического разложения карбоксилата олова показаны на рисунке 3.3. Потеря массы начинается от 130 °С в связи с удалением химически связанной воды при 160 °С, испарением избытка ВИК (230 °С). Скорость реакции возрастает с 270 °С, а при 330–400 °С происходит разложение карбоксилата с максимальной скоростью процесса, завершающееся при 450 °С.

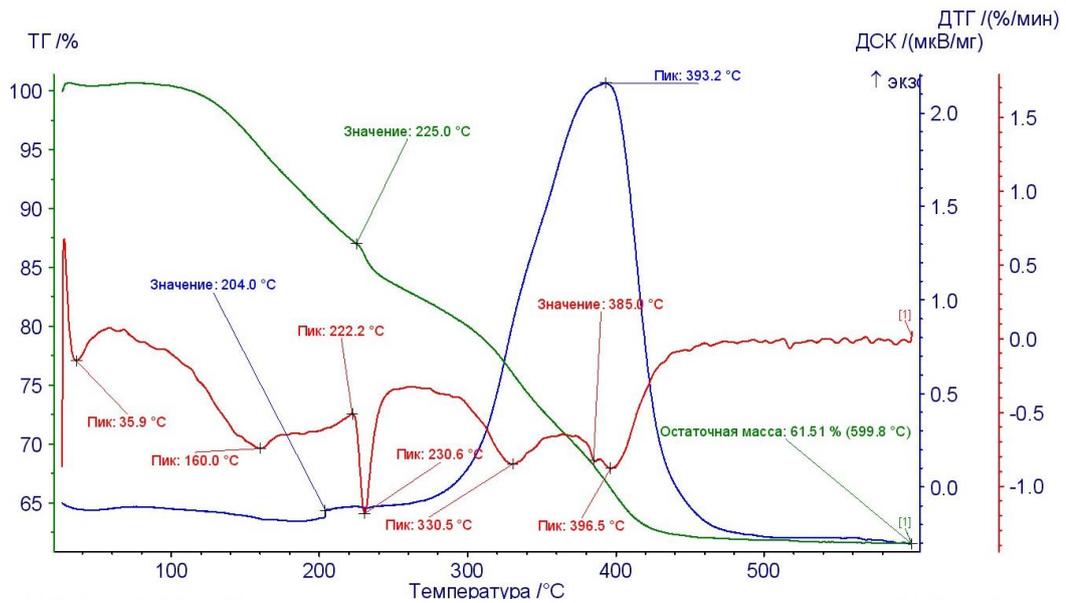


Рисунок 3.3 – Термограммы карбоксилата олова на воздухе

Кривые термического разложения карбоксилата индия показаны на рисунке 3.4. Разложение карбоксилата индия происходит в диапазоне 330–390 °C и завершается после 420 °C.

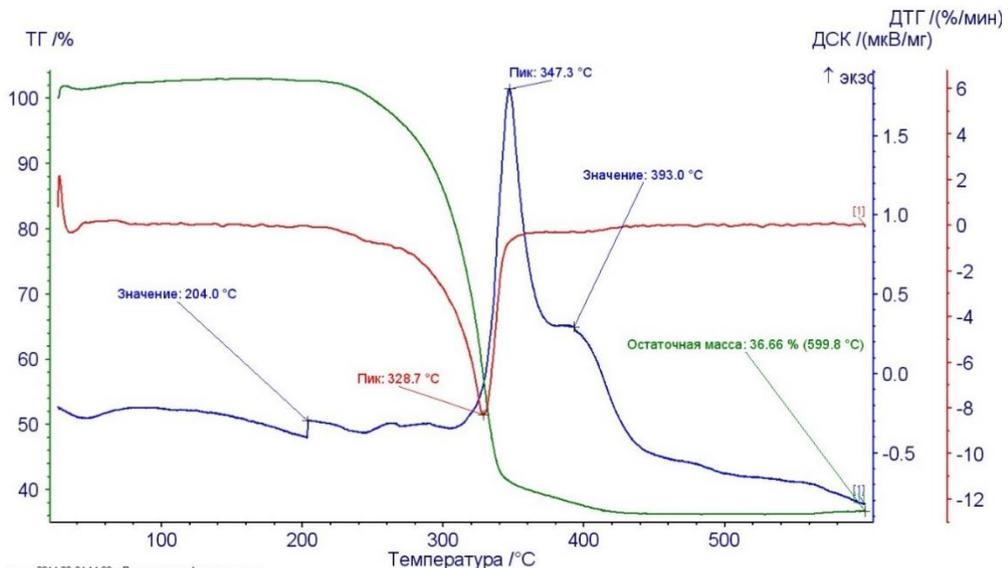


Рисунок 3.4 – Термограммы карбоксилата индия на воздухе

Термическое разложение карбоксилата Zr показано на рисунке 3.5. Разложение карбоксилата циркония происходит при температурах в диапазоне 400–490 °C и полностью завершается после 500 °C.

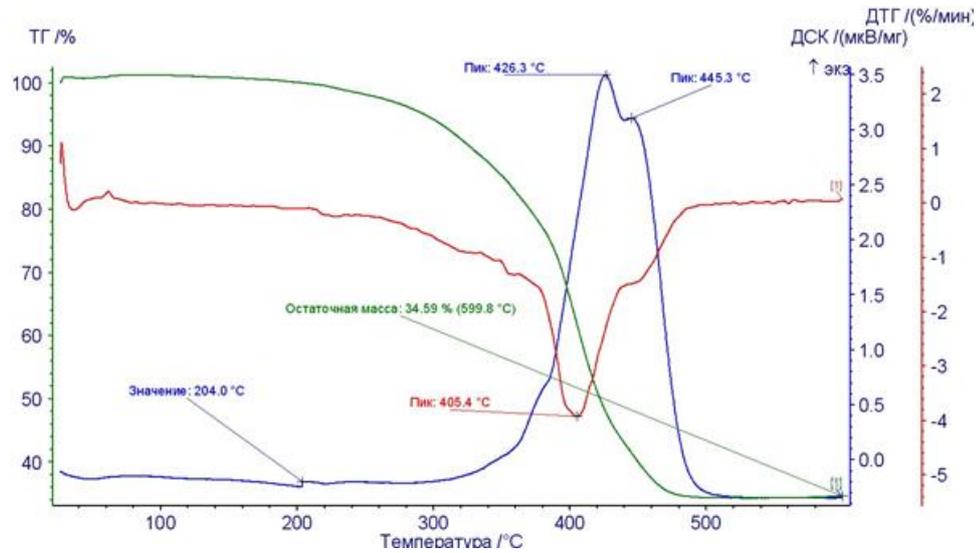


Рисунок 3.5 – Термограммы карбоксилата циркония на воздухе

Таким образом, разложение карбоксилатов металлов происходит практически одновременно в температурном интервале 300–500 °С.

3.2 Исследования и характеристики полученных материалов

3.2.1 Оценка толщины пленок

Оценка толщины пленок осуществлялась по расклинивающему давлению [131]. Расклинивающее давление Π смачивающей пленки компенсирует атмосферное давление $P_{\text{атм}}$ и давление самой смачивающей пленки $P(h)$:

$$\Pi = P_{\text{атм}} + P(h). \quad (3.2)$$

Давление столба смачивающей пленки $P(h)$ зависит от ее толщины по уравнению гидростатики:

$$P(h) = h_{\text{см}} \cdot \rho \cdot g, \quad (3.3)$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Расклинивающее давление Π зависит от величины поверхностного натяжения G согласно следующей зависимости:

$$\Pi = 2G/H, \quad (3.4)$$

где $H = h_{\text{см}}$.

Подставив (3.1) и (3.2) в (3.3), получим:

$$2G/h_{\text{см}} = P_{\text{атм}} + h_{\text{см}} \cdot \rho \cdot g. \quad (3.5)$$

Отсюда толщина смачивающей пленки $h_{\text{см}}$ равна:

$$h_{\text{см}}^2 \cdot \rho \cdot g + h_{\text{см}} \cdot P_{\text{атм}} - 2G = 0, \quad (3.6)$$

$$h_{\text{см}} = (P_{\text{атм}} - (P_{\text{атм}}^2 - 8 \cdot \rho \cdot g \cdot G)^{1/2}) / 2 \cdot \rho \cdot g. \quad (3.7)$$

Для определения поверхностного натяжения методом «капиллярного поднятия» капилляр диаметром 0,2–0,3 мм погружали в стакан с раствором так, чтобы кончик капилляра касался поверхности. После установления равновесия вынимали капилляр и измеряли высоту столба жидкости в нем.

Измерения проводили несколько раз и находили среднее значение высоты подъема жидкости. Поверхностное натяжение исследуемых жидкостей рассчитывалось по уравнению:

$$G = G_0 \cdot h \cdot \rho / (h_0 \cdot \rho_0), \quad (3.8)$$

где ρ_0 и ρ – плотности воды и исследуемого раствора; G_0 и G – поверхностное натяжение воды и исследуемого раствора; h_0 и h – высота капиллярного поднятия воды и раствора. Температура в момент эксперимента 18 °С, $G_0 = 72,96$ – 102 Н/м. Плотность исследуемых растворов определялась экспериментально. Подставляя полученные экспериментальные значения ρ и G в уравнение (3.6), находили толщину смачивающей органической пленки $h_{\text{см}}$.

Используя данные термогравиметрии, оценивали толщину оксидных пленок:

$$h_{\text{окс.}} = h_{\text{см}} \cdot \Delta m / 100 \%, \quad (3.9)$$

где $h_{\text{окс.}}$ – толщина оксидной пленки, Δm – доля (вес. %) оксидов после пиролиза карбоксилатов.

Данный метод позволяет только оценить толщину смачивающей и твердой пленок, поскольку при переходе от жидкого к твердому состоянию объем изменяется непропорционально массе.

В таблице 3.3 приведены данные оценки толщины органических пленок карбоксилатов металлов. Экспериментально определены поверхностное натяжение и плотность растворов, используемых для получения пленок.

Таблица 3.3 – Расклинивающее давление и толщина смачивающих пленок карбоксилатов металлов

Состав карбоксилатов	Высота капиллярного слоя, см	Плотность раствора, г/см ³	Поверхностное натяжение Н/м 10 ⁻³	Расклинивающее давление	Толщина смачивающей пленки, нм
Олова	2,10	0,9622	45,59	100,20	91
Индия	1,90	0,8700	37,29	100,78	74
Цинка	1,83	0,9372	38,70	100,52	77

После пиролиза толщина пленок уменьшается в 4–5 раз. Толщина отожженной SnO₂ = 26,4 нм; In₂O₃ = 19,2 нм; ZnO = 21,8 нм.

3.2.2 Исследование микроструктуры покрытий

Для исследования микроструктуры пленок использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ), осуществляемая на атомно-силовом микроскопе Veeco Scanning Probe Multimode Microscope. Благодаря исследованию морфологии поверхности можно сделать выводы о размере зерна, шероховатости и сплошности пленки, что влияет на оптические свойства покрытий.

Обработка изображений – результатов АСМ проводилась в программе ImageJ в пакете FracLac, позволяющем рассчитать характеристики поверхности пленки: лакуарность (мера неоднородности заполнения объектом пространства) и фрактальную размерность. Фрактальная размерность позволяет оценить размеры объектов сложных форм, к которым относятся зерна микроструктуры пленки, а лакуарность – степень и равномерность заполнения ими поверхности.

Оксид циркония, легированный иттрием (YSZ), по результатам исследования научных источников, проведенного в предыдущей главе, обладает теплозащитными свойствами. Результаты исследования микроструктуры пленок

YSZ, отожженных при температуре 500, 600, 700 и 800 °С, приведены на рисунке 3.6 [137].

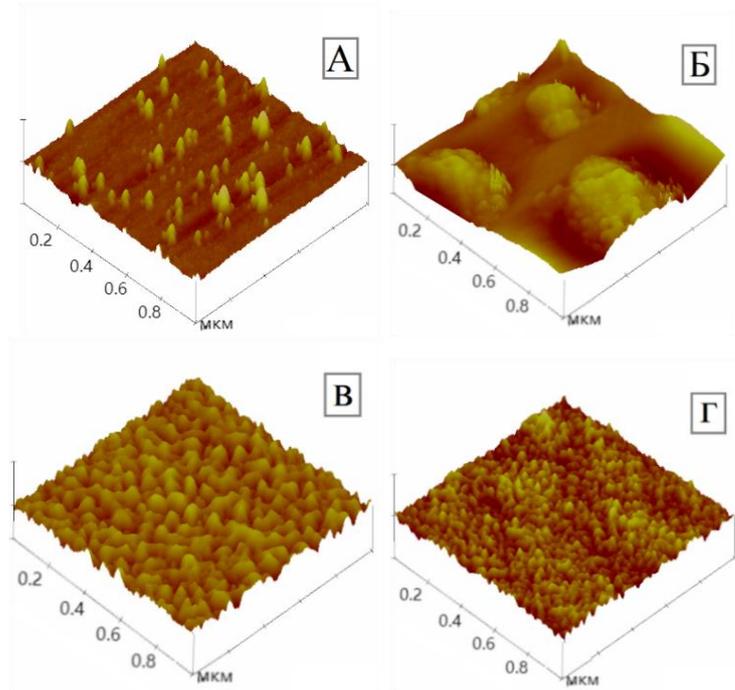


Рисунок 3.6 – АСМ-изображения пленок YSZ, 150 нм, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В), 800 °С (Г)

Полученные результаты показывают трансформацию структуры покрытия в процессе отжига. После отжига при 500 °С наблюдается конусообразная форма зерен, при этом ширина зерна составляет 20–30 нм, а высота приближается к 50 нм (рисунок 3.6, А). Укрупнение зерен происходит по обычному тонкопленочному механизму – нуклеации и роста зародышей при термообработке за счет подвижности атомов вещества покрытия.

Отжиг при более высокой температуре – 600 °С, делает структуру крупнозернистой, при этом размер зерна достигает размеров 400 нм, а для отдельных зерен – до 1 мкм. Формируемые зерна представляют собой агрегаты частиц округлой формы (рисунок 3.6, Б). Увеличение размера частиц с ростом температуры отжига, вероятно, объясняется повышенной атомной подвижностью и снижением поверхностной и межзеренной энергии. Эти морфологические изменения оказывают значительное влияние на оптические и электронные свойства композитных пленок, тем самым определяя их пригодность для различных

технологических сфер применения. Наблюдаемая корреляция между температурой осаждения и морфологией пленки подчеркивает критическую важность оптимизации условий синтеза для достижения желаемых характеристик пленки.

После отжига при температуре 700 °С покрытие имеет гладкую поверхность – малое значение шкалы высот (5 нм) на участке в 1 мкм свидетельствует о плотной однородной структуре без крупных дефектов типа трещин или пор (рисунок 3.6, В). Гладкая структура часто является желательным свойством для оптических, защитных или электронных применений. Покрытие состоит из округлых зерен, однородных по размеру и форме. Размер зерна составляет около 10 нм.

Отжиг при температуре 800 °С не привел к значительным изменениям в микроструктуре пленок. Шероховатость сохранилась на уровне, характерном для очень гладких и плотных покрытий (рисунок 3.6, Г). На основе идентичных параметров сканирования и шкалы высот можно заключить, что средний размер зерна также не претерпел значительных изменений и остался в нанометровом диапазоне.

Шероховатость пленки, отожженной при 500 °С, доходит до 16,5 нм и начинает снижаться после более высокотемпературного отжига – при 600 °С – до 7 нм, при 700 °С – до 5 нм, при 800 °С – до 4 нм (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Шероховатость и морфология покрытия YSZ в зависимости от температуры отжига

$T_{отж}, ^\circ\text{C}$	$R_a, \text{нм}$	$R_z, \text{нм}$	$R_{max}, \text{нм}$	Фрактальная размерность	Лакунарность
500	0,936	3,608	16,509	1,215	0,608
600	2,947	8,373	6,813	1,529	0,734
700	1,199	3,559	4,894	1,701	0,381
800	0,592	2,191	3,716	1,743	0,379

Были исследованы фрактальная размерность и лакунарность, которые характеризуют сплошность и однородность покрытия. На рисунке 3.7 приведена зависимость фрактальной размерности и лакунарности от температуры отжига. Чем выше фрактальная размерность (D), тем больше удельная площадь поверхности, также высокий показатель D может улучшить адгезию пленки к

подложке. Фрактальная структура сильно рассеивает свет, что влияет на пропускание, отражение и поглощение пленки. Лакуарность (Λ), количественно характеризующая пространственную неоднородность системы, снижается с увеличением однородности покрытия. Когда $\Lambda > 1$, структура неоднородная, как, например, в пленке, состоящей из плотных агломератов оксида, разделенных крупными трещинами.

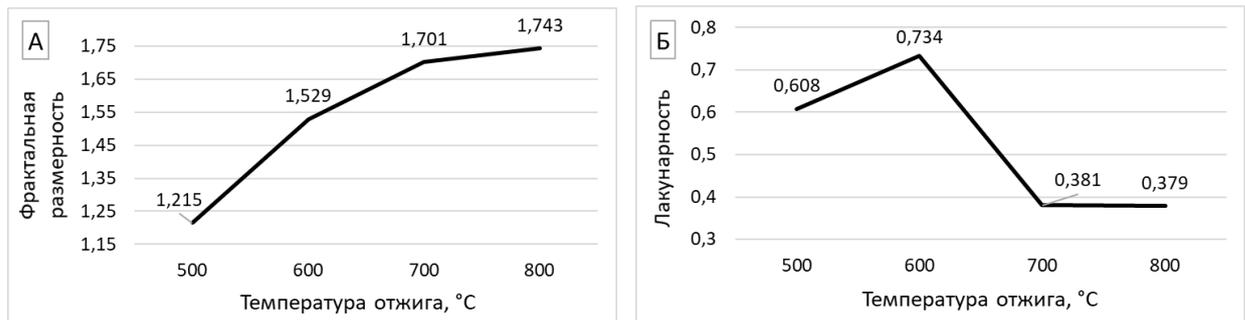


Рисунок 3.7 – Зависимость фрактальной размерности (А) и лакуарности (Б) пленки YSZ от температуры отжига покрытия

Для пленки после отжига при 500 °C фрактальная размерность составила 1,21, лакуарность – 0,61, при 600 °C – 1,53 и 0,73 соответственно, при 700 °C – 1,70 и 0,38 соответственно, после отжига при 800 °C значения D и Λ изменились незначительно – 1,74 и 0,38, что указывает на повышение сплошности и однородности покрытий при наиболее высоких температурах обработки и может быть обусловлено рекристаллизацией, уменьшением размера зерна и уплотнением структуры пленки. Дальнейшее повышение температуры не вызывает заметных изменений в микроструктуре пленок.

Оптические свойства оксидных пленок на основе индия-олова (ИТО) зависят от микроструктуры и размера зерен в пленке. Оксид индия-олова сегодня имеет широкое применение, в связи с чем о нем есть много сведений в научной литературе, в том числе в термозащитных применениях и в области защиты от УФ-диапазона излучения [138]. Исследования микроструктуры пленок ИТО толщиной 300 и 450 нм, отожженных при 450, 500, 550 и 600 °C показали изменение морфологии покрытий – шероховатости, размера и формы зерен ИТО покрытия в

зависимости от температуры отжига. Исследуемые микроструктуры пленок приведены на рисунках 3.8–3.9.

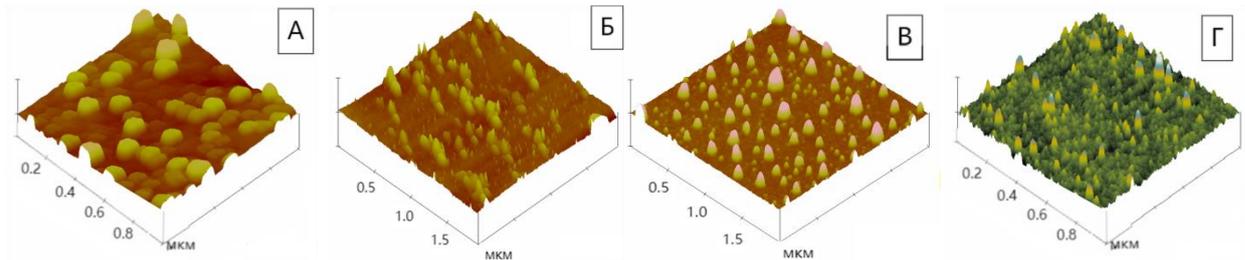


Рисунок 3.8 – АСМ-изображения пленок ITO, 300 нм, отожженных при 450 °С (А), 500 °С (Б), 550 °С (В), 600 °С (Г)

В ITO пленке толщиной 300 нм, отожженной при 450 °С (рисунок 3.8, А), наблюдается начальная стадия роста зерна, шероховатость низкая – до 5,5 нм, недостаточный размер зерна и низкая шероховатость означают слабое рассеяние. После отжига покрытия при 500 °С (рисунок 3.8, Б) происходит первичная рекристаллизация: мелкие нестабильные зерна интенсивно растут, при этом формируется неравномерная структура с большими пустотами (лакунами) между зернами. Крупные зерна (100–400 нм) и наибольшая шероховатость (до 43,7 нм) должны способствовать максимальному рассеянию ИК-излучения. После увеличения температуры отжига до 550 °С (рисунок 3.8, В) процесс роста зерен продолжается, но система начинает стремиться к минимизации поверхностной энергии, структура сглаживается, при этом зерна остаются крупными, начинается процесс уплотнения. Ожидается улучшение пропускания по сравнению с 500 °С, в то же время оно должно остаться низким, так как размер зерна все еще сравним с длиной волны ИК-излучения, а шероховатость высока – до 26,9 нм. После отжига до 600 °С (рисунок 3.8, Г) происходит полная кристаллизация, структура мелкозернистая и гладкая с плотной структурой. Шероховатость снижается до 3,9 нм, гладкая и плотная структура минимизирует все виды рассеяния, можно сделать вывод о том, что прозрачность покрытия повысится.

Сравнение микроструктур пленок ITO приведено на рисунке 3.9.

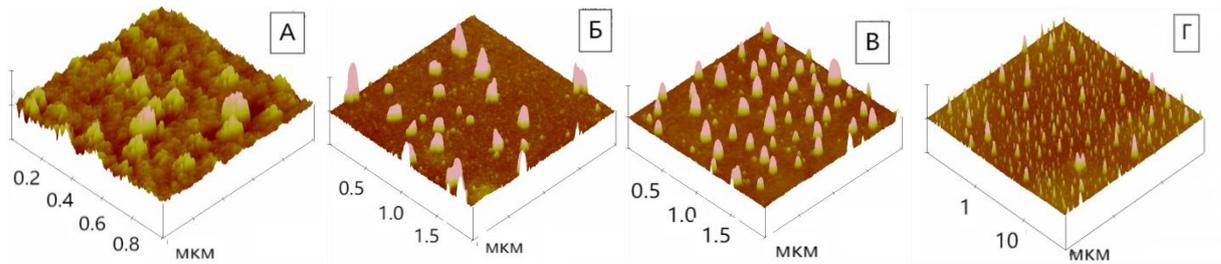


Рисунок 3.9 – АСМ-изображения пленок ИТО, 450 нм, отожженных при 450 °С (А), 500 °С (Б), 550 °С (В), 600 °С (Г)

Более толстая пленка (450 нм), отожженная при 450 °С, имеет гладкую (шероховатость до 3,9 нм), плотную, мелкозернистую структуру. При отжиге покрытия до 500 °С происходит первичная рекристаллизация. Исходная гладкая аморфная пленка превращается в грубую крупнозернистую структуру. Шероховатость возрастает до 49 нм. При повышении температуры отжига до 550 °С происходит стабилизация и рост зерен, при этом шероховатость снижается до 30 нм. После отжига при температуре 600 °С происходит вторичная рекристаллизация. Шероховатость достигает 110 нм, что свидетельствует об очень глубоких границах между зернами. Пленка теряет сплошность в классическом понимании и становится набором отдельных крупных кристаллитов – для анализа такой структуры пришлось увеличить размер скана в 7 раз (до 14,27 мкм). Исходя из анализа микроструктуры покрытий можно ожидать наибольшее снижение прозрачности в ИК-диапазоне для пленок, полученных при 500 и 600 °С.

Увеличение толщины покрытия за счет повышения количества наносимых слоев экстракта приводит к снижению высоты зерен, но увеличению их диаметра. Более толстая пленка (450 нм) проявляет большую склонность к росту зерен при отжиге, чем тонкая (300 нм).

Оценка шероховатости полученных пленок приведена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Шероховатость покрытий ИТО в зависимости от температуры отжига и толщины пленки

Параметры шероховатости	Толщина покрытия, нм							
	300 нм				450 нм			
	Температура отжига, °С							
	450	500	550	600	450	500	550	600
R_a , нм	1,272	8,209	7,185	1,001	0,817	9,085	5,347	24,851
R_z , нм	5,465	24,902	26,987	3,922	1,786	49,113	18,419	108,52
R_{max} , нм	5,465	43,728	26,987	3,922	3,984	49,113	18,601	109,08

Наибольшей шероховатостью обладают пленки толщиной 300 и 450 нм, отожженные при 500 °С (45–50 нм), а также пленки толщиной 450 нм, отожженные при 600 °С, (до 109 нм).

Были исследованы фрактальный размер и лакуарность, которые характеризуют сплошность покрытия, результаты приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры микроструктуры покрытий ИТО в зависимости от температуры отжига и толщины пленки

Параметры микроструктуры	Толщина покрытия, нм							
	300 нм				450 нм			
	Температура отжига, °С							
	450	500	550	600	450	500	550	600
Фрактальная размерность	1,7177	1,5961	1,4111	1,7162	1,674	1,6487	1,764	1,7466
Лакуарность	0,6882	0,6713	0,4244	0,37	0,4815	0,3249	0,2928	0,5423

Из данных таблицы 3.6 видно, что все покрытия обладают хорошей сплошностью, о чем свидетельствует низкое значение лакуарности, не превышающее единицы. Фрактальный размер меняется в зависимости количества слоев и температуры отжига от 1,4 до 1,8. Наибольшим фрактальным размером обладают пленки толщиной 300 нм отожженные при 450 и 600 °С, у пленок толщиной 450 нм большая фрактальная размерность наблюдается после отжига при 550 и 600 °С.

Зависимость фрактальной размерности, лакуарности и шероховатости пленок ИТО толщиной 300 и 450 нм от температуры отжига приведена на рисунке 3.10.

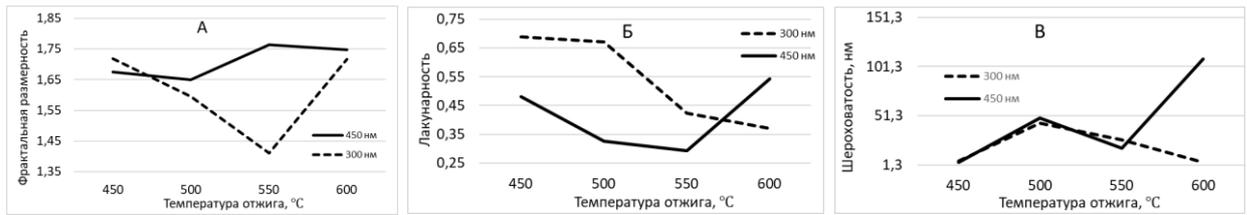


Рисунок 3.10 – Зависимость фрактальной размерности (А); лакуарности (Б) и шероховатости (В) пленок ИТО от температуры отжига

Для пленок толщиной 300 нм наибольшая фрактальная размерность наблюдается при температурах отжига 450 и 600 °С, лакуарность снижается с повышением температуры отжига, наибольшая шероховатость наблюдается после отжига при 500 °С. Для более толстых пленок толщиной 450 нм фрактальная размерность возрастает с ростом температуры отжига, наибольшая лакуарность наблюдается при температурах отжига 450 и 600 °С, наибольшая шероховатость наблюдается при 500 и 600 °С.

Оксид титана является распространенным материалом для защиты от УФ-диапазона излучения, используемым как в виде частиц, так и покрытий. Результаты исследования микроструктуры пленок оксида титана с концентрацией 0,143 и 0,215 мг/мл, отожженных при температуре 550, 600 и 650 °С, приведены на рисунках 3.11–3.12.

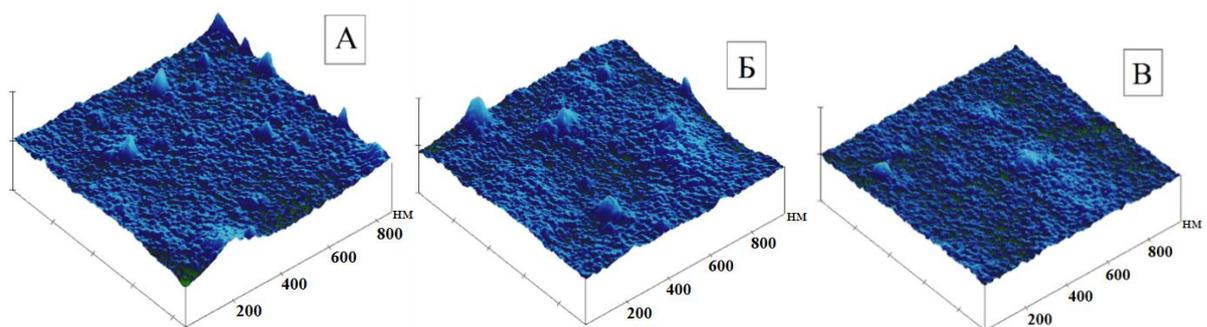


Рисунок 3.11 – АСМ-изображения пленок TiO_2 , 300 нм с концентрацией 0,143 мг/мл, отожженных при 550 °С (А), 600 °С (Б), 650 °С (В)

Микроструктура пленок TiO_2 практически не меняется с ростом температуры отжига от 550 до 650 °С. Шкала высот (Z) остается постоянной: это указывает на то, что шероховатость пленки не увеличивается. На основе одинаковой шкалы

высот и схожего масштаба сканирования можно заключить, что средний размер зерна также не претерпевает значительных изменений и остается в одном диапазоне. Несмотря на стабильность морфологии, при таком росте температуры могут происходить изменения, не всегда заметные в топографии: фазовая перекристаллизация (диоксид титана мог перейти из аморфной фазы или анатаза в рутил, что кардинально меняет оптические свойства, но не обязательно сильно влияет на рельеф); уплотнение границ зерен (границы между зернами могут становиться более четкими, а сама пленка – более плотной, без изменения среднего размера зерна).

Размер зерен во всех трех пленках (~80–200 нм) сравним или превышает длину волны УФ-излучения (10–400 нм). Это означает, что рассеяние будет сильным во всех случаях. Поскольку шероховатость и размер зерен не меняются, вклад рассеяния в потери пропускания будет примерно одинаковым для всех трех пленок и достаточно высоким.

TiO₂ является полупроводником, и его прозрачность в УФ-области начинается на длине волны, соответствующей его запрещенной зоне: для анатаза $E_g \approx 3,2$ эВ (поглощает излучение с $\lambda < \sim 387$ нм (ближний УФ)), для рутила $E_g \approx 3,0$ эВ (поглощает свет с $\lambda < \sim 413$ нм (также ближний УФ)).

Можно предположить, что с ростом температуры отжига происходит фазовый переход анатаза в рутил. Рутил имеет более узкую запрещенную зону и, следовательно, поглощает в более длинноволновой части спектра.

Микроструктуры покрытий диоксида титана с большей концентрацией в зависимости от температуры отжига приведены на рисунке 3.12.

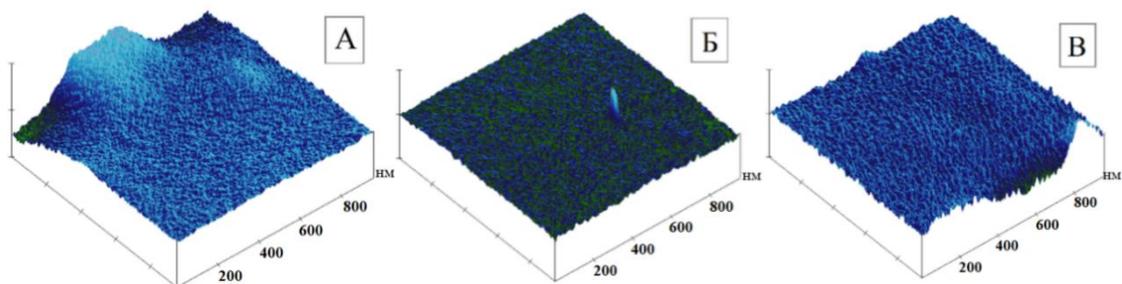


Рисунок 3.12 – АСМ-изображения пленок TiO₂, 300 нм с концентрацией 0,215 мг/мл, отожженных при 550 °С (А), 600 °С (Б), 650 °С (В)

Шероховатость и размер зерен не меняются и при изменении концентрации раствора. Размер зерен такой же и оптимален для рассеяния жесткого УФ-излучения. Пленка из более концентрированного раствора (0,215 мг/мл) при той же толщине (300 нм) может быть более плотной (иметь меньше нанопор и дефектов), так как исходного материала больше для формирования того же объема. Отсюда вытекает лучшее поглощение из-за большего количества вещества на пути излучения и меньшее пропускание на дефектах и порах. Как и в предыдущей серии, с ростом температуры ожидается фазовый переход анатаза в рутил. Рутил поглощает в более широкой спектральной области (включая ближний УФ-А), поэтому пленки, отожженные при 600–650 °С, будут лучше поглощать ультрафиолетовое излучение.

Характеристики микроструктуры пленок диоксида титана толщиной 300 нм с концентрацией 0,143 и 0,215 мг/мл, отожженных при температуре 550, 600 и 650 °С, приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Параметры микроструктуры пленок TiO_2 толщиной 300 нм в зависимости от концентрации исходного раствора и температуры отжига

Параметры микроструктуры	Концентрация, мг/мл					
	0,143			0,215		
	Температура отжига, °С					
	550	600	650	550	600	650
Фрактальная размерность	1,734	1,6457	1,7257	1,7485	1,7651	1,7972
Лакунарность	0,4103	0,7275	0,4978	0,3848	0,3847	0,4942
R_a , нм	0,183	0,027	0,280	0,251	0,172	0,435
R_z , нм	0,720	0,357	1,472	1,033	0,712	1,368
R_{max} , нм	0,720	0,357	1,472	1,033	0,712	1,368

Фрактальная размерность и лакунарность меняются незначительно, что подтверждает предыдущую оценку микроструктуры пленок. Лакунарность пленок незначительно снижается с увеличением концентрации раствора, что также демонстрирует увеличение плотности пленок. Наглядно зависимости представлены на рисунке 3.13.

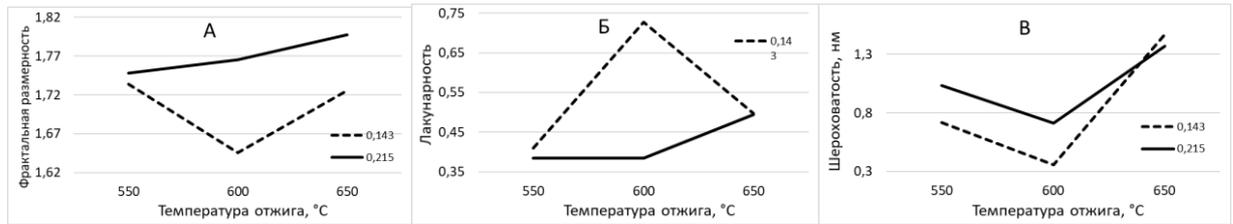


Рисунок 3.13 – Графики зависимости: фрактальной размерности (А), лакуарности (Б) и шероховатости (В) пленок TiO_2 от концентрации и температуры отжига

С ростом концентрации и температуры отжига фрактальная размерность и шероховатость увеличиваются. Лакуарность ниже для пленок с большей концентрацией и полученных при меньших температурах.

Аналогично диоксиду титана, оксид никеля обладает защитными свойствами от ультрафиолетового излучения. На рисунке 3.14 представлены АСМ-изображения тонких пленок оксида никеля, нанесенных из органических экстрактов с различными концентрациями (6, 3 и 2 %) толщиной 150 нм на стеклянные подложки, каждый слой подвергался пиролизу при температуре 450 °C в течение 3 минут. Тонкие пленки обладают различной морфологией: пирамидообразные зерна различной величины в пленках, полученных из 6 % раствора, меняются на вытянутые вдоль плоскости подложки цилиндрические зерна в пленках, полученных из разбавленных растворов экстрактов 3 %. Наименее шероховатая поверхность наблюдается у NiO тонкой пленки, полученной из прекурсора с концентрацией 2 %.

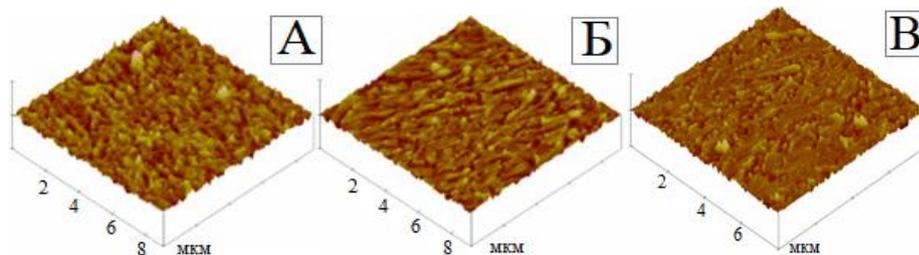


Рисунок 3.14 – АСМ-изображения пленок NiO , полученных из раствора с концентрацией: 6 % (А); 3 % (Б); 2 % (В)

Пленки из 6 %-го раствора характеризуются крупными пирамидообразными зернами, которые создают значительную шероховатость. Такая морфология приводит к интенсивному рассеянию УФ-излучения на неровностях поверхности и внутренних границах раздела. Это существенно снижает общее пропускание пленки в УФ-области, делая ее малопрозрачной. В пленке из 3 %-го раствора формируются вытянутые цилиндрические зерна, что указывает на упорядочение структуры. Несмотря на возможное уменьшение шероховатости по сравнению с 6 %-м образцом, протяженные границы между цилиндрическими зернами все еще могут служить центрами рассеяния, однако общая оптическая однородность пленки повышается. Пленка из 2 %-го раствора отличается наименьшей шероховатостью поверхности. Гладкая поверхность минимизирует потери на рассеяние, что позволяет излучению проходить через пленку с минимальным ослаблением. Более однородная и плотная микроструктура, характерная для пленок из разбавленных растворов, обеспечивает меньшее светорассеяние и, как следствие, наивысшую прозрачность в УФ-диапазоне по сравнению с образцами из более концентрированных растворов.

Результаты исследования микроструктуры пленок оксида никеля, отожженных при температурах 450 и 600 °С, приведены на рисунке 3.15.

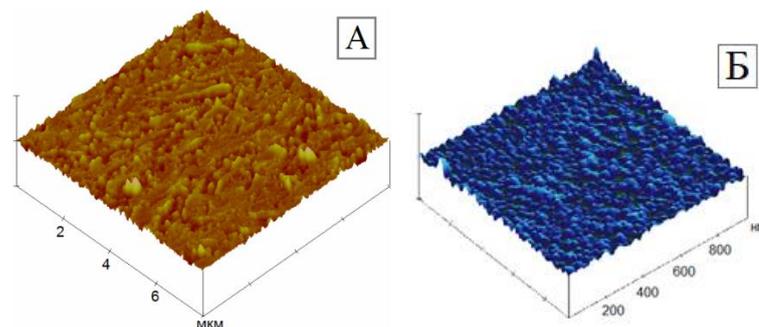


Рисунок 3.15 – АСМ-изображение пленок NiO отожженных при температурах 450 °С (А) и 600 °С (Б)

Полученная пленка NiO толщиной порядка 150 нм, отожженная при 450 °С, имеет сплошную поверхность из мелких зерен, соединенных в вытянутые вдоль плоскости подложки агрегаты. Шероховатость поверхности составила 5–30 нм,

фрактальная размерность – 1,77, лакунарность – 0,35. При температуре отжига 450 °С размеры частиц составляют в среднем 130 нм. Относительно крупный размер зерен и повышенная шероховатость приводят к сильному рассеянию УФ-излучения, поскольку размер частиц сравним с длиной волны УФ-света (200–400 нм). Высокие значения фрактальной размерности и лакунарности указывают на развитую и неоднородную поверхность, что дополнительно увеличивает потери на рассеяние и делает пленку малопрозрачной в УФ-диапазоне.

При повышении температуры отжига до 600 °С происходит рекристаллизация, обусловленная внутренними напряжениями в пленке и средний размер частиц снижается до 35 нм. Шероховатость пленки после отжига составляет около 5 нм, фрактальная размерность – 1,72, лакунарность – 0,28. Изменение распределения частиц по размерам после более высокотемпературного отжига могло произойти в результате растрескивания кристаллитов из-за выхода гидроксильных групп (-ОН) из решетки и уплотнения структуры. Все это можно рассматривать в рамках рекристаллизации.

Уменьшение размера зерен до 35 нм и снижение шероховатости до 5 нм уменьшают рассеяние света. Снижение фрактальной размерности свидетельствует об упрощении и сглаживании поверхности, а уменьшение лакунарности – о повышении структурной однородности и уплотнении пленки. В совокупности эти факторы означают, что основным механизмом взаимодействия с излучением становится не рассеяние, а поглощение. Поскольку NiO является полупроводником с шириной запрещенной зоны ~3,6–4,0 эВ, он эффективно поглощает УФ-излучение. Таким образом, данная пленка будет проявлять высокое поглощение в УФ-области, выступая как УФ-фильтр, но при этом ее повышенная структурная однородность может способствовать улучшенному пропусканию в видимой области спектра.

Можно сделать вывод, что для снижения прозрачности пленки оксида никеля желательно использовать более концентрированный, 6 %-й раствор, отжиг производить при более низких температурах – 450–500 °С.

3.2.3 Спектры теплозащитных покрытий на основе оксидных пленок в ИК-диапазоне

Были получены покрытия составов, приведенных в таблице 3.8, перспективные для исследования в ИК-диапазоне.

Таблица 3.8 – Перечень образцов оксидных покрытий, полученных для ИК-диапазона электромагнитного излучения

Состав покрытия	Количество слоев	Толщина покрытия, нм	T отжига, °С	T отжига, °С	T отжига, °С	Подложка
Zr-Y-O	5	150	500	600	700	Кварц
Zr-Y-O	10	300	500	600	700	Кварц
Zr-Y-O	15	450	500	600	700	Кварц
La-Zr-O	5	150	500	600	700	Кварц
La-Zr-O	10	300	500	600	700	Кварц
La-Zr-O	15	450	500	600	700	Кварц
La-Ce-O	5	150	500	600	700	Кварц
La-Ce-O	10	300	500	600	700	Кварц
La-Ce-O	15	450	500	600	700	Кварц
In-Sn-O	5	150	500	600	700	Кварц
In-Sn-O	10	300	500	600	700	Кварц
In-Sn-O	15	450	500	600	700	Кварц

Свойства полученных образцов были исследованы методом ИК-спектроскопии. Исследование свойств пленок в ИК-диапазоне было проведено с использованием фурье-спектрометра инфракрасного Avatar Thermo Nicolet 3600 в диапазоне $4000\text{--}5000\text{ см}^{-1}$ (2,5–20 мкм).

Принцип действия прибора основан на том, что при движении одного из зеркал интерферометра происходит изменение разности хода между интерферирующими лучами. Регистрируемый световой поток на выходе интерферометра (интерферограмма) представляет собой фурье-образ регистрируемого оптического спектра. Сам спектр (в шкале волновых чисел) получается путем выполнения математических преобразований над интерферограммой (обратное преобразование Фурье). На рисунке 3.16 для сравнения представлен спектр чистой подложки кварцевого стекла в ИК-диапазоне. В видимом диапазоне длин волн пропускание пленок составляет 90–96 %, и это обуславливает их прозрачность.

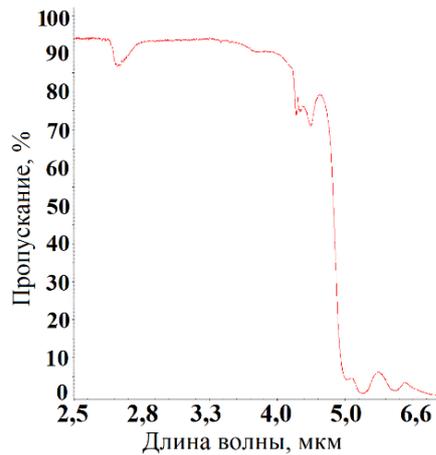


Рисунок 3.16 – ИК-спектр исходной подложки кварцевого стекла

ИК-спектры пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O толщиной 150 нм, отожженных при температуре 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 3.17.

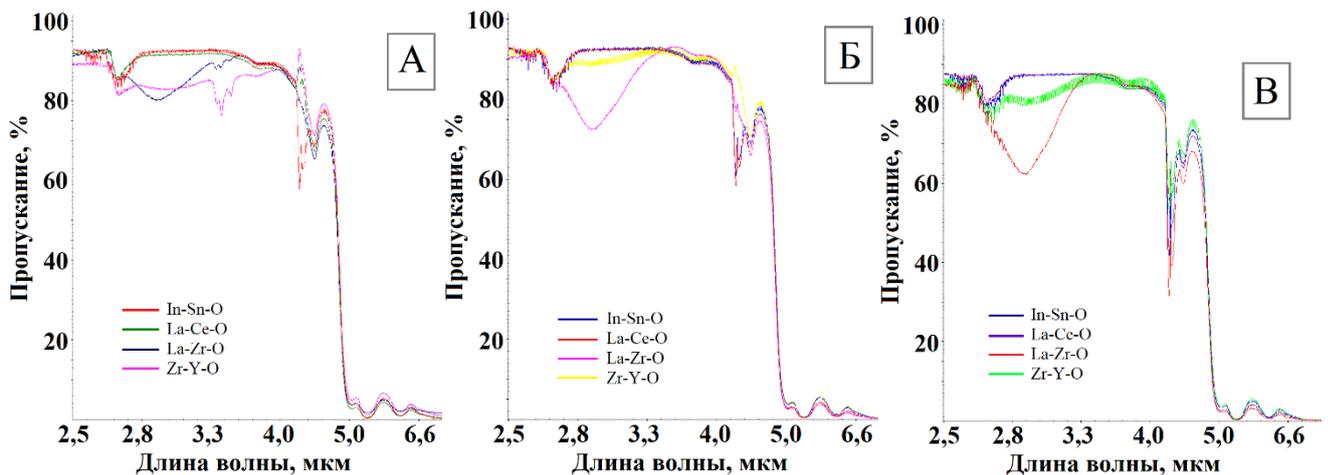


Рисунок 3.17 – ИК-спектры пропускания оксидов пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O на кварце толщиной **150 нм**, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В) относительно воздуха

Из рисунка 3.17, А следует, что в области 2,5–2,6 мкм тонкие пленки (150 нм) незначительно снижают пропускание, при этом пленка Zr-Y-O снижает пропускание в этой области наиболее эффективно – на 11 % в сравнении с 7–9 % у остальных покрытий. В области 2,6–5 мкм наблюдаются пики поглощения: пики на 2,7 и 4,2–4,6 мкм характерны для всех составов и частично объясняются поглощением подложки (см. рисунок 3.16). У пленки La-Zr-O наблюдается пик поглощения на 3,0 мкм. Пики поглощения в диапазоне 3,5–3,7 мкм наблюдаются

для La-Zr-O и Zr-Y-O. При этом после повышения температуры отжига до 600 и 700 °С пики поглощения в этом диапазоне исчезают (рисунок 3.17, Б, В). Также наблюдаются максимумы пропускания в спектрах покрытий La-Ce-O и Zr-Y-O на частоте 4,5 мкм, которые уменьшаются при повышении температуры (рисунок 3.17, Б, В).

Повышение температуры отжига тонких пленок до 600 °С (см. рисунок 3.17, Б) привело к снижению пропускания ИК-излучения на 30 % для пленки La-Zr-O на длине волны около 3,0 мкм. Пленка Zr-Y-O стала более прозрачной в диапазоне 2,7–4,4 мкм, что может объясняться формированием более плотной и однородной упаковки.

Повышение температуры отжига тонких пленок (150 нм) до 700 °С (см. рисунок 3.17, В) привело к дальнейшему снижению пропускания ИК-излучения почти на 40 % для пленки La-Zr-O, а для пленок составов In-Sn-O, La-Ce-O, Zr-Y-O – на 10–15 % в области 2,5–2,6 мкм. В области 4,2–4,7 мкм пропускание ИК-излучения снизилось на 40–70 % для пленки La-Zr-O, на 35–50 % для In-Sn-O и La-Ce-O, на 30–45 %. Наблюдаемое значительное снижение прозрачности может быть обусловлено образованием твердых растворов оксидов.

ИК-спектры пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O, толщиной 300 нм, отоженных при температуре 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 3.18.

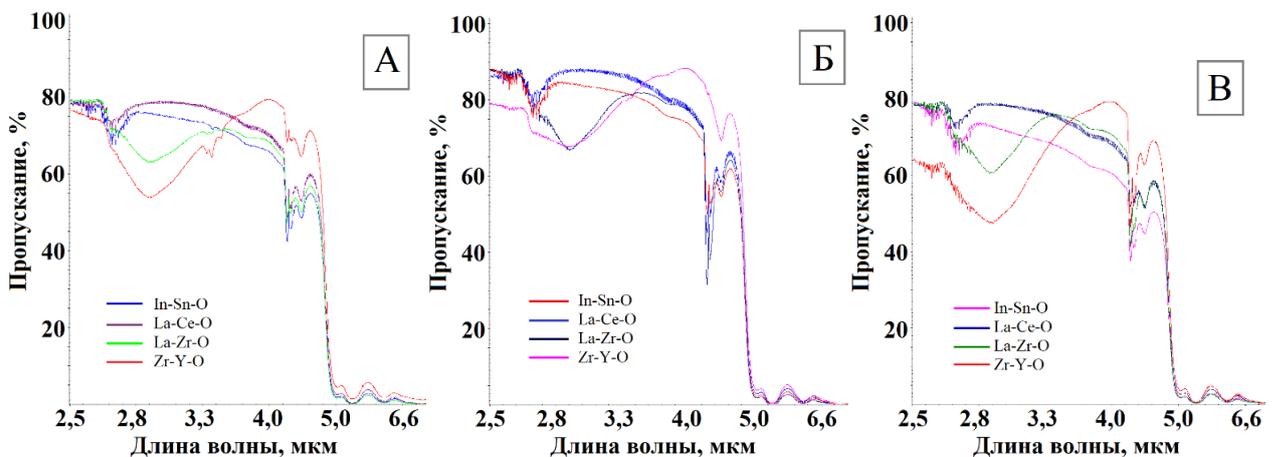


Рисунок 3.18 – ИК-спектры пропускания оксидов пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O на кварце толщиной 300 нм, отоженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В) относительно воздуха

Пленки толщиной 300 нм более эффективно снижают пропускание ИК-излучения. После отжига 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 %.

Повышение температуры отжига до 600 °С (рисунок 3.18, Б) пленок толщиной 300 нм не привело к существенным изменениям, однако 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 максимум поглощения, равный 70 % на длине волны 4,3 мкм.

Дальнейшее увеличение температуры отжига до 700 °С (рисунок 3.18, В) повысило эффективность пленок – прозрачность в диапазоне 2,5–2,6 мкм снизилась на 20 % для всех составов, а для состава Zr-Y-O на 40 %. Для длины волны 2,9 мкм прозрачность снизилась на 55 % у пленки Zr-Y-O.

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 3.19.

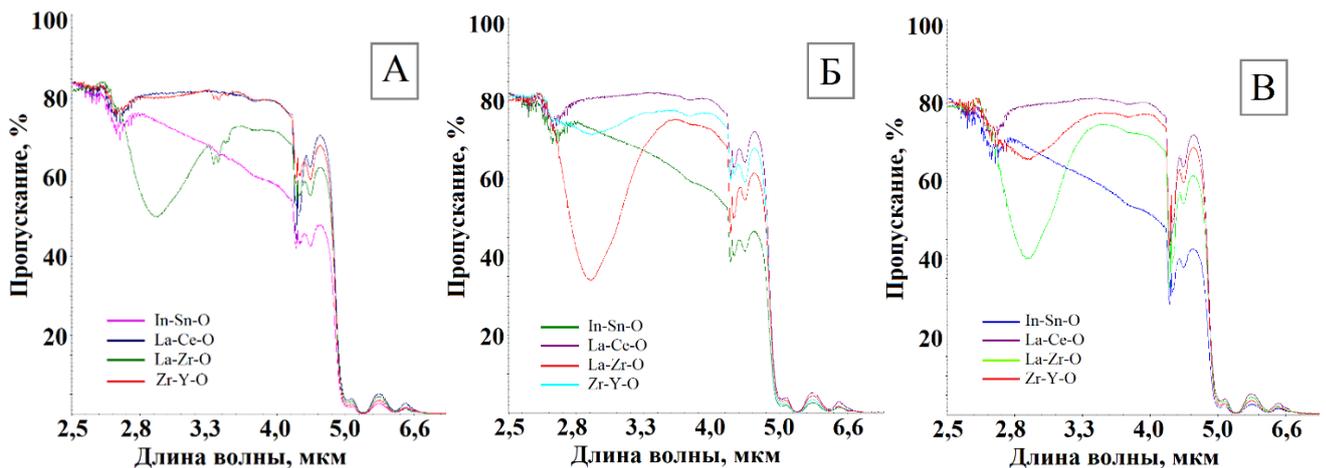


Рисунок 3.19 – ИК-спектры пропускания оксидов пленок La-Ce-O, Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O на кварце толщиной 450 нм, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В) относительно воздуха

Более толстые пленки толщиной 450 нм (15 слоев) после отжига при 500 °С (рисунок 3.19 А) эффективно снижают пропускание ИК-излучения. Все пленки снижают излучение в диапазоне 2,5–2,6 мкм на 20 %, вне зависимости от температуры отжига (рисунок 3.19 Б и В). Толстая пленка La-Zr-O после низкотемпературного отжига снижает пропускание ИК-излучения до 50 % на длине волны около 2,9 мкм и на 30–35 % в диапазоне 4,2–4,8 мкм. Пленка In-Sn-O снижает пропускание на 30–50 % в диапазоне 2,9–4,2 мкм и является наиболее эффективной в данном диапазоне. Наименее эффективны в данных условиях пленка Zr-Y-O, которая деградирует из-за роста размера зерен и пленка La-Ce-O. Они снижают ИК-пропускание в среднем на 20–40 % во всем рассматриваемом диапазоне. Помимо максимумов поглощения, которые наблюдаются у всех покрытий в диапазоне 4,2–4,6 мкм, у составов La-Zr-O и Zr-Y-O они наблюдаются также на 3,3–3,5 мкм и исчезают при более высокотемпературном отжиге (см. рисунок 3.19 Б и В).

После отжига при 600 °С (см. рисунок 3.19 Б) толстая пленка La-Zr-O снижает ИК-пропускание почти на 70 % на длине волны 2,9 мкм. Пленка Zr-Y-O снижает пропускание только на 30 %. Для In-Sn-O снижение пропускания практически не меняется и остается в пределах 30–50 % в диапазоне 2,9–4,2 мкм, в диапазоне 4,2–4,6 мкм на 55–60 %, поэтому пленка этого состава является наиболее эффективной среди других пленок. Для сравнения – пленка La-Zr-O в данном диапазоне снижает излучение на 40–65 %, Zr-Y-O на 35–40 %, La-Ce-O на 30–40 %.

Дальнейшее повышение температуры отжига толстых пленок до 700 °С (см. рисунок 3.19, В) ухудшает снижение ИК-пропускания для пленки La-Zr-O, её эффективность составляет 60 % на длине волны около 2,9 мкм. Пропускание In-Sn-O продолжает снижаться и в диапазоне 4,2–4,6 мкм эффективность составила 60–70 %, повышение эффективности In-Sn-O связано с процессом фазообразования, поскольку прозрачная проводящая фаза формируется при температуре более 700 °С. Прозрачность всех покрытий в диапазоне 4,2–4,6 мкм снижается еще на 10 % в сравнении с прозрачностью покрытий, полученных при 600 °С.

ИК-спектры оксидных покрытий La-Ce-O толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 3.20.

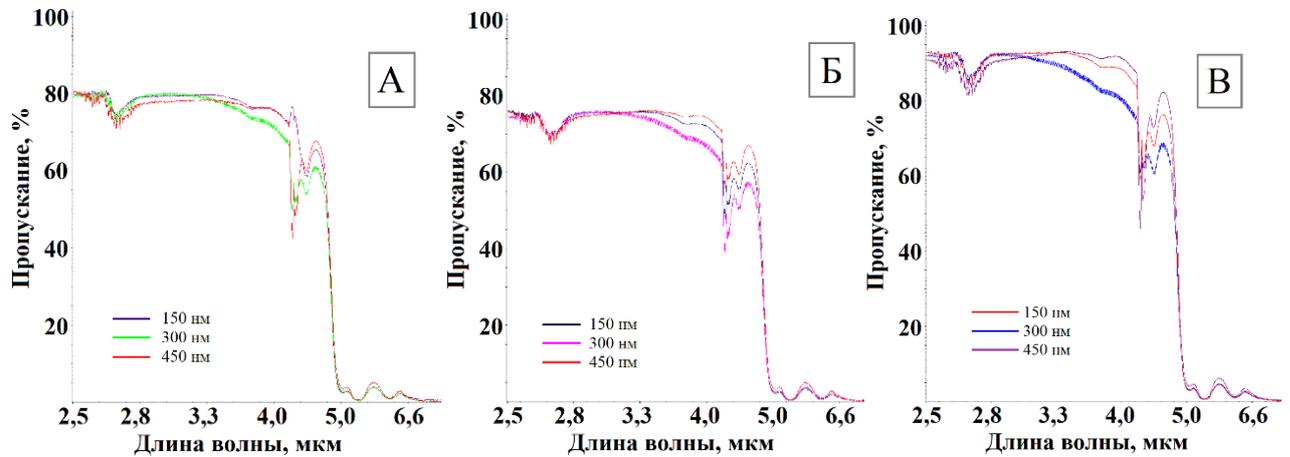


Рисунок 3.20 – ИК-спектры оксидных покрытий **La-Ce-O**, толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В)

Пленка La-Ce-O снижает ИК-пропускание на 25–30 % в зависимости от толщины и наиболее эффективна при толщине 300 нм. Отжиг пленки La-Ce-O при 700 °С снижает эффективность защиты от ИК-излучения.

ИК-спектры оксидных покрытий Zr-Y-O толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 3.21.

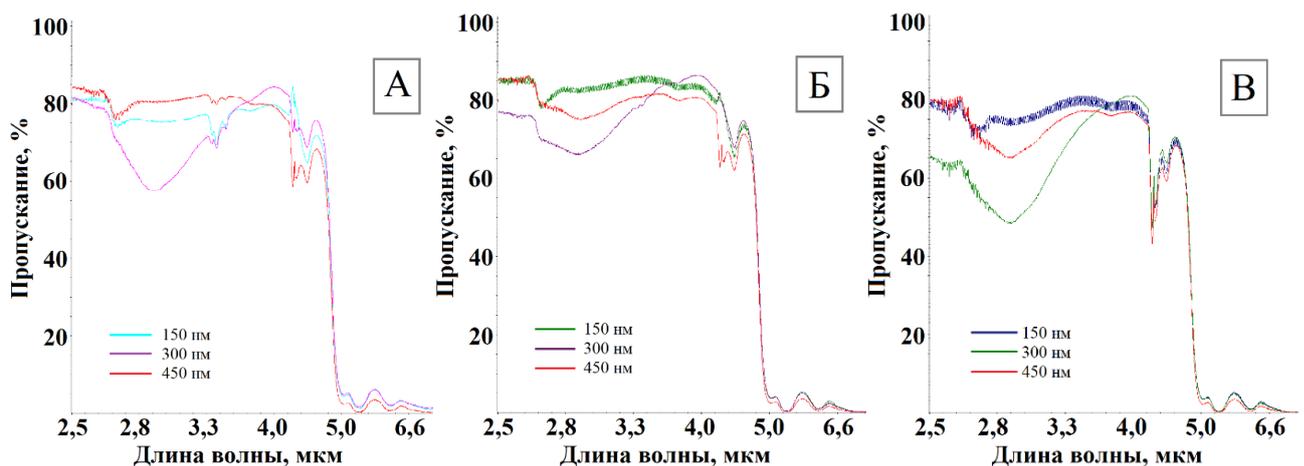


Рисунок 3.21 – ИК-спектры оксидных покрытий **Zr-Y-O**, толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В)

Следует отметить, что увеличение толщины пленки со 150 до 300 нм приводит к снижению прозрачности в ИК-диапазоне [139], а дальнейший рост до

450 нм – к ее увеличению, при этом в целом наибольшая прозрачность в ИК-диапазоне наблюдается в случае отжига при 600 °С, в случае толщины покрытия 450 нм. Повышение температуры отжига и толщины покрытия улучшает эффективность задержки ИК-излучения за счет уплотнения структуры и роста интенсивности отражения тепла.

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. Более высокая температура отжига приводит к уплотнению пленок за счет атомной диффузии, которое, в свою очередь, влечет разрушение более крупных кристаллитов и развитие растягивающего напряжения [140]. Во время отжига атомы имеют достаточно энергии, чтобы двигаться к предпочтительным местам зародышеобразования. Благодаря этому усиленному распространению атомов устанавливается сильная предпочтительная ориентация. При большей толщине (450 нм) ухудшается адгезия пленки данного состава. Она деградирует, и её эффективность значительно снижается.

ИК-спектры оксидных покрытий La-Zr-O толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 3.22.

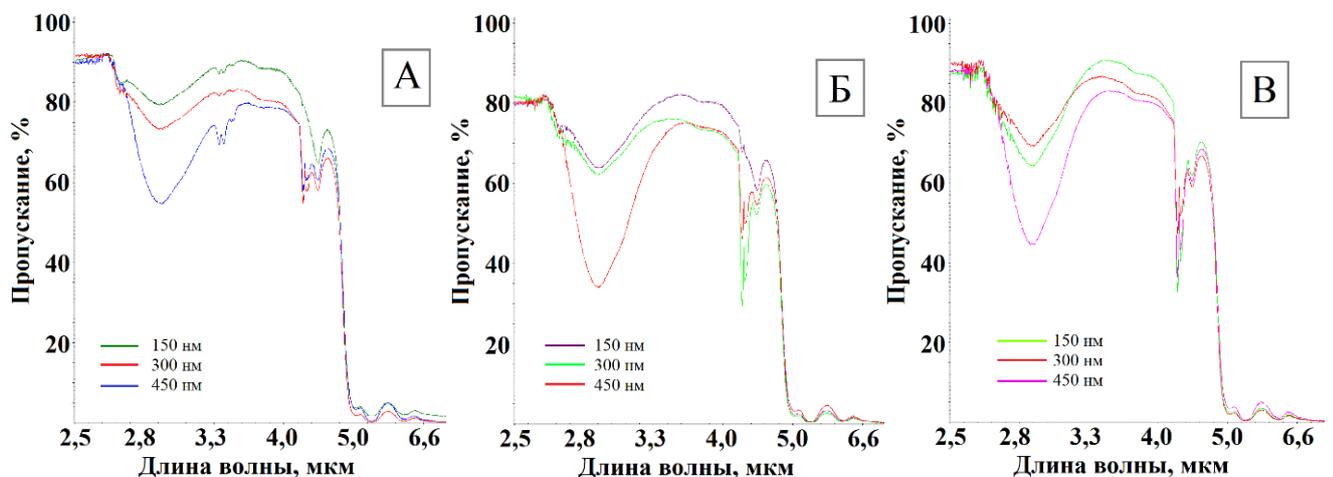


Рисунок 3.22 – ИК-спектры оксидных покрытий **La-Zr-O**, толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В)

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 %.

В данном случае, в отличие от покрытий состава Zr-Y-O, увеличение толщины слоя до 450 нм приводит к значительному снижению прозрачности в ИК-диапазоне, при этом каких-либо изменений полос поглощения подложки не наблюдается, что указывает на отсутствие взаимодействий в системе «пленка – подложка», приводящих к изменению прозрачности. Оптические свойства пленок на основе диоксида циркония зависят от микроструктуры и размера зерен в пленке.

ИК-спектры оксидных покрытий In-Sn-O толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500, 600 и 700 °С, приведены на рисунке 3.23.

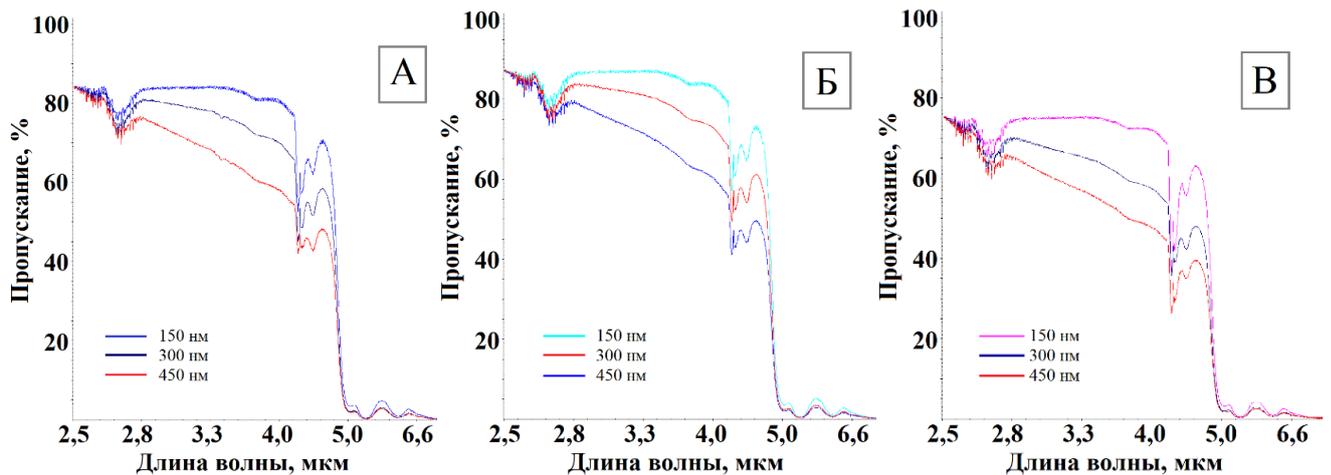


Рисунок 3.23 – ИК-спектры оксидных покрытий **In-Sn-O**, толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при 500 °С (А), 600 °С (Б), 700 °С (В)

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

Исследования спектров пропускания образцов с ITO-покрытием (In-Sn-O) на фурье-спектрометре в ИК-диапазоне (без вычета пропускания подложки) показали, что в ИК-диапазоне происходит постепенное снижение пропускание ИК-излучения от 80 до 30 %. Для пленок рассматриваемого состава пропускание напрямую

зависит от количества слоев – при повышении толщины покрытия, пропускание снижается во всем диапазоне излучения до 5 мкм. Исходя из анализа ИК-спектров можно предположить, что температура отжига также влияет на пропускание. В сравнении с покрытиями, отожженными при 500 °С, покрытия становятся менее прозрачными после температуры отжига до 600 °С, в среднем на 5–10 %. После отжига при 700 °С пропускание снижается на 10–15 % и достигает наименьших значений в сравнении с покрытиями, отожженными при более низких температурах.

3.2.4 Исследование спектров пропускания оксидных пленок в различных областях УФ-диапазона

Для УФ-диапазона были получены следующие составы оксидных пленок с разной толщиной и температурой отжига, приведенные в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Перечень образцов оксидных покрытий, полученных для УФ-диапазона электромагнитного излучения

Состав покрытия	Количество слоев	Толщина слоя, нм	Температура отжига 1, °С	Температура отжига 2, °С
ZrO ₂	2	60	500	700
	5	150	500	700
TiO ₂	2	60	500	700
Y ₂ O ₃	5	150	500	700
	10	300	500	700
ITO	10	300	500	700
ZnO	2	60	500	700
	5	150	500	700
NiO	2	60	500	700
	5	150	500	700
CuO	2	60	500	700
	5	150	500	700

Свойства покрытий в УФ-диапазоне и в видимом диапазоне были исследованы методом УФ-видимой спектроскопии с использованием спектрофотометра СФ-56 (ЛОМО). Принцип действия спектрофотометра основан на измерении отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец, к потоку, прошедшему через образец сравнения.

Оптическая схема спектрофотометра представляет собой двойной монохроматор, построенный по горизонтальной схеме с постоянным углом отклонения со сложением дисперсий.

Работа спектрофотометра в диапазоне от 190 до 1100 нм обеспечивается применением двух источников излучения – дейтериевой лампы (190–340 нм) и галогенной лампы (340–1100 нм).

Оксидные пленки ZrO_2 , TiO_2 , NiO , CuO , ZnO , Y_2O_3 , In_9SnO_{15-x} на кварцевой подложке были получены экстракционно-пиролитическим методом. Термическая обработка при различных температурах позволяет регулировать структуру пленки.

После пиролиза при 500 °С пленки имели аморфно-кристаллическую структуру и минимальный размер зерна (5–6 нм). Отжиг при 700 °С приводил к формированию кристаллической структуры пленок.

Защитные свойства покрытий по отношению к УФ-излучению характеризуются способностью к снижению пропускания в диапазоне длин волн от 200 до 400 нм. На рисунке 3.24 представлен спектр чистой подложки для сравнения. Спектры полученных образцов, приведенные на рисунках 3.25–3.31, показывают, что нанесение исследуемых покрытий позволяет в широких пределах регулировать прозрачность используемых кварцевых стекол в различных областях УФ-диапазона [105, 141–143].

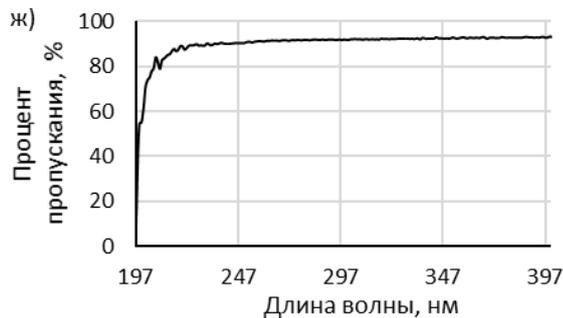


Рисунок 3.24 – УФ-спектр исходной подложки кварцевого стекла

Пленки оксида иттрия (Y_2O_3) различной толщины (150 и 300 нм) были нанесены на кварцевое стекло экстракционно-пиролитическим методом и термически обработаны при 500 и 700 °С в течение 5 минут.

В случае покрытий Y_2O_3 при толщине слоя 150 нм наблюдается рост прозрачности по сравнению с исходной подложкой в видимой области спектра (свыше 400 нм), как показано на рисунке 3.25, А, при этом в целом толщина слоя не оказывает существенного влияния на прозрачность, а повышение температуры отжига от 500 до 700 °С приводит к ее увеличению, что может быть обусловлено укрупнением зерен.

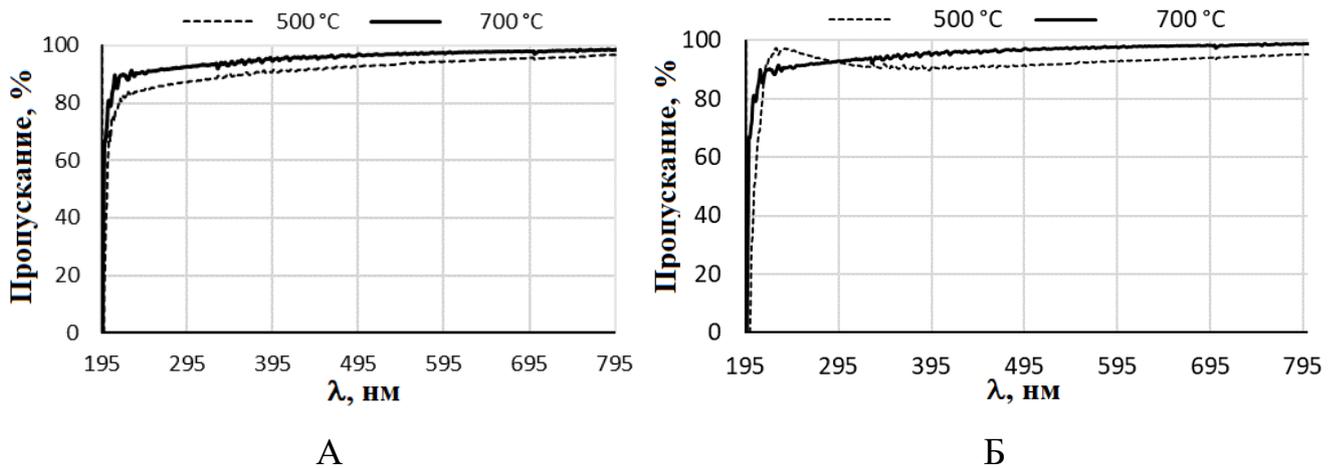


Рисунок 3.25 – Спектры образцов с покрытиями Y_2O_3 : 5 слоев – 150 нм (А); 10 слоев – 300 нм (Б); температура отжига 500 °С (·····), 700 °С (—)

Вместе с тем следует отметить резкий рост прозрачности в области около 230–260 нм для пленок толщиной 300 нм, подвергнутых термообработке при температуре 500 °С, что может быть обусловлено особенностями интерференции при отражении света от двух сторон покрытия.

Таким образом, полученные нанослои оксида иттрия характеризуются повышенной прозрачностью в УФ-видимой области, что перспективно для их применения в качестве специальных покрытий для просветления оптики.

Пленка оксида цинка ZnO толщиной 60 нм задерживает УФ-излучение в области 200–295 нм на 20 % (рисунок 3.26). В видимой области спектра пропускание составляет около 100 %. После отжига при 700 °С наблюдается резкий рост прозрачности в УФ-области, достигающей максимальных (близких к 100 %)

значений 60 нм и несколько снижающийся при увеличении толщины до 150 нм, в то время как в видимой области прозрачность практически не изменяется.

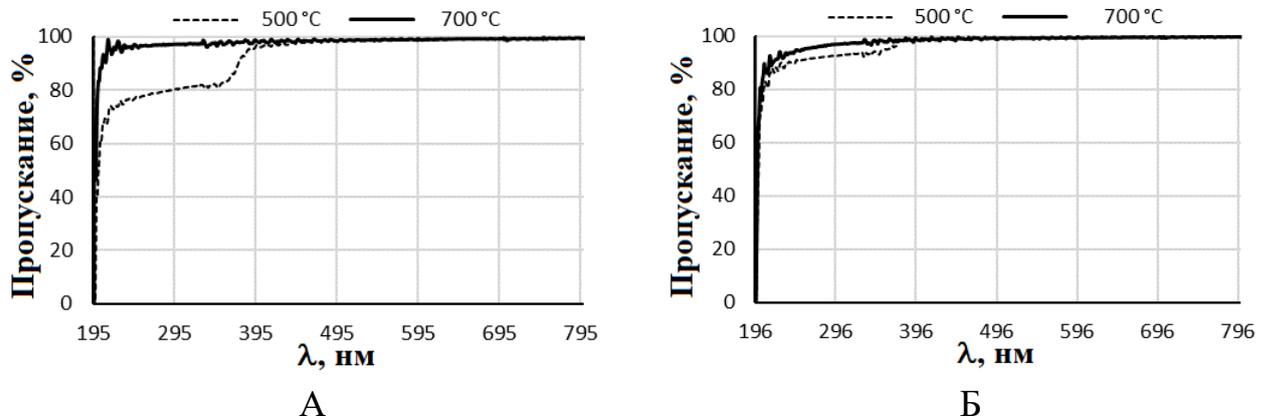


Рисунок 3.26 – Спектры образцов с покрытиями ZnO: 2 слоя – 60 нм (А); 5 слоев – 150 нм (Б); температура отжига 500 °С (·····), 700 °С (—)

Экстракционно-пиролитическим методом были получены пленки диоксида циркония. Для тонкого (60 нм) слоя ZrO_2 после пиролиза при 500 °С наблюдается плавный рост прозрачности в области 200–290 нм, а кристаллизация (обработка при 700 °С) приводит к более резкому росту прозрачности в области 200–290 нм и ее некоторому снижению при 300–500 нм (рисунок 3.27, А). В случае увеличения толщины покрытия до 150 нм, как показано на рисунке 3.27, Б, наблюдается снижение прозрачности при 220–560 нм, сменяющееся ростом в более длинноволновой области.

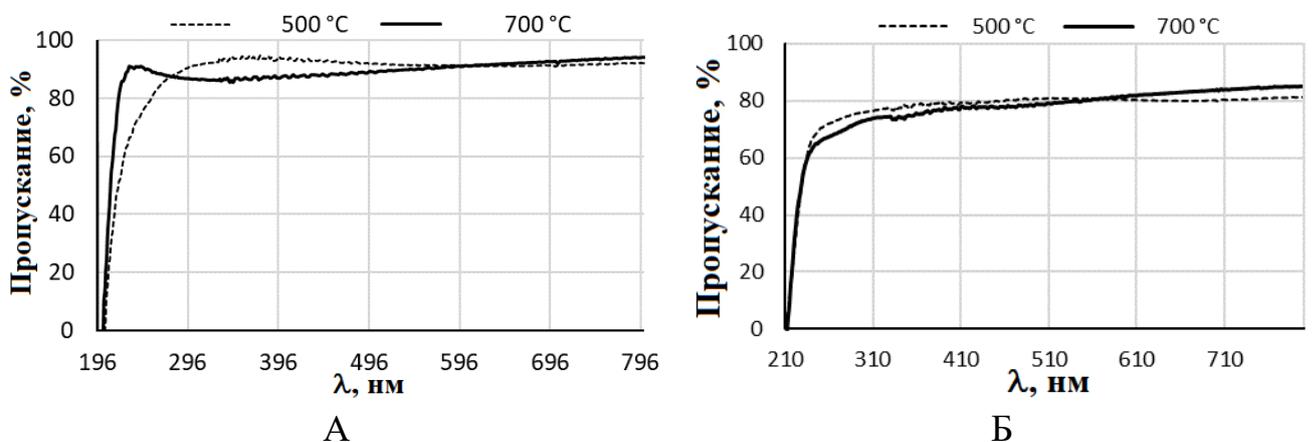


Рисунок 3.27 – Спектры образцов с покрытиями ZrO_2 : 2 слоя – 60 нм (А); 5 слоев – 150 нм (Б); температура отжига 500 °С (·····), 700 °С (—)

Пленка TiO_2 после пиролиза при $500\text{ }^\circ\text{C}$ задерживает УФ-излучение приблизительно на 50 %, что видно из рисунка 3.28. Кристаллизация после отжига при $700\text{ }^\circ\text{C}$ 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.

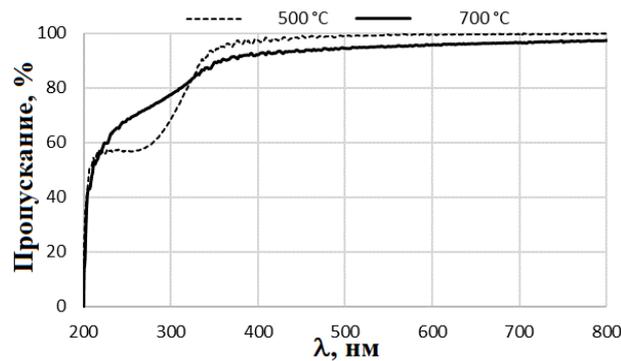


Рисунок 3.28 – Спектры образцов с покрытиями TiO_2 : 2 слоя – 60 нм; температура отжига $500\text{ }^\circ\text{C}$ (\cdots), $700\text{ }^\circ\text{C}$ (—)

Пленка ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$) задерживает УФ-излучение от 100 до 70 % в диапазоне 195–280, т. е. часть жесткого диапазона УФ-С (100–280 нм), как показано на рисунке 3.29. В диапазоне УФ-В (280–315 нм) поглощение УФ 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).

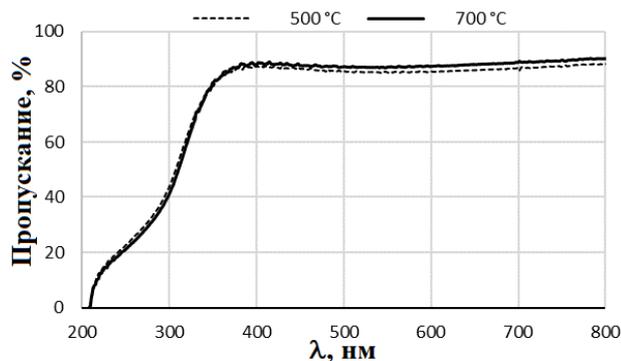


Рисунок 3.29 – Спектры образцов с покрытиями ИТО: 5 слоев, 150 нм; температура отжига $500\text{ }^\circ\text{C}$ (\cdots), $700\text{ }^\circ\text{C}$ (—)

Особый интерес представляют светозащитные полупрозрачные в видимом диапазоне оксидные пленки. Установлено, что пленка оксида никеля толщиной 60 нм задерживает УФ-излучение в диапазоне 200–300 нм на 90 %, как видно на рисунке 3.30, А. Увеличение ее толщины до 150 нм приводит к росту прозрачности в данной области (рисунок 3.30, Б), что подтверждается анализом микроструктуры. 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 %.

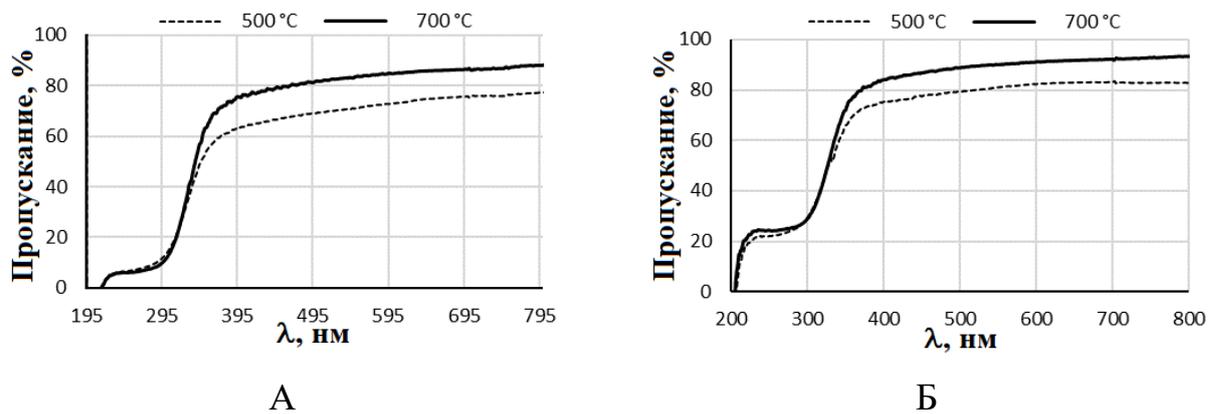


Рисунок 3.30 – Спектры образцов с покрытиями NiO: 2 слоя – 60 нм (А); 5 слоев – 150 нм (Б); температура отжига 500 °С (·····), 700 °С (—)

Пропускание пленок CuO толщиной 60 и 150 нм в УФ-области не превышает 30 и 5 % соответственно, а в видимой области спектра возрастает до 60 %, как показано на рисунке 3.31. При кристаллизации прозрачность увеличивается, за исключением области свыше 700 нм, в которой для пленок толщиной 150 нм наблюдается некоторое снижение прозрачности.

Полученные результаты позволили сопоставить характеристики прозрачности ряда оксидных слоев в УФ-видимой области в зависимости от толщины слоя и условий его предварительной термообработки, в т. ч. вызывающей переход из аморфного состояния в кристаллическое. Для слоев TiO₂, Y₂O₃ и ZnO в

результате кристаллизации прозрачность в коротковолновой области возрастает, а в длинноволновой при определенных условиях может снижаться. В случае CuO наблюдается рост прозрачности во всем исследуемом диапазоне, за исключением некоторого снижения в ИК-области (свыше 780 нм) в случае слоя большей толщины. Для слоев NiO и ITO , напротив, наблюдается снижение прозрачности в коротковолновой области и увеличение в длинноволновой.

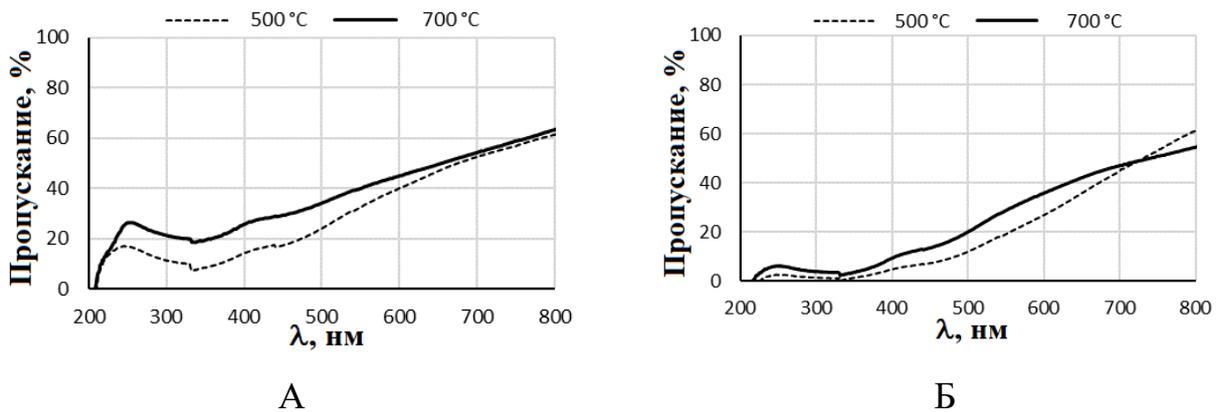


Рисунок 3.31 – Спектры образцов с покрытиями CuO : 2 слоя – 60 нм (А); 5 слоев – 150 нм (Б); температура отжига 500 °С (·····), 700 °С (—)

В целом снижение прозрачности в УФ-области в сочетании с ее ростом в видимой может быть связано с некоторым увеличением расстояния между атомами или узлами решетки до значений, сопоставимых с длиной волны УФ-излучения или превышающих ее, в сочетании с упорядочением их взаимного расположения (в частности за счет кристаллизации), что способствует росту прозрачности в видимой области.

Напротив, рост прозрачности в УФ-области в сочетании с ее снижением в видимой может быть обусловлен уплотнением структуры материала с уменьшением расстояний между отдельными атомами в сочетании с появлением узлов на расстояниях, соответствующих длинам волн в видимой области.

Кроме того, селективный рост или снижение прозрачности в отдельных областях спектра при определенных значениях толщины покрытий может быть обусловлен особенностями интерференции.

Таким образом, 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.

3.2.5 Оценка ширины запрещенной зоны оксидов

Ширина запрещенной зоны оксидов (E_g) влияет на их оптические свойства. Чем шире запрещенная зона, тем более высокоэнергетическое (коротковолновое) излучение может поглощаться, а видимый свет пропускается. Оксиды с широкой запрещенной зоной (более ~ 3 эВ) являются диэлектриками или полупроводниками и пропускают видимый свет (например, диоксид кремния, диоксид титана), а оксиды с узкой запрещенной зоной (близкой к нулю) являются полуметаллами и поглощают в видимом диапазоне. Чтобы материал был непрозрачным в определенном спектральном диапазоне, его E_g должна быть меньше энергии фотонов этого диапазона.

Рост температуры и концентрация носителей влияют на значение ширины запрещенной зоны E_g в сторону увеличения, а также на показатель преломления, и удельное сопротивление в сторону уменьшения. Также вышеотмеченные изменения могут происходить из-за размерного эффекта: размер кристаллитов влияет на ширину запрещенной зоны [144].

Метод Тауца был использован для прямой оценки ширины запрещенной зоны полученных оксидных пленок. Поглощение света в полупроводнике вблизи края фундаментального поглощения (когда энергия фотона $h\nu \geq E_g$) описывается законом Тауца [145]:

$$\alpha h\nu = (h\nu - E_g)^m, \quad (3.10)$$

где α – коэффициент поглощения (в см^{-1}). Эту величину получим из экспериментальных данных;

$h\nu$ – энергия фотона (h – постоянная Планка, ν – частота света);

E_g – ширина запрещенной зоны (эВ);

m – показатель степени, который определяется типом оптического перехода: $m = 1/2$ для прямых разрешенных переходов; $m = 2$ для непрямых разрешенных переходов (для аморфных полупроводников и многих тонких пленок наиболее часто используется $m = 2$); $m = 3/2$ для прямых запрещенных переходов; $m = 3$ для непрямых запрещенных переходов.

Нужно определить α как функцию от $h\nu$, построить график $(\alpha h\nu)^{1/m}$ от $h\nu$, и экстраполировать линейный участок до пересечения с осью энергий. Точка пересечения даст E_g .

В результате измерений не удастся получить α напрямую, мы получаем пропускание (T) образца.

Для плоскопараллельного образца (пленки) с двумя границами раздела: воздух/материал и материал/воздух, учитывая многократные отражения на границах (но без учета интерференции), исходя из закона Бугера – Ламберта – Бера ($I = I_0 e^{-\alpha d}$), формула для пропускания примет вид:

$$T = \frac{((1-R)^2 e^{-\alpha d})}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (3.11)$$

где T – коэффициент пропускания (в долях единицы);

R – коэффициент отражения (в долях единицы);

α – коэффициент поглощения;

d – толщина образца.

Примечание: для плоскопараллельного образца в рамках геометрической оптики. Упрощение $T \approx (1 - R)^2 e^{-\alpha d}$, используемое в методе Тауца, справедливо, когда вклад многократных отражений мал, т. е. когда $R^2 e^{-2\alpha d} \ll 1$. Это выполняется для материалов с высоким поглощением (большое α) и/или малым отражением (малое R).

В области края поглощения, где значение α велико (обычно $\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$), слагаемое $R^2 e^{-2\alpha d}$ в знаменателе становится очень малым, так как $e^{-2\alpha d} \ll 1$. Этим слагаемым можно пренебречь по сравнению с 1.

Таким образом, формула упрощается до:

$$T \approx (1 - R)^2 e^{-\alpha d}, \quad (3.12)$$

$$e^{-\alpha d} = (1 - R)^2 T.$$

Для выражения α прологарифмируем обе части уравнения:

$$\begin{aligned} -\alpha d &= \ln(T) - 2\ln(1 - R), \\ \alpha d &= -\ln(T) + 2\ln(1 - R), \\ \alpha &= \frac{-\ln(T) + 2\ln(1 - R)}{d}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Перейдем от натурального к десятичному логарифму ($\ln(x) = \ln(10) \cdot \lg(x) \approx 2,3026 \cdot \lg(x)$) и пропусканию в процентах ($T = T\%/100$). Получим:

$$\begin{aligned} \alpha d &= -2,3026 \cdot \lg(T\%) + 2,3026 \cdot \lg(100) + 2 \cdot 2,3026 \cdot \lg(1 - R), \\ \alpha d &= 2,3026 \cdot [-\lg(T\%) + \lg(100) + 2 \lg(1 - R)], \end{aligned}$$

где $[-\lg(T\%) + \lg(100) = \lg(100/T\%)] = D$ – оптическая плотность, заменив ее в формуле, получим:

$$\alpha d = 2,3026 \cdot [D + 2 \lg(1 - R)].$$

Подставим α в закон Тауца для $m = 2$ (непрямые переходы):

$$\alpha h\nu = (h\nu - E_g)^2.$$

Подставим наше выражение для α :

$$\frac{2,3026}{d} \cdot [D + 2 \lg(1 - R)] \cdot h\nu = (h\nu - E_g)^2.$$

Если опустить константы 2,3026 и d , поскольку они не влияют на точку пересечения, а только на наклон кривой, получаем величину для оси Y :

$$[D + 2 \lg(1 - R)] \cdot h\nu. \quad (3.14)$$

Заменив $h\nu$ на $1240/\lambda$ (нм) и возведя в квадрат, чтобы получить линейную зависимость от $h\nu$, а после опустив константу 1240, получим величину для оси Y :

$$\left([D + 2 \lg(1 - R)] \cdot \frac{1240}{\lambda} \right)^2,$$

$$\left(\frac{D+2 \lg(1-R)}{\lambda}\right)^2. \quad (3.15)$$

По оси абсцисс откладывали значения энергии фотона, равной $h\nu = 1240/\lambda$. К самому левому прямолинейному участку графика строится прямая и значение по оси абсцисс, где она пересекает прямую, находится значение E_g .

График, полученный на основании представленной формулы, на примере пленки оксида никеля, приведен на рисунке 3.32.

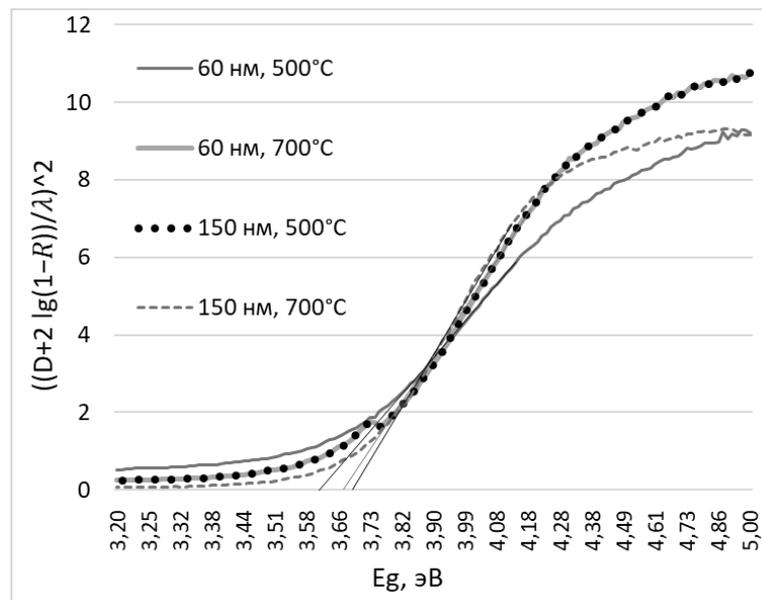


Рисунок 3.32 – Определение ширины запрещенной зоны пленки NiO методом Тауца

В пределах точности эксперимента расчетные значения ширины запрещенной зоны пленок NiO, полученных экстракционно-пиролитическим методом, толщиной 60 и 150 нм при 500 и 700 °C практически совпадают и находятся в диапазоне 3,6–3,7 эВ. Эти значения соответствуют существующим справочным данным для NiO (3,7–4,0 эВ). Полученная ширина запрещенной зоны оксида NiO соответствует результатам спектрометрии – пленка непрозрачна в диапазоне до 200 нм [138].

Расчетные значения ширины запрещенной зоны остальных оксидных пленок приведены в таблице 3.10.

Расчетные значения ширины запрещенной зоны пленок оксида иттрия, полученного экстракционно-пиролитическим методом, варьируются в диапазоне 5,3–6,2, что немного шире теоретических данных. Наибольшей E_g обладает пленка толщиной 150 нм полученная при отжиге при 500 °С – 6,2 эВ (200 нм), наименьшая E_g 5,3 эВ (234 нм) достигается при толщине 60 нм и температуре отжига 500 °С.

Таблица 3.10 – Расчетные и справочные значения ширины запрещенной зоны оксидных пленок

Оксид	E_g справочная, эВ	E_g расчетная, эВ			
		60 нм, 500 °С	150 нм, 500 °С	60 нм, 700 °С	150 нм, 700 °С
Y ₂ O ₃	~5,5–6,0 [146]	5,3	6,2	5,8	5,9
ZnO	3,37 [107]	3,3	6	6	6
ZrO ₂	5,1 [109]	4,72	5,25	5,64	5,4
TiO ₂	3,2 (анатаз), 3,0 (рутил) [147]	3,5	-	3,2	-
ITO	3,5–4,3 [116]	-	3,75	-	3,72
NiO	~3,7–4,0 [148]	3,6	3,6	3,6	3,7
CuO	2,1–2,2 (I), 1,2– 1,45 (II) [116], [149]	1,9	2,1	1,7	2,1

Спектры пленок оксида цинка показали наибольшую прозрачность в УФ-диапазоне и характеризуются наибольшей шириной запрещенной зоны – около 6 эВ. При этом пленка толщиной 60 нм, отожженная при 500 °С, немного снижает прозрачность в УФ, для нее расчетное значение E_g равно 3,3 эВ (376 нм).

Для пленок оксида циркония расчетная ширина запрещенной зоны полученных экстракционно-пиролитическим методом составила от 4,72 до 5,64 эВ в зависимости от толщины пленки и температуры отжига. При этом более высокая прозрачность в УФ диапазоне соответствует $E_g = 5,64$ эВ (220 нм) для пленки толщиной 60 нм, полученной при 700 °С, а наименьшая $E_g = 4,72$ эВ (263 нм) характерна для пленки толщиной 60 нм, полученной при 500 °С.

Для пленок оксида титана наибольшая ширина запрещенной зоны, соответствующая 3,5 эВ (354 нм), достигается при отжиге покрытия при 500 °С, после отжига пленки при 700 °С прозрачность пленки повышается, что подтверждается снижением E_g до 3,2 эВ (388 нм).

Для пленок ИТО, полученных экстракционно-пиролитическим методом при 500 и 700 °С, расчетные значения ширины запрещенной зоны совпадают и составляют около 3,7 эВ. Эти значения соответствуют существующим справочным данным для ИТО (3,5–4,3 эВ). Полученная ширина запрещенной зоны оксида ИТО соответствует результатам спектрометрии – пленка непрозрачна в диапазоне до 200 нм, начиная с 210 нм прозрачность снижается с ростом длины волны: для 280 нм прозрачность составляет 30 %, для 315 нм – 50 % [139].

Наибольшую перспективность среди полученных прозрачных покрытий представляет тонкая пленка оксида никеля, расчетные значения ширины запрещенной зоны которой составляют 3,6–3,7 эВ (344–335 нм). Эти значения соответствуют существующим справочным данным для оксида никеля (3,7–4,0 эВ).

Наименьшей прозрачностью в УФ-диапазоне обладает пленка оксида меди, она также сильно снижает прозрачность в видимой области спектра. Расчетная ширина запрещенной зоны для пленки оксида меди, полученной экстракционно-пиролитическим методом, составляет 1,7–2,1 эВ (729–590 нм). Наименьшая прозрачность достигается при увеличении толщины покрытия, при этом $E_g = 2,1$ эВ.

3.2.6 Определение теплоизоляции экранов с теплозащитными покрытиями

Для исследования эффективности теплозащитных экранов для защиты от инфракрасного излучения в лабораторных условиях использовалась установка, схема которой приведена на рисунке 3.33. Методика проведения эксперимента заключалась в измерении теплового излучения и температуры источника инфракрасного излучения без экрана, при наличии экрана без покрытия, при наличии экрана с покрытием на разных расстояниях (r) от источника излучения на высоте от поверхности (h). Расстояние между экраном и источником (l) также варьировалось. В качестве измерительных приборов использовались радиометр теплового излучения БВЕК43 1110.10 РЭ для измерения интенсивности теплового излучения и энергетической яркости, пирометр FLUKE 59 MAX для

бесконтактного измерения температуры объекта, анемометр TROTEC BA16 для измерения температуры воздуха.

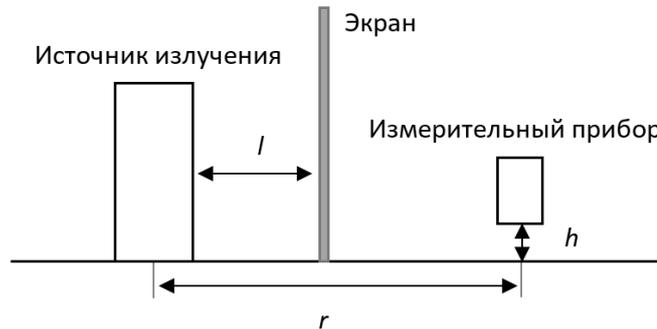


Рисунок 3.33 – Лабораторный стенд для исследования эффективности теплозащитных экранов

Радиометр (рисунок 3.34, А) предназначен для измерения энергетической светимости объектов и интенсивности теплового излучения. Диапазон измерений энергетической яркости – от 165 до 5000 Вт/(м²·ср). Диапазон измерений плотности теплового потока (интенсивности теплового излучения) – от 5 до 2500 Вт/м². Пределы допускаемой относительной погрешности ±6,0 %. Время установления показаний – 10 с.

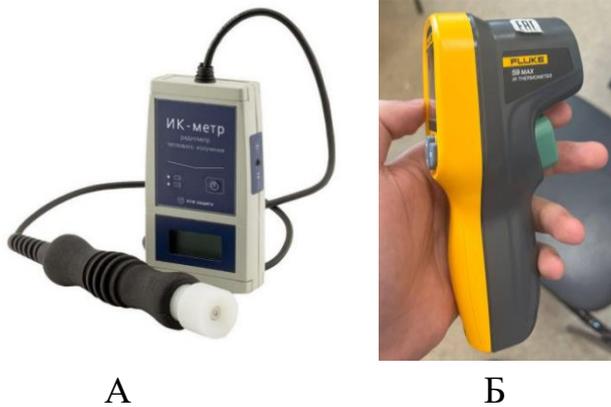


Рисунок 3.34 – Используемое измерительное оборудование:

А) ИК-метр; Б) пирометр

Пирометр (рисунок 3.34, Б) измеряет интенсивность инфракрасного излучения, исходящего от объекта, и преобразует эти данные в значение температуры с учетом заданного коэффициента излучения. Время реакции <500 мс (95 % от показаний), спектральная чувствительность – от 8 до 14 мкм. Погрешность

прибора составляет $\pm 2,0$ °С, или $\pm 2,0$ % показаний. Измерения проводились в режиме Avg, коэффициент излучательной способности для нагретого тела – 0,93, для стекла – 0,85.

В качестве источника использовался инфракрасный обогреватель Timberk TCH Q2 800, обладающий следующими характеристиками: номинальная мощность – 800 Вт, номинальная сила тока – 3,6 А, тип инфракрасного обогревателя – кварцевый. Площадь излучающей поверхности $0,14 \times 0,06$ м.

Размер стеклянного экрана составил $0,19 \times 0,17$ м.

Измерения проводились при одинаковом напряжении, подаваемом на стенд, что гарантировало равномерный нагрев источника. Во время эксперимента пирометр направляли на центр каждой поверхности, фиксируя отображаемую на экране температуру. Центр поверхности нижней лампы находился на высоте 0,12 м от поверхности стола. Точки измерения находились на расстоянии 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 и 1,5 м от источника. Результаты измерений источника без экрана приведены в таблице 3.11. Температура окружающей среды на начало измерений составляла 23 °С.

Таблица 3.11 – Результаты измерения источника без экрана

<i>r</i> , м	<i>L</i> , Вт/(ср*м ²)	<i>q</i> , Вт/м ²	<i>T</i> _{возд} , °С	<i>T</i> _{поверх} , °С
0,4	6739,2	2106	26,3	267
0,5	4699,52	1468,6	25,3	236,2
0,6	4261,76	1331,8	24,4	220,4
0,7	3774,72	1179,6	24,1	207,8
0,8	3413,12	1066,6	24	178
0,9	2970,88	928,4	23,9	157,4
1,0	2642,56	825,8	23,8	149,8
1,5	1619,84	506,2	23,8	114,2

Измерения с экраном из стекла без оксидного покрытия проводились на высоте 0,12 от поверхности и на расстоянии 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 0,9, 1,0 и 1,5 м от источника. Экран от источника устанавливался на расстоянии 0,2 и 0,4 м. Измерения проводились спустя 30 мин после установки теплозащитного экрана, чтобы учесть нагревание экрана во время эксплуатации. Результаты измерения приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты измерения источника с экраном без покрытия

<i>r</i> , м	<i>l</i> = 0,2 м				<i>l</i> = 0,4 м			
	<i>L</i> , Вт/(ср·м ²)	<i>q</i> , Вт/м ²	<i>T</i> _{возд} , °С	<i>T</i> _{поверх} , °С	<i>L</i> , Вт/(ср·м ²)	<i>q</i> , Вт/м ²	<i>T</i> _{возд} , °С	<i>T</i> _{поверх} , °С
0,4	1637,1	511,6	24,9	39,38	1776,0	555,0	25,8	50,8
0,5	1335,7	453,8	24,8	38,54	1690,9	528,4	25,7	49,6
0,6	1452,2	417,4	24,7	35,84	1569,9	490,6	25,6	48,4
0,7	1242,9	400,2	24,4	35,78	1367,7	427,4	25,0	47,8
0,8	1280,6	388,4	24,1	34,42	1142,4	357,0	24,8	46,8
0,9	1061,1	331,6	23,9	34,3	990,7	309,6	24,5	46,6
1,0	939,5	293,6	23,9	34,1	875,5	273,6	24,2	45,9
1,5	583,7	182,4	23,8	33,8	593,9	185,6	23,8	42,3

Аналогичным образом были измерены параметры теплового излучения источника при наличии экрана с оксидным покрытием, результаты измерения приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Результаты измерения источника со стеклянным экраном с покрытием ИТО

<i>r</i> , м	<i>l</i> = 0,2 м				<i>l</i> = 0,4 м			
	<i>L</i> , Вт/(ср·м ²)	<i>q</i> , Вт/м ²	<i>T</i> _{возд} , °С	<i>T</i> _{поверх} , °С	<i>L</i> , Вт/(ср·м ²)	<i>q</i> , Вт/м ²	<i>T</i> _{возд} , °С	<i>T</i> _{поверх} , °С
0,4	399,68	124,9	24,0	37,38	437,6	136,75	24,1	45,83
0,5	366,24	114,45	23,9	34,54	409,92	128,1	23,9	43,55
0,6	337,12	105,35	23,8	33,84	379,68	118,65	23,9	42,42
0,7	316,96	99,05	23,8	32,78	345,12	107,85	23,8	40,82
0,8	291,52	91,1	23,8	31,42	288,8	90,25	23,8	39,82
0,9	271,68	84,9	23,8	30,3	254,08	79,4	23,8	39,61
1,0	215,68	67,4	23,8	29,1	212,48	66,4	23,8	38,9
1,5	149,12	46,6	23,8	27,8	151,68	47,4	23,8	38,3

Расчет эффективности защиты от теплового излучения с помощью экранов проводился по формуле [150]:

$$\varepsilon = \frac{(q - q_3)}{q} \cdot 100 \%, \quad (3.16)$$

где q – интенсивность теплового излучения без применения защиты, Вт/м²,
 q_3 – интенсивность теплового излучения с применением защиты, Вт/м².

Результаты расчета эффективности экранов приведены в таблице 3.14. Наибольшую эффективность продемонстрировал экран с покрытием, установленный ближе к источнику.

Таблица 3.14 – 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

Ниже приведена эмпирическая зависимость, выведенная из полученных измерений, которая дает возможность рассчитать интенсивность теплового излучения q (Вт/м^2) на расстоянии r (м) от источника при наличии защитного экрана на расстоянии l (м) от источника ($l = 0$ – без экрана). Коэффициенты получены аппроксимацией данных.

Методика аппроксимации. Предположим степенную зависимость вида:

$$q_0(r) = A \cdot r^{-p}. \quad (3.17)$$

Линеаризуем выражение логарифмированием:

$$\ln q = \ln A - p \cdot \ln r, \quad (3.18)$$

т. е. строим регрессию $y = b + m \cdot x$ для $x = \ln r$, $y = \ln q$, тогда $b = \ln A$, $m = -p$.

Результаты регрессии, вычисленные по экспериментальным данным интенсивности теплового излучения в зависимости от расстояния до источника без экрана:

- среднее арифметическое значений натурального логарифма переменной r
- $\text{mean}(\ln r) \approx -0,3000$;

– среднее арифметическое значений натурального логарифма переменной q
 – $\text{mean}(\ln q) \approx 6,9950$.

Сумма квадратов отклонений x вычисляется по формуле:

$$S_{XX} = \sum (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.19)$$

где $\bar{x} = (1/n) \cdot \sum x_i$.

В результате вычисления по формуле (3.19) получим $S_{XX} \approx 1,2135$.

Сумма попарных отклонений x и y вычисляется по формуле:

$$S_{XY} = \sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}), \quad (3.20)$$

где $\bar{y} = (1/n) \cdot \sum y_i$.

В результате вычисления по формуле (3.20) получим $S_{XY} \approx -1,2265$.

m – наклон прямой регрессии, показывает, как изменяется y при единичном изменении x и вычисляется по формуле:

$$m = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}, \quad (3.21)$$

в результате вычислений получим $m \approx -1,103 \Rightarrow p = -m \approx 1,0103$.

b – сдвиг, значение y при $x = 0$, вычисляемый по формуле:

$$b = \text{mean}(\ln q) - m \cdot \text{mean}(\ln r), \quad (3.22)$$

в результате вычислений получим

$$b \approx 6,9944 - (-1,0103) \cdot (-0,3000) \approx 6,69196 \Rightarrow A = \exp(b) \approx 805,3.$$

Таким образом, получаем итоговую эмпирическую формулу для случая без экрана:

$$q_0(r) = 805,3 \cdot r^{-1,0103}, \text{ Вт/м}^2. \quad (3.23)$$

Результаты расчета интенсивности теплового излучения от расстояния без наличия экрана по эмпирической формуле (3.23) в сравнении с экспериментальными данными приведены на рисунке 3.35.

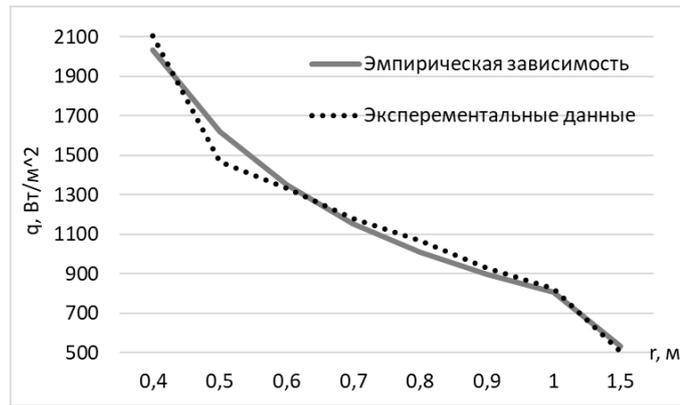


Рисунок 3.35 – Сравнение значений интенсивности теплового излучения, полученных по эмпирической зависимости и экспериментально

Дополним формулу с учетом наличия экрана. Предположим, что экран изменяет q_0 на коэффициент пропускания ($T_{l, type}$), который зависит от вида экрана (без покрытия / с покрытием) и слабо зависит от l в рассматриваемом интервале (0,2–0,4 м). Аппроксимация линейной зависимости по l :

$$T_{(l, type)} = T_{0type} + \alpha \cdot l, \quad (3.24)$$

где T_{0type} – коэффициент, зависящий от типа экрана;

α – коэффициент, зависящий от расстояния между экраном и источником, $\alpha = 0,05$,

l – расстояние между экраном и источником.

T_0 для двух вариантов экрана:

стекло без покрытия (uncovered): $T_{0uncovered} \approx 0,33$;

стекло с ИТО-покрытием: $T_{0covered} \approx 0,07$;

без экрана: $T \equiv 1$.

Получим полную зависимость с учетом экрана:

$$q(r, l, type) = q_0(r) \cdot (T_{0type} + \alpha \cdot l). \quad (3.25)$$

Подставим (3.23) в (3.25), а также коэффициенты T_{0type} и α , получим для экрана без покрытия:

$$q(r, l, type) = 805,3 \cdot r^{-1,0103} \cdot (0,33 + 0,05 \cdot l), \quad (3.26)$$

для экрана с покрытием:

$$q(r, l, type) = 805,3 \cdot r^{-1,0103} \cdot (0,07 + 0,05 \cdot l), \quad (3.27)$$

Результаты расчета интенсивности теплового излучения в зависимости от расстояния при наличии экрана ($l = 0,2$ м) без покрытия и с покрытием по эмпирическим формулам (3.26) и (3.27) приведены на рисунке 3.36, А и Б соответственно.

Результаты расчета интенсивности теплового излучения в зависимости от расстояния при наличии экрана ($l = 0,4$ м) без покрытия и с покрытием по эмпирическим формулам (3.26) и (3.27) приведены на рисунке 3.37, А и Б соответственно.

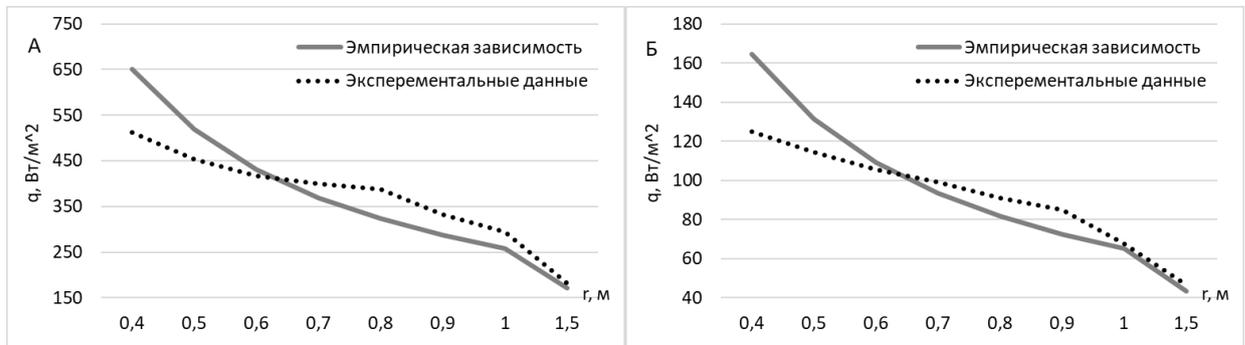


Рисунок 3.36 – Сравнение значений интенсивности теплового излучения, полученных по эмпирической зависимости и экспериментально при наличии экрана на расстоянии 0,2 м от источника: без покрытия (А) и с покрытием (Б)

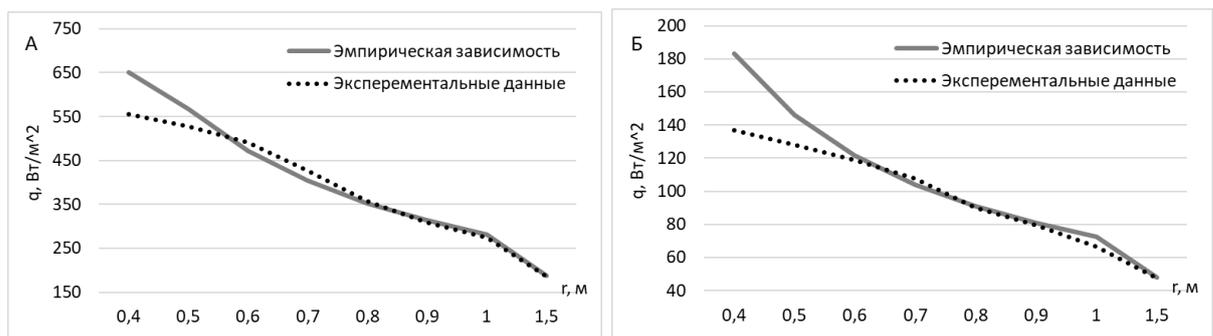


Рисунок 3.37 – Сравнение значений интенсивности теплового излучения, полученных по эмпирической зависимости и экспериментально при наличии экрана на расстоянии 0,4 м от источника: без покрытия (А) и с покрытием (Б)

Видим, что при наличии экрана для ближнего поля (для $r = 0,4$ и $0,5$ м), теоретическая зависимость достаточно сильно расходится с экспериментальными

данными. Это типично при малых величинах сигнала и/или при геометрических эффектах близкой зоны.

Чтобы снизить погрешность для ближнего поля, в качестве $q_0(r)$ возьмем ранее использованную аппроксимацию (3.23) и произведем подбор $T_{0_{type}}$ и α методом наименьших квадратов по четырем экспериментальным точкам для каждого типа ($r = 0,4, 0,5; l = 0,2, 0,4$).

Для экрана без покрытия: $T_{0_{uncovered}} = 0,2320$, $\alpha = 0,1683$. Подставив эти значения в (3.23), получим для экрана без покрытия:

$$q(r, l, type) = 805,3 \cdot r^{-1,0103} \cdot (0,2320 + 0,1683 \cdot l). \quad (3.28)$$

Для стекла с покрытием ИТО $T_{0_{covered}} = 0,05861$, $\alpha = 0,03558$. Подставив эти значения в (3.23), получим формулу для экрана с покрытием:

$$q(r, l, type) = 805,3 \cdot r^{-1,0103} \cdot (0,05861 + 0,03558 \cdot l). \quad (3.29)$$

Произведем расчет интенсивности теплового излучения со стеклом без покрытия и со стеклом с покрытием ИТО для $r = 0,4$ и $r = 0,5$ по формулам (3.28) и (3.29). Результаты представим в виде наглядных графиков на рисунках 3.38–3.39.

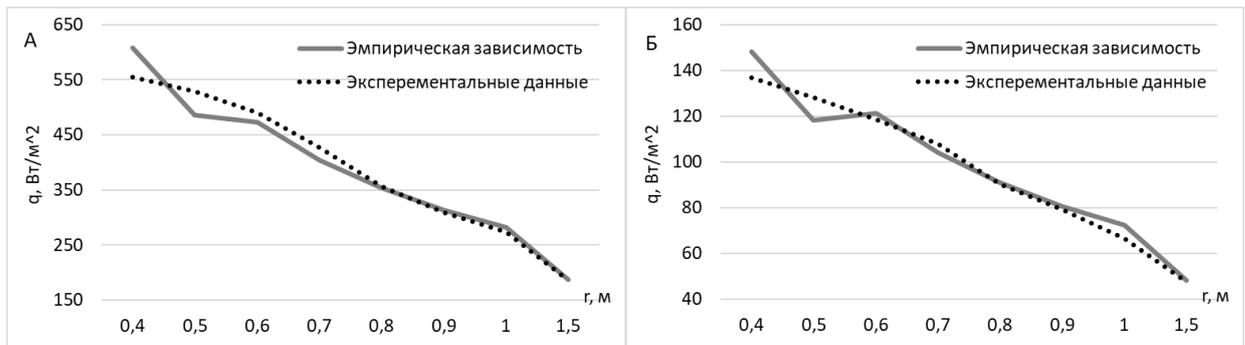


Рисунок 3.38 – Сравнение значений интенсивности теплового излучения, полученных по эмпирической зависимости, учитывающей ближнее поле, и экспериментально при наличии экрана на расстоянии 0,2 м от источника: без покрытия (А) и с покрытием (Б)

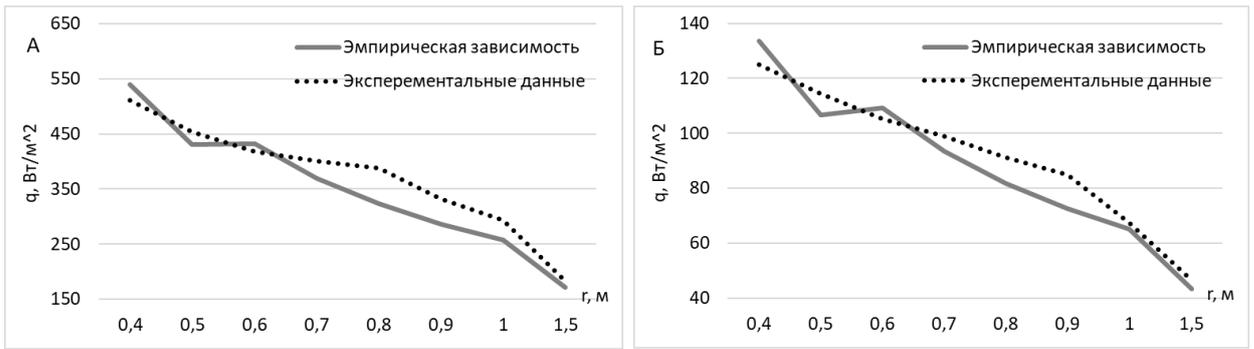


Рисунок 3.39 – Сравнение значений интенсивности теплового излучения, полученных по эмпирической зависимости, учитывающей ближнее поле, и экспериментально при наличии экрана на расстоянии 0,4 м от источника: без покрытия (А) и с покрытием (Б)

Количественная оценка соответствия теории (расчет по формуле) и эксперимента по наборам данных ($n = 8$ в каждом). Для каждой пары установлено: средняя погрешность – МЕ, средняя абсолютная ошибка – МАЕ, среднеквадратическая ошибка – RMSE, средняя относительная ошибка – MRE (%) и средняя абсолютная относительная ошибка – MAPE (%), коэффициент детерминации R^2 . Положительная МЕ означает, что теория в среднем завышает эксперимент; отрицательная – занижает. Результаты приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Результаты расчета оценки соответствия теории и эксперимента

Тип экрана	МЕ, Вт/м ²	МАЕ, Вт/м ²	RMSE, Вт/м ²	MAPE, Вт/м ²	R^2 , %
Без покрытия, $l = 0,4$ м	-2,67	19,42	26,60	4,14	0,953
С покрытием, $l = 0,4$ м	+1,10	4,56	6,00	4,35	0,958
Без покрытия, $l = 0,2$ м	-21,08	31,75	35,72	8,82	0,860
С покрытием, $l = 0,2$ м	-3,49	6,64	7,40	7,28	0,903

Погрешности по абсолютным величинам составляют несколько десятков Вт/м², относительные ошибки в среднем ~6 % (MAPE). Установленная зависимость дает хорошую сходимость ($R^2 \sim 0,9$).

Наилучшая сходимость из всех четырех наборов для экрана на расстоянии 0,4 м от источника – низкая относительная ошибка (~ 4 % MAPE) и высокий R^2 (~0,95). Теоретическая формула хорошо описывает данные для этого случая.

3.2.7 Измерение снижения уровня УФ-излучения оксидными покрытиями

Для оценки защитных свойств экранов с оксидными покрытиями от ультрафиолетового излучения использовалась установка, схема которой представлена на рисунке 3.40. В качестве источника УФ-излучения использовалась медицинская ультрафиолетовая лампа, соответствующая характеристикам типичных бактерицидных ламп. Образец стекла без покрытия и с покрытием размещался непосредственно у защищаемого объекта. Уровень УФ-излучения измеряли фотодетектором S302C, подключенным к прибору для измерения мощности и энергии излучения Thorlabs PM100D, результаты измерения выводились на персональный компьютер в специализированном ПО.

Математико-статистическая обработка полученных результатов осуществлялась с применением программного обеспечения Microsoft Excel 2010.

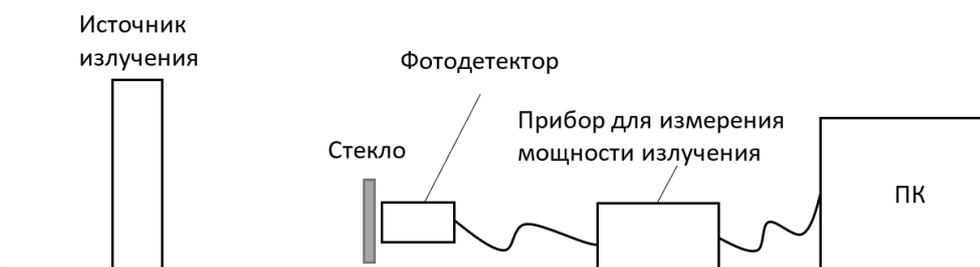


Рисунок 3.40 – Схема лабораторной установки для исследования защитных свойств экранов с оксидными покрытиями от ультрафиолетового излучения

Измеритель мощности с графическим дисплеем Thorlabs PM100D (рисунок 3.41, А) предназначен для высокоточной регистрации оптической мощности в широком спектральном диапазоне и широко применяется в лабораторных условиях при работе с лазерным и УФ-излучением. Фотодетектор S302C (рисунок 3.41, Б) представляет собой кремниевый сенсор, способный регистрировать интенсивность излучения в диапазоне от 200 до 1100 нм, что делает его подходящим для измерения УФ-излучения в ближнем и среднем диапазонах волн. Устройство обладает высокой чувствительностью, что позволяет точно фиксировать даже

незначительные изменения интенсивности при прохождении излучения через различные материалы.

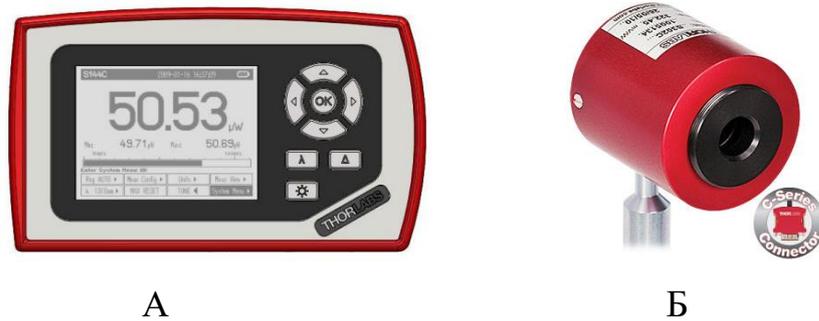


Рисунок 3.41 – Приборы для измерения мощности УФ-излучения: оптический измеритель мощности излучения Thorlabs PM100D (А); фотодетектор S302C (Б)

Эксперимент проводился в лабораторных условиях. Ультрафиолетовая лампа размещалась на расстоянии 20 см от фотодетектора. Такое расстояние позволяло избежать перегрузки сенсора фотодетектора и обеспечивало равномерное освещение площади приемной поверхности.

На поверхность фотодетектора поочередно устанавливались образцы кварцевого стекла с нанесенными оксидными покрытиями различного состава и толщины. В качестве контрольных значений регистрировалась интенсивность излучения без стекла, а также через чистое кварцевое стекло без покрытия, что позволяло установить свойства кремниевой подложки.

Измерения проводились при трех длинах волн, на которые приходились максимумы излучения источника, исходя из анализа спектра излучения:

1) 200 нм – глубокий УФ-диапазон, практически полностью поглощается атмосферой Земли и представляет собой наиболее опасную область спектра. На этой длине волны особенно важно оценить степень блокировки излучения, поскольку такие волны обладают высокой энергией и способны вызывать разрушение материалов и полимеров, а также повреждение структуры ДНК;

2) 260 нм – ближний УФ-диапазон, обладающий высокой биологической активностью;

3) 315 нм – ближний УФ-диапазон, вызывающий фотохимические реакции.

Зарегистрированные значения выражались в милливаттах – это единица измерения мощности излучения. В контексте проводимого опыта, чем меньше зафиксированное значение мощности, тем большую часть УФ-излучения поглощает или отражает покрытие, а значит, тем выше его защитные свойства.

В результате измерений была получена количественная оценка степени пропускания УФ-излучения через различные оксидные покрытия при заданных длинах волн. Погрешность измерений по показаниям самого прибора в момент проведения эксперимента составила 0,3 мВт. Ниже представлена таблица 3.16 с полученными значениями.

Таблица 3.16 – Результаты измерений мощности УФ-излучения от источника без экрана и с экранами

Тип экрана	Кол-во слоев	Мощность при 200 нм, мВт	Мощность при 260 нм, мВт	Мощность при 315 нм, мВт
Без экрана	-	4	4	3,9
Кварцевое стекло (без покрытия)	-	2,95	2,93	3,1
Кварцевое стекло с покрытием ZrO_2	2	0,528	2,680	2,615
Кварцевое стекло с покрытием ZrO_2	5	0,081	2,468	2,490
Кварцевое стекло с покрытием ZnO	2	2,975	2,973	2,917
Кварцевое стекло с покрытием ZnO	5	2,996	2,955	2,933
Кварцевое стекло с покрытием NiO	2	0,285	0,837	0,898
Кварцевое стекло с покрытием NiO	5	0,281	1,072	1,074
Кварцевое стекло с покрытием CuO	2	0,060	0,918	0,951
Кварцевое стекло с покрытием CuO	5	0,065	0,670	0,639
Кварцевое стекло с покрытием Y_2O_3	5	2,468	2,765	2,870
Кварцевое стекло с покрытием Y_2O_3	10	2,487	2,775	2,801
Кварцевое стекло с покрытием TiO_2	2	0,397	2,305	2,523
Кварцевое стекло с покрытием ИТО	10	0,015	1,102	2,389

Измерения показали, что эффективность покрытия практически не зависит от длины волны, на которую приходится максимум излучения. Для расчета эффективности была использована формула (3.16), результаты расчетов приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Эффективность экранирования УФ излучения стеклами с оксидными покрытиями

λ , нм	Эффективность, %						
	Ст.	ZrO ₂ , 60 нм	ZrO ₂ , 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
λ , нм	Эффективность, %						
	Ст.	CuO, 60 нм	CuO, 150 нм	Y ₂ O ₃ , 150 нм	Y ₂ O ₃ , 300 нм	TiO ₂ , 60 нм	ITO, 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 основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Само по себе кварцевое стекло нельзя считать хорошей защитой от УФ-излучения, так как оно лишь незначительно снижает интенсивность.

2. На длине волны 200 нм (жесткий УФ-С-диапазон) наибольшую эффективность экранирования демонстрируют покрытия на основе ITO (99 %) и CuO (~98 %), что делает их практически абсолютными барьерами для излучения этой длины волны. Высокую эффективность (>90 %) также показывают покрытия NiO (~92 %), ZrO₂ (до 97 % для толщины 150 нм) и TiO₂ (90 %).

3. В области 260 нм наиболее эффективными оказались покрытия из пяти слоев оксида меди и двух слоев оксида никеля, эти покрытия заблокировали более 75 % излучения. Высокую эффективность сохраняет ITO (~70 %). Хуже всего себя проявили покрытия из оксида цинка и оксида иттрия. Их эффективность сопоставима с чистым кварцевым стеклом.

4. В области 315 нм результаты исследования экранирования пленки толщиной 60 нм NiO (72–76 %) и 150 нм CuO (75–83 %) подтверждают их статус

наиболее эффективных покрытий в ближней УФ-области. Эффективность ИТО заметно снижается до 40 %. Покрытия ZrO_2 и TiO_2 обеспечивают умеренную защиту (32–35 %). ZnO и Y_2O_3 практически неэффективны, их показатели близки к стеклу без покрытия.

5. В результате эксперимента лучшую комплексную защиту на всех длинах волн показали покрытия из оксида меди и оксида никеля. Также следует отметить, что увеличение слоев не всегда приводит к улучшению защиты в ультрафиолетовом диапазоне. Например, два слоя оксида никеля оказались эффективнее или сопоставимы с пятью слоями, что может быть связано с равномерностью нанесения покрытия и оптическими свойствами составов.

Полученные результаты позволяют сформировать предварительную оценку эффективности различных оксидных покрытий и могут быть использованы для дальнейшего моделирования и оптимизации защитных слоев в условиях промышленного применения. Высокоэффективные оксидные покрытия, подобные исследованным, могут быть использованы для создания нового поколения средств индивидуальной и коллективной защиты в производственных процессах, связанных с интенсивным УФ-излучением, таких как сварочные работы, газопламенная и плазменная резка, работы с лазерами УФ-диапазона, в гальванических цехах и др. Для СИЗ глаз и лица (щитки сварщика, защитные окна постов, ограждения) оптимальными оксидными покрытиями будут NiO , CuO , ИТО. Для защиты кожи (прозрачные экраны, окна кабин, элементы спецодежды) оптимальными материалами являются NiO и CuO . Для специализированной защиты от жесткого УФ (лазерные установки, оборудование для фотолитографии, бактерицидные лампы) наиболее подходят материалы ZrO_2 и ИТО.

3.2.8 Оценка погрешности результатов измерений

Погрешности измерений интенсивности ИК-излучения при проведении эксперимента оценивались с учетом инструментальной и методической погрешности.

Погрешность радиометра БВЕК43 1110.10 РЭ определялась паспортными данными средства измерения, основная приведенная погрешность прибора в используемом диапазоне измерений плотности потока энергии (Вт/м^2) не превышает $\pm 5\%$.

Методическая погрешность эксперимента включает влияние геометрии измерений – неидеальность взаимного расположения источника, экрана и приемника радиометра. Особенно критична точность соблюдения угла визирования (угла между нормалью к поверхности приемника и направлением на источник), так как энергетическая светимость подчиняется закону косинуса (закон Ламберта). Погрешность позиционирования оценивалась в $\pm 2^\circ$, что могло привести к дополнительной относительной погрешности до $\pm 0,6\%$. Влияние внешних факторов – учет возможного влияния конвективных потоков нагретого воздуха от источника на термостабилизацию приемника радиометра, а также фонового ИК-излучения от окружающих объектов. Для минимизации данного фактора измерения проводились в контролируемых лабораторных условиях, а радиометр перед каждым циклом измерений калибровался по «нулевому» фону. Остаточная погрешность от данного фактора оценивается не более $\pm 1\%$. Нестабильность источника излучения – кварцевый инфракрасный обогреватель Timberk TCH Q2 800, несмотря на номинальную мощность 800 Вт, мог иметь нестабильность выходного излучения, связанную с колебаниями сетевого напряжения и температурным дрейфом ТЭНа. Для ее оценки проводились серии контрольных измерений интенсивности от источника без экрана с интервалами во времени. Стандартное отклонение в этих сериях не превышало $\pm 1,5\%$. Неоднородность защитного покрытия на экране – визуально наблюдаемая и подтвержденная микроскопическими исследованиями неидеальность нанесения оксидного слоя могла приводить к локальным вариациям коэффициентов отражения и поглощения. Это вносило погрешность в результаты, зависящую от конкретной точки измерения на экране. Для ее снижения измерения с каждым типом экрана проводились в нескольких точках, а результат усреднялся. Вклад данной погрешности в общую оценен в $\pm 2\%$.

Суммарная относительная погрешность прямого измерения плотности потока ИК-излучения (E , Вт/м²) в каждом опыте рассчитывалась как корень квадратный из суммы квадратов основных составляющих (рассмотренных как некоррелированные):

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\text{приб}}^2 + \delta_{\text{геом}}^2 + \delta_{\text{фон}}^2 + \delta_{\text{ист}}^2 + \delta_{\text{покр}}^2}, \quad (3.30)$$

где $\delta_{\text{приб}}^2$ – инструментальная погрешность, 5 %;

$\delta_{\text{геом}}$ – погрешность позиционирования, 0,6 %;

$\delta_{\text{фон}}$ – погрешность учета фона, 1 %;

$\delta_{\text{ист}}$ – нестабильность источника, 1,5 %;

$\delta_{\text{покр}}$ – неоднородность покрытия, 2 %.

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{25 + 0,36 + 1 + 2,25 + 4} \approx \pm 5,7 \text{ \%}.$$

Таким образом, расширенная относительная погрешность (при доверительной вероятности $P = 0,95$) прямых измерений интенсивности ИК-излучения не превышала ± 6 %.

Аналогичным образом оценивались погрешности результатов измерений ультрафиолетового излучения.

Инструментальная погрешность измерительного комплекса (Thorlabs PM100D + фотодетектор S302C), согласно документации, не превышает ± 3 % в рабочем диапазоне длин волн (200–350 нм) при заданной температуре. Погрешность измерения мощности оптического излучения PM100D, указанная в паспорте, составляет ± 1 % от измеряемого значения в используемом диапазоне. Суммарная инструментальная погрешность оценивается как

$$\delta_{\text{приб}} \approx \sqrt{3^2 + 1^2} \approx \pm 3,2 \text{ \%}.$$

Методическая погрешность эксперимента.

1. Спектральная неоднородность источника (УФ-лампа): оцененный вклад данной погрешности составляет $\approx \pm 2$ %.

2. Стабильность источника УФ-излучения: мощность излучения ртутной лампы зависит от температуры разряда, напряжения питания и времени работы. Для минимизации дрейфа параметров перед каждым циклом измерений осуществлялся 15-минутный прогрев лампы. По результатам контрольных измерений интенсивности в фиксированной точке без образца стандартное отклонение не превышало $\pm 1,5\%$.

3. Геометрические факторы: точность позиционирования образца перпендикулярно к оптической оси «источник – детектор», параллельность рабочих поверхностей, а также повторяемость расстояния (20 см). Отклонение от перпендикуляра на $\pm 2^\circ$ может привести к изменению измеряемого потока из-за отражений и изменения оптического пути. Совокупная погрешность от геометрических факторов оценивается в $\pm 1\%$.

4. Неоднородность оксидных покрытий $\approx \pm 2\%$.

5. Фоновое излучение: вклад рассеянного УФ-излучения от лампы и возможной засветки от других источников. Измерения проводились в затемненном помещении, а перед каждой серией замерялся сигнал при закрытом детекторе (темновой ток). Погрешность от фона не превышала $\pm 0,5\%$.

Суммарная относительная погрешность прямого измерения мощности УФ-излучения составила:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{10,24 + 4 + 0,25 + 1 + 4 + 0,25} \approx \pm 4,7\%.$$

Таким образом, расширенная относительная погрешность прямых измерений мощности УФ-излучения не превышала $\pm 5\%$.

3.3 Выводы по главе 3

1. Для получения защитных оксидных покрытий на больших и сложных поверхностях изучен экстракционно-пиролитический метод.

2. Впервые данным методом получены оксидные пленки для защиты от ИК- и УФ-излучения. В частности, впервые получены пленки сложных оксидов

циркония-лантана, циркония-иттрия и лантан-церия для защиты от ИК-излучения. Для защиты от УФ-излучения получены пленки оксидов иттрия, циркония, цинка, титана, никеля, меди, индия-олова.

3. Исследования термического разложения экстрактов металлов показали, что термическое разложение органической фазы и образование твердой фазы оксидов происходит в узком диапазоне температур для всех экстрактов металлов.

4. Определена зависимость защитных свойств покрытий от параметров микроструктуры пленок для выбора режимов синтеза наиболее эффективных покрытий в УФ- и ИК-диапазоне.

5. Полученные результаты спектроскопии демонстрируют возможность управления оптическими характеристиками стекол за счет варьирования состава нанопокровов, что перспективно для решения задач защиты от УФ- и ИК-излучения, модуляции прозрачности стекол, просветления оптики и т. д. [151].

6. Исследование спектров пропускания в ИК-диапазоне пленок сложных оксидов на стекле, полученных ЭП-методом при различных температурах, различной толщины позволили оптимизировать составы, толщины и температуры отжига пленок для получения наиболее эффективных теплозащитных покрытий в зависимости от диапазона ИК-излучения.

7. Исследования спектров пропускания в УФ-диапазоне позволили выявить новые составы пленок, такие как ZrO_2 , CuO , NiO , ИТО эффективно задерживающие УФ-излучение.

8. Расчеты ширины запрещенной зоны защитных покрытий с использованием уравнения Тауца выявили диапазоны эффективности оксидных покрытий для защиты в различных диапазонах спектра УФ-излучения.

9. Проведены испытания задержки теплового излучения в модельном эксперименте на опытном образце теплозащитного экрана, а также испытания по снижению УФ-излучения на опытном образце УФ-защитного экрана.

10. Оценка погрешности выполненных измерений показала точность проведенных исследований.

Глава 4. УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ЛИТЕЙНОГО, ТЕРМИЧЕСКОГО И СВАРОЧНОГО ЦЕХОВ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ И АПРОБАЦИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЙ

Настоящая глава посвящена прикладной реализации результатов исследования, направленной на улучшение условий труда на рабочих местах с источниками оптического излучения инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. В ней представлены практические рекомендации по применению разработанных оксидных покрытий, а также конструкции и результаты опытно-промышленной апробации двух типов защитных экранов – теплозащитных и УФ-защитных. Задачи данной главы: 1) разработка рекомендаций на основе полученных составов; 2) конструирование и изготовление опытных образцов; 3) экспериментальная оценка их эффективности; 4) экономическое обоснование использования оксидных защитных покрытий.

4.1 Рекомендации

Предлагаемые практические рекомендации по защите от теплового и ультрафиолетового излучения сформулированы на основании экспериментальных данных, полученных в главе 3. Анализ спектров пропускания, оптических и эксплуатационных свойств синтезированных оксидных покрытий позволил установить корреляцию между их составом, режимами получения и эффективностью селективного ослабления излучения в заданных диапазонах. Ниже изложены технологические и организационные меры, базирующиеся на этих результатах и направленные на достижение нормативных уровней воздействия на конкретных рабочих местах.

Для обеспечения качества наносимых покрытий важно соблюдать следующую методику получения покрытий:

- 1) проверка и подготовка пленкообразующих растворов перед нанесением;

- 2) подготовка подложки, которая включает обеспыливание и обезжиривание органическим растворителем – толуолом;
- 3) равномерное нанесение покрытия;
- 4) выдержка покрытия в мокром состоянии в течение 3х минут для достижения эффекта самовыравнивания;
- 5) равномерный отжиг покрытия.

Сравнение спектров пропускания исследованных тонкопленочных покрытий показало, что наибольшей эффективностью обладают покрытия $ZrO_2-Y_2O_3$ толщиной 300 нм, полученные при температуре отжига $700\text{ }^\circ\text{C}$, $La_2O_3-ZrO_2$ толщиной 450 нм, полученные при температуре $600\text{ }^\circ\text{C}$, и пленка $In_2O_3-SnO_2$ толщиной 450 нм, отожженная при $700\text{ }^\circ\text{C}$, как показано на рисунке 4.1. Для сравнения на рисунке 4.1 также приведен спектр подложки без покрытия.

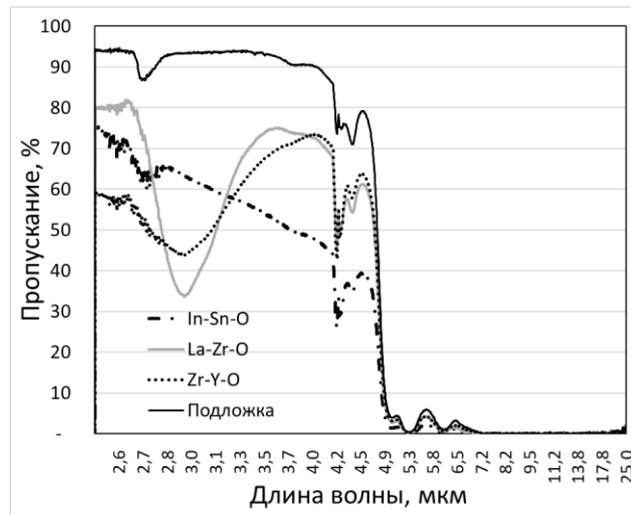


Рисунок 4.1 – Спектры пропускания в ИК-диапазоне пленок $Zr-Y-O$, $La-Zr-O$ и $In-Sn-O$ в сравнении со спектром подложки

Полученные результаты показывают, что в ИК-области в диапазоне 2,6–2,5 мкм наибольшую эффективность имеет пленка $Zr-Y-O$ толщиной 300 нм, отожженная при $700\text{ }^\circ\text{C}$. В диапазоне 3,3–2,6 мкм больше остальных покрытий снижает прозрачность пленка $La-Zr-O$ толщиной 450 нм, отожженная при $600\text{ }^\circ\text{C}$. В диапазоне 4,8–3,3 мкм наибольшее снижение прозрачности наблюдается для покрытия пленки $In-Sn-O$ толщиной 450 нм, отожженной при $700\text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, в зависимости от температуры источника может быть использовано покрытие состава, имеющего наибольшую эффективность в диапазоне длин волн, на который приходится максимум излучения источника. Так, для источников с температурой поверхности около 1200 °С максимум излучения, согласно закону смещения Вина, приходится на длину волны 2,5 мкм и наибольшей эффективностью обладает покрытие Zr-Y-O, для источников с температурой поверхности около 1000 °С максимум излучения приходится на длину волны 3,0 мкм и наибольшей эффективностью обладает покрытие La-Zr-O, для источников с температурой поверхности 700 °С максимум излучения приходится на длину волны 4,2 мкм и наибольшей эффективностью при температуре источников 700 °С и ниже обладает покрытие In-Sn-O.

Конкретные рекомендации по применению составов покрытий в зависимости от температуры излучения и спектрального состава излучения источников литейных и термических цехов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Составы покрытий для защиты от излучения разных видов источников литейного и термического цеха

Тип цеха	Источник излучения	Средняя температура поверхности источника, °С	Диапазон длин волн основного излучения	Максимум излучения (λ_{max})	Рекомендуемый состав и режим получения защитного оксидного покрытия
1	2	3	4	5	8
Литейный	Печь для газовой сушки песка	200–400	Дальнее ИК-С	6,1–4,3 мкм (дальний ИК)	Пленка In-Sn-O (оксид индия-олова), толщина 450 нм, отжиг при 700 °С.
Литейный	Жидкий металл	1300–1600	ИК, видимое,	1,8–1,5 мкм (средний ИК)	Пленка Zr-Y-O (оксид циркония-иттрия), толщина 300 нм, отжиг при 700 °С

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	8
Литейный,	Газовый стенд подогрева ковшей	800–1100	ИК, видимое	2,7–2,3 мкм (средний ИК)	Пленка Zr-Y-O (оксид циркония- иттрия), толщина 300 нм, отжиг при 700°C. <i>Для верхней части диапазона: La-Zr- O (450 нм, 600 °C)</i>
Литейный, термический	Горячая металличе- ская заготовка	800–1200	ИК, видимое	2,7–1,9 мкм (средни й ИК)	
Термический	Соляная электродна я ванна	750–1000 (поверхно сть расплава)	ИК, видимое	2,8–2,2 мкм (средни й ИК)	
Термический	Газовая печь для термообра- ботки	700–1300	ИК, видимое	2,9–1,8 мкм (средний ИК)	
Термический	Электро- печь	600–1100	ИК	3,3–2,1 мкм (средний ИК)	Пленка La-Zr-O (оксид лантана- циркония), толщина 450 нм, отжиг при 600 °C. <i>Дополнительно для верхней границы диапазона: Пленка Zr-Y-O (300 нм, 700 °C)</i>
Термический	Индукци- онная печь	1200– 1500 (стенк и тигля)	ИК, видимое	1,9–1,6 мкм (средний ИК)	Zr-Y-O (300 нм, 700°C) От видимой части излучения NiO (оксид никеля толщиной 150 нм, температура отжига 500 °C)
Литейный, Термический	Открытое техноло- гическое пламя (факел)	1200–1900	ИК, видимое, УФ	1,9–1,3 мкм (ближ- ний + средний ИК)	Zr-Y-O (300 нм, 700 °C) От видимой и УФ части излучения NiO (150 нм, 500 °C)

Покрyтия, защищающие в УФ-диапазоне излучения, имеют разную эффективность в зависимости от длины волны излучения. На рисунке 4.2 приведено сравнение эффективности покрытий разных составов в зависимости от диапазона УФ-излучения.

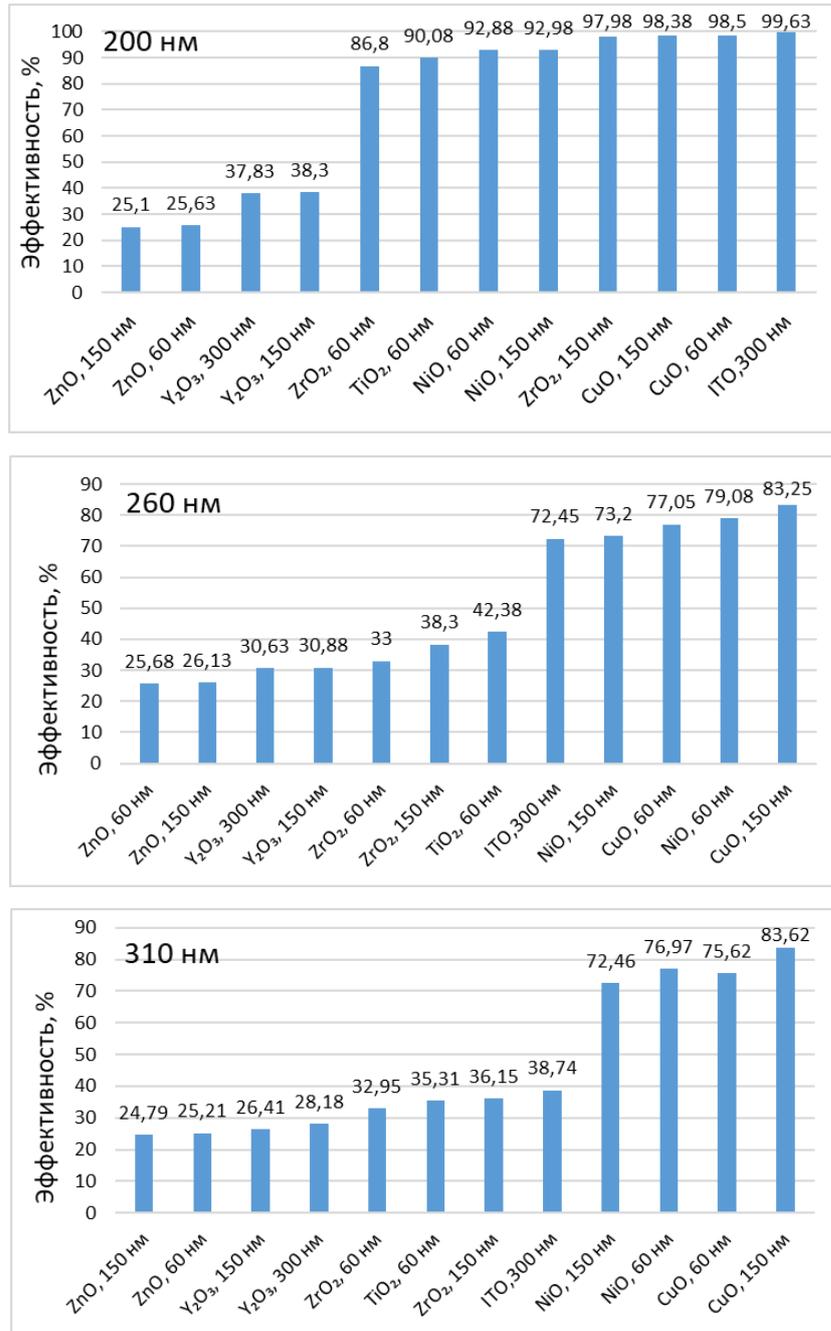


Рисунок 4.2 – Эффективность покрытий на 200 нм; на 260 нм; на 310 нм

На основании проведенных исследований разработаны следующие рекомендации:

- Использовать теплозащитные экраны в зонах разлива металла, на расстоянии 0,4–0,6 м от источника.
- Располагать УФ-защитные экраны между сварщиками и смежными рабочими местами, обеспечивая угол перекрытия не менее 120°.

- Использовать стеклянные экраны с оксидными покрытиями, обеспечивающими снижение пропускания ИК в зависимости от температуры источника.

- Использовать стеклянные экраны с оксидными покрытиями, блокирующими УФ преимущественно в диапазонах УФ-А и УФ-В на 80–99 %.

- Для участков с источниками УФ-излучения, возле которых находятся рабочие места персонала, не связанного с работой с данными источниками, или проходят маршруты перемещения персонала, рекомендуется устанавливать УФ-защитные экраны для предотвращения воздействия излучения на окружающий персонал.

- Устанавливать экраны, обращая их покрытиями к источнику.

- Проводить ежегодную проверку состояния покрытий, так как эффективность защиты зависит от отсутствия дефектов.

- Комбинировать экраны с вентиляционными системами для предотвращения локального перегрева.

- Контролировать уровни излучения после установки экранов для обеспечения соответствия нормативам.

4.2 Апробация защитных конструкций на основе оксидных покрытий

Проектирование экранов осуществлялось на основе анализа теплотехнических характеристик материалов, их устойчивости к температуре и излучению, а также условий эксплуатации в цехах.

Основной конструктивный принцип защитных экранов – сочетание прозрачного несущего материала (стекло) и функционального оксидного покрытия, уменьшающего пропускание инфракрасного и/или ультрафиолетового излучения.

Для прозрачной основы использовалось кварцевое стекло толщиной 4–6 мм. Преимущества стеклянной основы:

- термостойкость до 1100 °С;

- химическая стойкость;
- отсутствие деградации свойств при воздействии УФ- и ИК-излучения;
- возможность нанесения многослойных оксидных покрытий.

Функциональные покрытия были получены экстракционно-пиролитическим методом, который обеспечивает:

- равномерность покрытия;
- высокую адгезию к стеклянной основе;
- контролируемые оптические характеристики;
- низкую себестоимость процесса;
- экологическую и технологическую безопасность.

Разработано два типа защитных устройств. Первый тип – теплозащитные экраны для рабочих мест с источниками интенсивного инфракрасного излучения в литейном и термическом цехах, обеспечивающие снижение интенсивности теплового потока за счет частичного отражения ИК-диапазона, уменьшения коэффициента радиационного теплообмена и оптимизации геометрии и расстояния. Второй тип – УФ-защитные экраны для сварочных постов, обеспечивающие блокировку УФ-С- и УФ-В-диапазона при сохранении частичной прозрачности. Для обоих типов конструкций предусмотрены металлические рамы, регулируемые элементы фиксации и возможность изменения угла установки.

Экран разработан для особо опасных работ при непосредственном контакте с горячими поверхностями и деталями. Использование данного экрана предоставляет ряд преимуществ по сравнению с традиционными щитками из поликарбоната.

Стекло с нанесенным оксидным покрытием способно выдерживать высокие температуры без деформации или изменения своих свойств. При нагреве поликарбоната от 120 °С материал начинает деформироваться и терять форму. Также при повышении температур до 500 °С, полимер способен воспламеняться и хорошо гореть. При таком процессе выделяются токсичные вещества и дым. Поэтому полимер не может быть равноценной заменой стеклу.

Стекло с термозащитным покрытием без тонирования также обеспечивает постоянную видимость для точного выполнения задач и контроля процесса работы, в то время как поликарбонат при воздействии высоких температур со временем становится мутным, что снижает видимость.

Оксидные покрытия также улучшают долговечность и износостойкость материалов, на которые они наносятся. Так, стекло с пленкой, обладая высокой устойчивостью к царапинам и химическому воздействию, снижает частоту замены щитков. Поликарбонатные щитки, хотя и легкие и относительно прочные, склонны к царапинам и химическому повреждению, что сокращает срок их службы и требует частой замены.

Разработанная конструкция теплозащитного экрана, показанная на рисунке 4.3, представляет собой прозрачный защитный модуль в металлической раме, оснащенный оксидным отражающим покрытием, нанесенным экстракционно-пиролитическим методом.

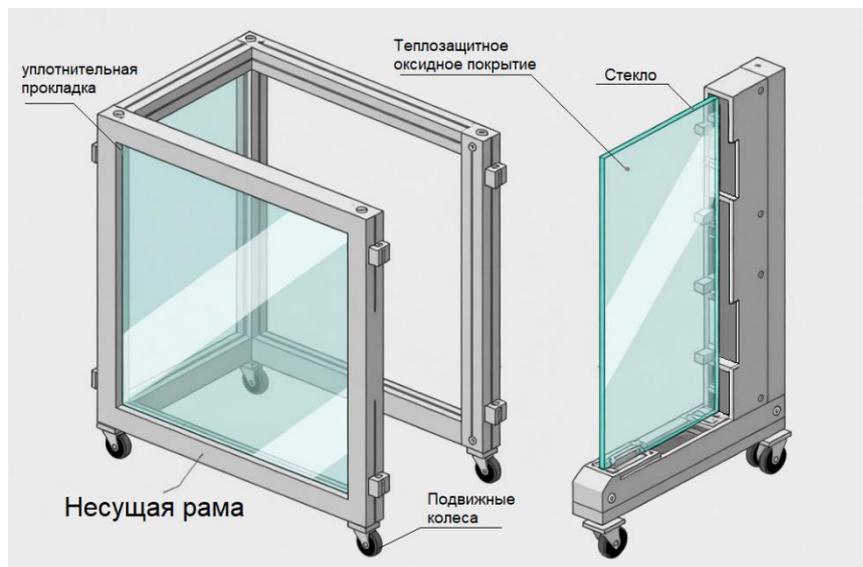


Рисунок 4.3 – Конструкция теплозащитного экрана для литейного и термического цехов

Экран обеспечивает снижение интенсивности теплового излучения до нормативных значений при сохранении визуального контроля технологических операций. Конструкция адаптирована к условиям литейных и термических цехов,

обеспечивает устойчивость к тепловому воздействию и может использоваться как стационарное или мобильное средство коллективной защиты работников.

Несущая рама изготовлена из жаростойкого металлического профиля (сталь 20, 12Х18Н10Т или аналог), обеспечивающего жесткость конструкции и возможности крепления защитных стеклянных модулей различной толщины. Периметр рамы оснащен уплотнительными прокладками, предотвращающими передачу механических напряжений к стеклу при тепловом расширении. Основным функциональным элементом экрана является прозрачная панель, изготовленная из термостойкого кварцевого стекла толщиной 4–6 мм. Использование прозрачной основы позволяет обеспечить визуальный контроль производственных процессов, не нарушая обзор и не ухудшая безопасность операций. Ключевым элементом конструкции является многослойное оксидное покрытие, нанесенное на поверхность стекла. Покрытие выполняет функции отражения ИК-излучения (за счет высоких значений коэффициентов отражения в диапазоне 0,7–10 мкм), снижения теплопроводности и лучистого теплообмена между источником и работником, уменьшения пропускания УФ-излучения в зависимости от состава покрытия. Металлическая платформа на колесах позволяет перемещать экран между рабочими местами, ее удобно использовать при временных операциях (разлив металла, снятие литников, резка).

Экран является прозрачным тепловым барьером. Многослойное оксидное покрытие (например, Zr-Y-O) работает как селективное зеркало в ИК-диапазоне. Оно отражает значительную часть ИК-излучения обратно к источнику или в сторону. При этом сохраняется высокая прозрачность в видимом спектре для обзора. Интенсивность теплового излучения, достигающего рабочего места, снижается, как будет показано в результатах внедрения (п. 4.3), с 150–650 Вт/м² до нормативных 70–140 Вт/м². Это напрямую устраняет риск тепловых ожогов и снижает лучистый нагрев тела работника. Тела в рабочей зоне (оборудование, пол, стены), будучи защищены от прямого ИК-потока, нагреваются значительно меньше. Поскольку эти тела не нагреваются, они перестают быть вторичными источниками тепла, которые обычно нагревают окружающий воздух. Экран сам,

поглощая небольшую часть энергии, нагревается, но его конструкция и высокая термостойкость позволяют минимизировать этот вклад.

Разработанная конструкция экрана для защиты от ультрафиолетового излучения (рисунок 4.4) схожа с конструкцией теплозащитного экрана и представляет собой прозрачный защитный модуль на облегченной алюминиевой или полимерной раме, оснащенный многофункциональным оксидным покрытием на основе оксидов никеля (NiO), циркония (ZrO) и индия-олова (ITO) нанесенных экстракционно-пиролитическим методом.

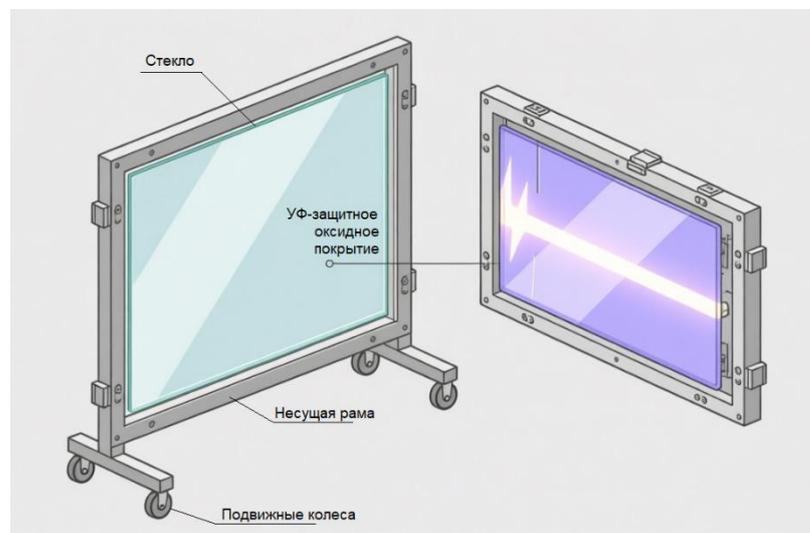


Рисунок 4.4 – Конструкция УФ-защитного экрана (А) и УФ-защитного стекла (Б) для сварочного цеха

Экран обеспечивает селективное поглощение и отражение жесткого ультрафиолетового излучения (УФ-А- и УФ-В-диапазона) до гигиенически нормативных значений при сохранении высокого светопропускания в видимой области спектра, что гарантирует отсутствие искажений и полноценный визуальный контроль технологических операций. Конструкция адаптирована к условиям рабочих мест с источниками УФ-излучения (сварочные посты), обеспечивает устойчивость к фотохимической деградации и влажности. Экран может использоваться в качестве стационарного, мобильного или индивидуального (в формате защитного щитка) средства коллективной и индивидуальной защиты работников.

4.3 Результаты внедрения экранов на основе оксидных покрытий на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов

Оценка эффективности проводилась в два этапа: расчетный и экспериментальный.

Использовались следующие методы:

1. Расчет теплового излучения источников по закону Стефана – Больцмана с учетом коэффициента излучения и температуры поверхностей.
2. Учет геометрического фактора для источника конечных размеров на заданном расстоянии.
3. Расчет ослабления теплового потока экраном с учетом коэффициентов отражения, пропускания и поглощения оксидного покрытия.
4. Оценка УФ-защиты на основе спектрофотометрических данных (коэффициентов пропускания в диапазоне 200–400 нм).

Экспериментальные исследования включали:

- 1) измерение теплового потока пирометром и ИК-радиометром;
- 2) измерение температуры и скорости движения воздуха анемометром;
- 3) измерение УФ-излучения УФ-радиометром;
- 4) фиксацию расстояния и размеров экрана;
- 5) оценку визуальной прозрачности и влияния на рабочий процесс;
- 6) анализ изменений до и после установки экранов.

Опытно-промышленная апробация была проведена в действующих литейном, термическом и сварочном цехах.

4.3.1 Литейный и термический цеха

На основании анализа технологического процесса и оборудования литейного цеха теплозащитные экраны на основе кварцевого стекла с селективными оксидными покрытиями рекомендуется применять в качестве стационарных или мобильных средств коллективной защиты на следующих операциях и участках: на постоянных рабочих постах у индукционных печей в период плавки, в зоне

подогрева ковшей, на участках заливки металла в формы, в зонах первичного охлаждения крупных отливок, у печей для сушки песка.

В рамках работы были определены точки для установки теплозащитных экранов и технологические процессы для их применения:

– у стационарных индукционных печей на постоянных рабочих постах сталеваров и операторов печей, откуда ведется наблюдение за процессом плавки, взятием проб или выпуском металла. Экраны устанавливаются между печью и рабочим местом непосредственно в период плавки и выпуска жидкого металла ($t \sim 1800$ °C), когда тепловое излучение максимально;

– в зоне газового стенда для подогрева ковшей – между стендом и рабочим местом огнеупорщика во время прогрева ковшей перед приемом металла;

– на участке заливки металла в формы – вокруг стационарных заливочных площадок в период заливки расплава из ковша в литейные формы, когда источниками излучения являются струя металла и сам ковш. Для гибкого позиционирования особенно полезны мобильные экраны;

– у печи для газовой сушки песка – на рабочих местах сушильщиков, осуществляющих загрузку/выгрузку и контроль процесса в течение цикла сушки при открытых технологических проемах или дверцах печи.

Для защиты термиста от интенсивного теплового излучения в термическом цехе разработанные экраны целесообразно применять на следующих технологических операциях и участках термического цеха:

– перед загрузочными проемами газовых и электрических печей в моменты их открытия для загрузки или выгрузки деталей;

– в зонах промежуточной выдержки и транспортировки раскаленных заготовок, а также вокруг зон охлаждения горячих заготовок;

– у закалочных баков в момент операции закалки.

Дополнительно для рабочих мест термистов рекомендовано внедрить регламентированные технологические перерывы, длительность и периодичность перерывов не менее 10 минут через каждые 30 минут непрерывной работы в условиях интенсивной тепловой нагрузки (во время загрузки и разгрузки печей), с

помощью обеспечения ротации персонала между операциями с высокой и умеренной тепловой нагрузкой в течение рабочей смены.

Измерения параметров микроклимата проводились в соответствии с методикой, описанной в Приказе Минтруда России от 21.11.2023 № 817н [132] и МУК 4.3.4120-25 [152]. Измерительные приборы: радиометр теплового излучения БВЕК43 1110.10 РЭ, анемометр TROTEC BA16, «Метеоскоп-М +(плюс)».

Схема установки экранов в литейном и термическом цехах и точки измерения показаны на рисунках 4.5–4.7.

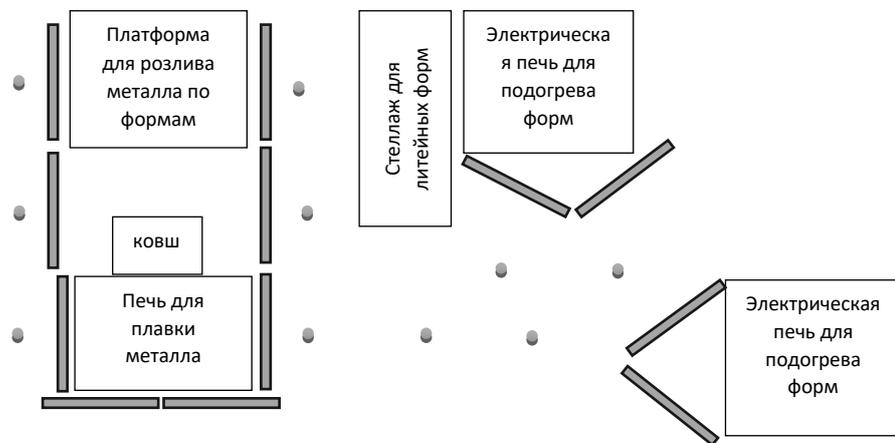


Рисунок 4.5 – Схема установки экранов и точки измерения на участках точного литья литейного цеха

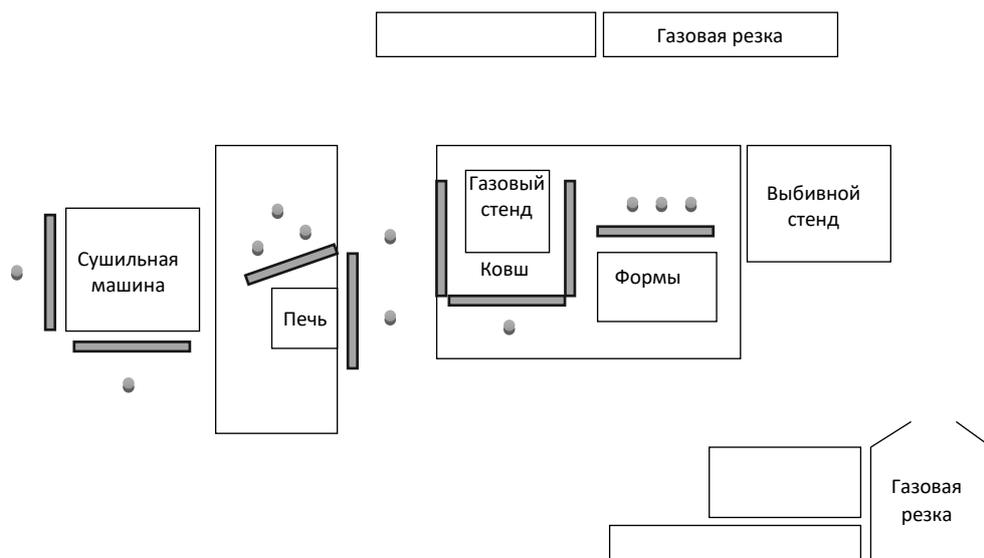


Рисунок 4.6 – Схема установки экранов и точки измерения на участках фасонного литья литейного цеха

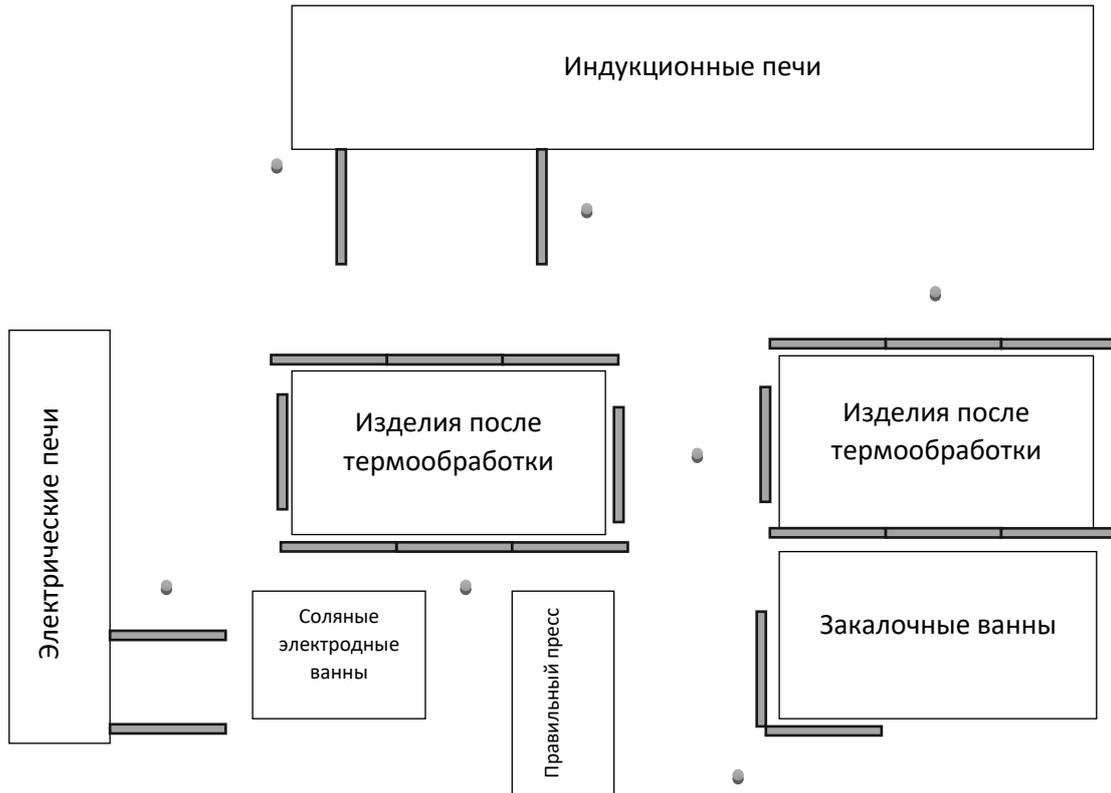


Рисунок 4.7 – Схема установки экранов и точки измерения в термическом цехе

Расчёт угла защиты. Основной принцип – экран должен полностью перекрывать прямую видимость между любой точкой в защищаемой зоне и всеми излучающими поверхностями источника. Для этого строится геометрическая модель в разрезе, соединяющая крайние точки излучающей поверхности источника с границами рабочей зоны (рисунок 4.8).

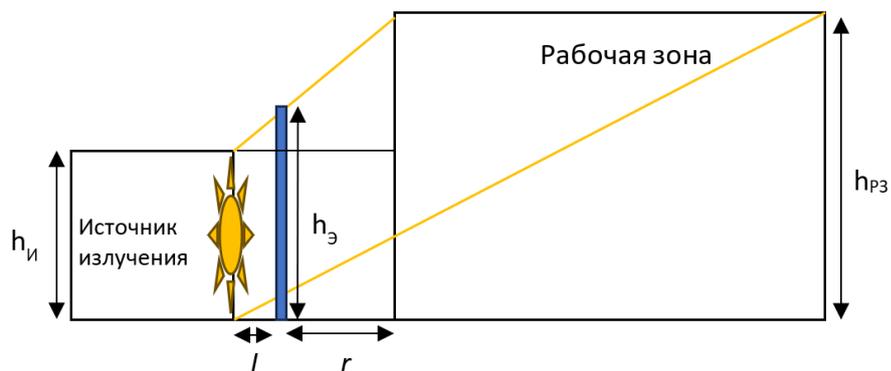


Рисунок 4.8 – Схема для расчета высоты теплозащитного экрана:

$h_{и}$ – высота источника; $h_{э}$ – высота экрана; $h_{рз}$ – высота рабочей зоны;
 l – расстояние от источника до экрана; r – расстояние от экрана до рабочей зоны

Для определения высоты теплозащитного экрана исходя из представленной схемы, примем, что высота экрана равна высоте источника плюс расстояние, на которое экран должен превышать источник (h_x):

$$h_{\text{Э}} = h_{\text{И}} + h_x. \quad (4.1)$$

Для вычисления h_x воспользуемся законом подобия треугольников: h_x относится к $(h_{\text{ПЗ}} - h_{\text{И}})$ так же как l относится к $(l + r)$. Тогда зная $h_{\text{И}}$, $h_{\text{Э}}$, l и r , можем вычислить искомое расстояние:

$$h_x = \frac{(h_{\text{ПЗ}} - h_{\text{И}}) * d_1}{d_1 + d_2}. \quad (4.2)$$

Пример расчета для источника высотой 1 м, когда экран устанавливается на расстоянии 0,2 м от источника и 0,3 м от рабочей зоны, принимая высоту рабочей зоны 2 м:

$$h_x = \frac{(2 - 1) * 0,2}{0,2 + 0,3} = \frac{0,2}{0,5} = 0,4 \text{ м.}$$

В данном примере необходимо установить экрана высотой 1,4 м. Протяжённость экрана L принимается равной ширине излучающей поверхности источника. Полученная высота экрана и протяженность увеличиваются на технологический запас (20 %) для компенсации бокового рассеянного излучения и для защиты от излучения, огибающего края экрана (эффект дифракции). Таким образом для рассмотренного примера высота экрана составляет 1,68 м.

В ходе опытно-промышленной апробации использовались теплозащитные экраны типового размера 1,5×1,75 м (протяжённость × высота), которые были определены на основании описанной методики расчета с учетом типовых размеров источников излучения (индукционных печей, ковшей) и стандартной организации рабочих мест в исследуемых цехах. Для защиты от протяжённых источников или при необходимости ограждения обширной рабочей зоны отдельные экраны соединялись вплотную друг к другу.

Результаты измерений параметров микроклимата на рабочих местах литейного и термического цехов после внедрения предложенных мероприятий приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений параметров микроклимата на рабочих местах литейного и термического цехов после внедрения предложенных мероприятий

Точки измерений	Температура, °С		ТНС-индекс, °С		Скорость движения воздуха, м/с		Относительная влажность воздуха, %	Интенсивность теплового излучения, Вт/м ²		
	<i>h</i> = 0,1 м	<i>h</i> = 1,5 м	<i>h</i> = 0,1 м	<i>h</i> = 1,5 м	<i>h</i> = 0,1 м	<i>h</i> = 1,5 м		<i>h</i> = 0,5 м	<i>h</i> = 1,0 м	<i>h</i> = 1,5 м
РМ огнеупорщика	20,7	21,5	19,8	20,1	0,5	0,28	34,2	57,92	73,8	80,6
РМ сталевара	21,5	22,0	21,4	22,5	0,29	0,36	35	76,3	131,4	111,5
РМ литейщика	21,5	22,0	21,4	22,5	0,29	0,36	35	76,3	131,4	111,5
РМ сушильщика	21,8	21,6	16,5	16,6	0,3	0,38	20	110,2	138,6	151,9
РМ термиста	21,6	22,0	24,0	24,0	0,4	0,35	35	94,6	130,0	139,9

Помимо прямого снижения интенсивности теплового излучения, что подтверждено расчётными и экспериментальными данными. Селективное оксидное покрытие отражает значительную часть лучистого потока обратно в сторону источника или в верхнюю зону помещения. Это приводит к минимизации нагрева окружающих рабочую зону поверхностей, которые в отсутствие экрана выступают вторичными источниками излучения.

Применение разработанных прозрачных теплозащитных экранов вносит существенный вклад в снижение конвективной составляющей теплообмена на рабочих местах. Образующиеся за экраном конвективные потоки нагретого воздуха, имеющие меньшую плотность, поднимаются согласно основным законам термодинамики. Высокие потолки, характерные для литейных и термических цехов, обеспечивают значительный градиент высоты для свободного развития конвективной струи. Восходящий поток эффективно улавливается вытяжными устройствами системы общеобменной вентиляции, расположенными в верхней части цеха. В результате, основной объём нагретых воздушных масс, сформировавшихся вблизи источника излучения, удаляется из помещения минуя зону постоянного пребывания персонала (уровень 0,1–1,5 м от пола).

После установки теплозащитных экранов:

- интенсивность теплового излучения снизилась от 150–650 до 70–140 Вт/м²;
- снизилась температура воздуха в рабочей зоне на 7–12 °С;
- уменьшилась вероятность тепловых ожогов и тепловой нагрузки на организм;
- повысилась комфортность нахождения работника в зоне разливки и заливки металла, транспортировки горячих заготовок и вблизи печей.

Применение разработанных устройств обеспечивает:

- снижение тепловой нагрузки на работников;
- предотвращение тепловых ожогов, перегрева и теплового стресса;
- улучшение показателей микроклимата;
- снижение общей производственной опасности;
- повышение производительности труда за счет улучшения условий труда;
- сокращение количества нарушений требований охраны труда.

Экономическая эффективность проявляется в снижении простоев, уменьшении заболеваемости и травматизма.

4.3.2 Сварочный цех

УФ-защитные стекла с оксидными покрытиями применялись как дополнительные защитные стекла для сварочных масок, которые позволяют защитить от повреждений в процессе работы сварочное стекло или светофильтр «Хамелеон». Стекло с оксидным УФ-защитным покрытием является дополнительной защитой от УФ-излучения, обладает высокой прочностью и имеет хорошую устойчивость к широкому диапазону температур при эксплуатации.

УФ-защитные экраны с нанесенным оксидным покрытием было рекомендовано установить вокруг рабочего места, на котором проводятся сварочные работы, с целью предотвращения воздействия УФ-излучения на смежные рабочие места и окружающий персонал.

Измерения ультрафиолетового излучения на рабочих местах проводились с помощью трехканального УФ-радиометра ТКА-ПКМ 12 согласно методике, описанной в Приказе Минтруда России от 21.11.2023 № 817н [132], а также в [153].

Результаты измерений интенсивности ультрафиолетового излучения на рабочих местах сварочного цеха после внедрения предложенных стекол с оксидными покрытиями для сварочных щитков приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения интенсивности ультрафиолетового излучения, полученные в ходе измерений, Вт/м²

Место измерения	Измеренные значения интенсивности УФ-излучения, Вт/м ² , с учетом спектрального состава излучения					
	УФ-В		УФ-С		УФ-В + УФ-С	
	до	после	до	после	до	после
Норма интенсивности УФ-излучения	-	-	-	-	1	1
Электрогазосварщик	1,8	0,18	1,7	0,29	3,5	0,5
Превышение	-	-	-	-	2,5	-
Электрогазосварщик ручной сварки	1,8	0,18	1,9	0,32	3,7	0,5
Превышение	-	-	-	-	2,7	-
Слесарь по сборке металлоконструкций	1,8	0,18	1,9	0,32	3,7	0,5
Превышение	-	-	-	-	2,7	-
Слесарь-инструментальщик	1,2	0,12	1,4	0,24	2,6	0,4
Превышение	-	-	-	-	1,6	-

Рабочие места с ручной сваркой не рекомендуется ограждать отражающими экранами, так как при сварке на сварщика действуют не только прямое ультрафиолетовое излучение, но и рассеянное, отраженное от окружающих поверхностей, поэтому ширмы, экраны, а также стены необходимо окрашивать в светлые матовые тона. Измерения в сварочном цехе с установленными экранами были проведены для оценки эффективности защиты от УФ-излучения, для исследования возможности применения прозрачных отражающих экранов на участках автоматической сварки, результаты измерения приведены в таблице 4.4. За нормативное значение интенсивности облучения примем 50,0 Вт/м² для области УФ-А, 0,05 Вт/м² – для области УФ-В, 0,001 Вт/м² – для области УФ-С (при наличии не более 0,2 м² незащищенных участков поверхности кожи, период

облучения до 5 мин, длительность пауз не менее 30 мин и общая продолжительность воздействия за смену до 60 мин). Экран устанавливался на расстоянии 0,4 м от источника излучения, точки измерения находились на расстоянии 0,2 м от экрана на высоте 1,2, 1,5 и 1,7 м.

Таблица 4.4 – Интенсивность ультрафиолетового излучения при сварочных работах до и после установки УФ-защитного экрана

Высота точки измерения, м	Интенсивность ультрафиолетового излучения, Вт/м ²					
	УФ-А		УФ-В		УФ-С	
	до	после	до	после	до	после
1,7	1,6	0,5	0,5	0,03	0,02	0,001
1,5	1,7	0,5	0,6	0,03	0,02	0,001
1,2	1,5	0,4	0,5	0,02	0,02	0,001

Таким образом, применение УФ-защитных экранов с оксидными покрытиями, прозрачными в видимом диапазоне (с незначительным затемнением) позволяют соблюдать требования гигиенических нормативных значений по ультрафиолетовому излучению.

После установки УФ-защитных экранов и применения дополнительных защитных стекол с оксидными покрытиями:

- уровень УФ-С снижен в 10–20 раз, УФ-В – в 6–12 раз, УФ-А – в 3–5 раз;
- класс условий труда на рабочих местах по фактору «неионизирующие излучения» улучшен до 2 – «допустимый».

Применение разработанных устройств обеспечивает:

- снижение риска фотокератита и поражений кожи при сварочных работах;
- снижение общей производственной опасности;
- повышение производительности труда за счет улучшения условий труда;
- сокращение количества нарушений требований охраны труда.

4.4 Расчет стоимости покрытий для прозрачных экранов

Стоимость конструкции будет включать в себя стоимость подложки – кварцевого стекла размерами до 1500×1500 мм, стоимость рамы (для

теплозащитных экранов жаропрочные стали, для УФ-защитных экранов – алюминиевая или полимерная рама) и стоимости защитного оксидного покрытия. Для УФ-защитного стекла для СИЗ стоимость рамы не учитывается.

Затраты на материалы для создания покрытия 1 м² поверхности, приведены в таблице 4.5. Для покрытия 1 м² поверхности (1 слоя) потребуется 1 мл раствора экстракта. Цена экстрагента: 1 литр олеиновой кислоты – 600 рублей, т. е. 1 мл – 60 копеек. Результаты расчета стоимости 1 м² одного слоя оксидного покрытия приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Стоимость 1 м² одного слоя оксидного покрытия

Оксиды металлов	Экстракт	Неорганические соли металлов	Цена соли металлов за грамм, руб.	Молярная масса солей металлов, г/мл	Стоимость необходимых солей металлов, руб.	Общая стоимость покрытия (1 слой) с учетом экстрагента, руб.
Zr-Y-O	(RCOO) ₄ Zr	ZrOCl ₂	37	0,17813	9,52	10,12
	(RCOO) ₃ Y	YCl ₃	15	0,19526		
La-Zr-O	(RCOO) ₄ Zr	ZrOCl ₂	37	0,17813	9,53	10,13
	(RCOO) ₃ La	LaCl ₃	12	0,24526		
In-Sn-O	(RCOO) ₃ In	InCl ₃	70	0,221	14,11	14,71
	(RCOO) ₂ Sn	SnCl ₂	10	0,189		
La-Ce-O	(RCOO) ₃ La	LaCl ₃	12	0,24526	9,11	9,71
	(RCOO) ₃ Ce	CeCl ₃	25	0,24648		
ZrO ₂	(RCOO) ₄ Zr	ZrOCl ₂	37	0,17813	6,59	7,19
TiO ₂	(RCOO) ₄ Ti	TiOSO ₄	4,9	0,15994	0,78	1,38
Y ₂ O ₃	(RCOO) ₃ Y	YCl ₃	15	0,19526	2,93	3,53
ZnO	(RCOO) ₂ Zn	ZnCl ₂	2,3	0,136286	0,31	0,91
NiO	(RCOO) ₂ Ni	NiSO ₄	0,4	0,15475	0,06	0,66
CuO	(RCOO) ₂ Cu	CuCl ₂	0,5	0,13445	0,07	0,67

Стоимость однослойного теплозащитного покрытия площадью 1 м² варьируется от 7,08 руб. (диоксид циркония, стабилизированный иттрием) до 14,71 руб. (оксид индия олова) с учетом экстрагента. Таким образом минимальная и максимальная цена за многослойное покрытие (10 слоев) будет соответствовать 70,08 и 147,1 руб.

Для нагрева 1 слоя покрытия на площади 1 м² в течение 3 минут с помощью инфракрасного нагревателя до температуры 500–700 °С нужно затратить порядка

1 кВт/ч электроэнергии. С учетом стоимости 1 кВт электроэнергии по среднему тарифу 7,0 руб., нанесение 1 слоя покрытия будет стоить 7,0 руб. Для нанесения 10 слоев покрытия понадобится 70 рублей, включающих только затраты на нагрев. Таким образом, себестоимость покрытия (материалы и нагрев покрытия) не превышает 300 руб/м².

Для сравнения, пленка оксида циркония, полученная вакуумными методами, имеет высокую стоимость, примерно 1000 руб/м². Кроме того, эти методы характеризуются высокими энергозатратами, применяют керамические мишени, которые используются на 30–40 %, поэтому вакуумные методы относятся к материалозатратным.

Методы получения пленок из экстрактов металлов реализуются в окружающей среде без использования и поддержки вакуума, что приводит к снижению общей стоимости производства.

Большую часть стоимости покрытия будет составлять стоимость стекла и рамы.

4.5 Выводы по главе 4

1. Научно обоснован и разработан комплекс рекомендаций по применению селективных оптических покрытий. На основе спектрального анализа установлены и рекомендованы конкретные составы покрытий (Zr-Y-O, La-Zr-O, In-Sn-O) для типовых источников излучения в литейном и термическом производстве. На основе спектрального анализа и лабораторных исследований в УФ-диапазоне излучения рекомендованы составы оксидных покрытий в зависимости от их эффективности в разных диапазонах УФ-излучения (для УФ-С – оксиды циркония, титана, индия-олова, никеля и меди; для УФ-В – оксиды индия-олова, никеля и меди; для УФ-А – оксиды никеля и меди).

2. Разработаны и изготовлены конструкции двух типов защитных экранов, ключевыми особенностями которых являются прозрачная основа, функциональные слои защитного оксидного покрытия для защиты от ИК- и/или

УФ-диапазона излучения, получаемого простым дешевым способом, простота и мобильность конструкции.

3. Экспериментально подтверждено, что применение теплозащитных экранов снижает интенсивность теплового потока на рабочих местах в среднем в 2,8 раза, а УФ-экранов – снижает интенсивность УФ-С/В излучения в среднем в 7 раз.

4. Техничко-экономический анализ показал, что себестоимость защитного покрытия экстракционно-пиролитическим методом не превышает 300 руб/м², что на порядок ниже стоимости аналогов, полученных вакуумными методами (порядка 1000 руб/м²). Основную долю стоимости конечного изделия составляют кварцевое стекло и рама, что открывает потенциал для масштабирования технологии.

5. Внедрение разработанных средств защиты позволило улучшить класс условий труда по факторам «микроклимат» и «неионизирующие излучения» на исследуемых рабочих местах до допустимого 2-го класса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На машиностроительных и металлургических предприятиях присутствует опасность воздействия теплового и ультрафиолетового излучения на работников. В связи с этим важно разработать способы защиты от широко распространенных источников оптического излучения в современных производственных процессах, которые создают потенциальные риски для здоровья персонала.

В представленной работе достигнута цель исследования, заключающаяся в повышении уровня безопасности и улучшении условий труда работников, занятых на рабочих местах с источниками инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Это обеспечено за счет разработки и внедрения комплекса эффективных решений на основе защитных прозрачных экранов и стекол с оксидными покрытиями, формируемыми экстракционно-пиролитическим методом.

Поставленная цель была последовательно реализована через решение всех поставленных задач:

1. Проведена специальная оценка условий труда на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов, по результатам которой условиям их труда присвоен класс условий труда 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 (Т) до 8,5 °С, ТНС-индекса 0,8 °С, интенсивности

теплового излучения (q) до $61,5 \text{ Вт/м}^2$; на рабочих местах сталевара и литейщика: T до $13,8 \text{ }^\circ\text{C}$, ТНС-индекса $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, q до $178,5 \text{ Вт/м}^2$; на рабочем месте сушильщика: T до $10,6 \text{ }^\circ\text{C}$, q – до $239,8 \text{ Вт/м}^2$; на рабочем месте термиста: T до $13,0 \text{ }^\circ\text{C}$, ТНС-индекса $12,7 \text{ }^\circ\text{C}$, q до $510,0 \text{ Вт/м}^2$. Установлены значения превышения ультрафиолетового излучения на рабочих местах сварочного цеха – от $1,6 \text{ Вт/м}^2$ для рабочего места слесаря-инструментальщика до $2,7 \text{ Вт/м}^2$ для рабочих мест электросварщика ручной сварки и слесаря по сборке металлоконструкций.

3. Установлены технологические режимы экстракционно-пиролитического нанесения многослойных оксидных покрытий, обеспечивающих селективную прозрачность в видимом диапазоне при одновременной защите от ИК- и/или УФ-излучения.

4. 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.

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.

Таким образом, проведенное исследование носит законченный характер. Все поставленные задачи решены в полном объеме, что привело к достижению цели работы. Разработанный научно-практический комплекс – от методологии анализа и требований до конкретных технологий и конструкторских решений – обеспечивает эффективную защиту персонала от теплового и ультрафиолетового излучения и готов к внедрению на промышленных предприятиях аналогичного профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецова С.А. Работа в условиях повышенных температур: риски и последствия / С. А. Кузнецова // Панорама Наука и практика. – 2024. – URL: <https://panor.ru/articles/rabota-v-usloviyakh-povyshennykh-temperatur-riski-i-posledstviya/84906.html#> (дата обращения 23.12.2025).

2. Экспериментальное обоснование эффективного режима воздействия инфракрасного излучения на организм человека при проведении инфракрасной терапии / А. В. Воробей, А. Н. Осипов, М. Х.-М. Тхостов, И. А. Телеш // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 14–19 – DOI 10.35596/1729-7648-2020-18-3-14-19.

3. Галанин, Н. Ф. Методика исследования некоторых физических факторов в гигиене труда / Н. Ф. Галанин. – Ленинград : Ленингр. ин-т гигиены труда и проф. заболеваний, 1936. – 128 с.

4. Харитонов, В. И. Тепловое состояние организма работающих при воздействии экстремальных уровней инфракрасного излучения и профилактика перегревания / В. И. Харитонов // Гигиена и санитария. – 2023. – Т. 102, № 3. – С. 241–246. – DOI 10.47470/0016-9900-2023-102-3-241-246.

5. Черенков, Д. А. Исследование механизма действия неионизирующих электромагнитных излучений низкой интенсивности на иммунную систему млекопитающих : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук : 03.01.02 / Черенков Дмитрий Александрович. – Воронеж, 2015. – 264 с.

6. Sliney, D. H. Ultraviolet radiation / D. H. Sliney // Physical and Biological Hazards of the Workplace. – 2016. – P. 197–201.

7. The effects of infrared radiation on the human skin / L. Horton, J. Brady, C. M. Kincaid [et al.] // Photodermatol Photoimmunol Photomed. – 2023. – Vol. 39(6). – P. 549–555. – DOI 10.1111/phpp.12899.

8. Damaging effects of UVA, blue light, and infrared radiation: in vitro assessment on a reconstructed full-thickness human skin / P. Montero, I. Roger, J. Milara, J. Cortijo // *Frontiers in Medicine (Lausanne)*. – 2023. – Vol. 10. – Article no. 1267409. – DOI 10.3389/fmed.2023.1267409.

9. Occupational Exposure to Artificial Ultraviolet Radiation from Welding in Australia / L. Fritschi, T. Driscoll, H. Nguyen, R. N. Carey // *International Journal of Preventive Medicine*. – 2024. – Sep. 28. 15:43. – DOI 10.4103/ijpvm.ijpvm_250_23.

10. Comparison of the responses of human melanocytes with different melanin contents to ultraviolet B irradiation / D. Barker, K. Dixon, E.E. Medrano [et al.] // *Cancer Research*. – 1995. – Vol. 15. – P. 4041–4046.

11. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда работающих в литейных цехах при выполнении сварочных работ / А. М. Лазаренков // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 163–165. – DOI 10.21122/1683-6065-2019-3-163-165.

12. Лазаренков, А. М. Оценка условий труда работающих в литейных цехах с массовым характером производства / А. М. Лазаренков // *Литье и металлургия*. – 2017. – № 4 (89). – С. 134–137. – ISSN 1683-6065.

13. Статистика // Союз Машиностроителей России [сайт]. – URL: <http://www.souzmash-omsk.ru/statistics> (дата обращения: 17.11.2025).

14. О промышленном производстве в I полугодии 2025 года // Росстат [сайт]. – URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/110_23-07-2025.html (дата обращения: 19.11.2025).

15. Отчет «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» за 2022 г.» // Минпромторг РФ [сайт]. – URL: <https://minpromtorg.gov.ru/docs/docs/?pdfModalID=134384a9-fa69-4987-a0e6-9314d4ab3040&fileModalID=fe2719d9-bf0f-4795-ae18-7b329ccd648d> (дата обращения: 19.11.2025).

16. Труд и занятость в России. 2023 : статистический сборник / Росстат. – Москва, 2023. – 180 с.

17. Исследование «Эксперт РА» «Крупнейшие металлургические компании России» 2024 // *Металлоснабжение и сбыт*. – 2024. – №07-08. – 155 с.

18. Яшкина, Е. А. Условия труда работников литейного цеха и обоснование мероприятий по их улучшению / Е. А. Яшкина, А. И. Бокарев // Техносферная безопасность : материалы Шестой Всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием / под редакцией Н. Н. Новикова. – Омск, 2019. – С. 41–43. – ISBN 978-5-8149-2841-2.

19. Приказ Минтруда России от 11.12.2020 № 887н (ред. от 29.04.2025) «Об утверждении Правил по охране труда при обработке металлов» (зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 № 61951) // Контур. Норматив : справочно-правовая система. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=501437&ysclid=mkgqyrdghn544328243> (дата обращения: 16.11.2025).

20. Постановление Минтруда РФ от 15.11.1999 № 45 «Об утверждении Единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих», выпуск 2, разделы: «Литейные работы», «Сварочные работы», «Котельные, холодноштамповочные, волочильные и давилые работы», «Кузнечно-прессовые и термические работы», «Механическая обработка металлов и других материалов», «Металлопокрытия и окраска», «Эмалирование», «Слесарные и слесарно-сборочные работы» // Контур. Норматив : справочно-правовая система. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=44371&ysclid=mkgr2tdtkn387387438> (дата обращения: 16.11.2025).

21. Приказ Минтруда России от 29.09.2014 № 667н (ред. от 09.03.2017) «О реестре профессиональных стандартов (перечне видов профессиональной деятельности)» // Контур. Норматив : справочно-правовая система. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=291959&ysclid=mkgr4adeku914219658> (дата обращения: 16.11.2025).

22. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 767н «Об утверждении Единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств» (зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2021 № 66671) // Контур. Норматив : справочно-правовая система. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=422438&ysclid=mkgr5gea6o562807799> (дата обращения: 16.11.2025).

23. Итпаева-Людчик, С. Л. Анализ материалов анкетного опроса работающих в условиях профессионального ультрафиолетового облучения / С. Л. Итпаева-Людчик, Р. Д. Клебанов // Здоровье и окружающая среда : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Минск : БГМУ, 2016. – С. 277–281.

24. Месхи, Б. Ч. Анализ условий труда операторов фрезерующих деревообрабатывающих станков / Б. Ч. Месхи, В. М. Цветков, К. Г. Шучев // Проектирование технологического оборудования : межвузовский сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : Институт управления и инноваций авиационной промышленности, 2002. – С. 3–9.

25. Каменев, В. И. Особенности условий труда сталелитейного производства / В. И. Каменев // Medicus. – 2022. – № 3 (45). – С. 19–23. – ISSN 2409-563X.

26. Чумакова, А. В. Обеспечение безопасных условий труда работников алюминиевого литейного производства / А. В. Чумакова // Наука. Технологии. Инновации : сборник научных трудов. В 11 ч. Ч. 11. – Новосибирск, 2024. – С. 175–178. – ISBN 978-5-7782-5139-7.

27. Стёпкин, Ю. И. Особенности условий труда сталелитейного производства / Ю. И. Стёпкин, В. И. Каменев // Актуальные проблемы управления здоровьем населения : сборник научных трудов V Всероссийской научно-практической конференции. Вып. 15 / под общей редакцией И. А. Переслегиной. – Нижний Новгород, 2022. – С. 98–102.

28. Кочнев, А. Д. Санитарно-гигиеническая оценка влияния условий труда на рабочих местах машиностроительного производства в кузнечно-литейном цехе / А. Д. Кочнев, Е. В. Стасева, Д. М. Биллер // Саморазвивающаяся среда технического университета : материалы III Всероссийской научно-практической конференции / под редакцией Е.А. Евстифеевой, С.В. Рассадина. В 2 ч. Ч. 1. – Тверь, Тверской государственный технический университет, 2018. – С. 187–194. – ISBN 978-5-7995-0964-4.

29. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда работающих в термических цехах / А. М. Лазаренков // *Литьё и металлургия*. – 2020. – № 1. – С. 125–128. – DOI 10.21122/1683-6065-2020-1-125-128.

30. Змачинская, И. А. Оценка условий труда работающих в цехах термической обработки металлов / И. А. Змачинская, Ю. С. Монжос ; науч. рук. А. М. Лазаренков // *Литье и металлургия 2023 : сборник научных работ VI Международной научно-практической интернет-конференции студентов и магистрантов, 23–24 ноября 2023 г.* / составители: А. П. Бежок, И. А. Иванов. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 211–213.

31. Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 № 426-ФЗ (ред. от 24.07.2023) // *Контур. Норматив : справочно-правовая система*. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=455233&ysclid=mkgs8h1bsn789902769> (дата обращения: 26.11.2025).

32. Мурина, Е. В. Оценка условий и безопасности труда на сварочном участке транспортного цеха в ООО «КИНЕФ» / Е. В. Мурина, А. А. Попов // *Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК : материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся. Ч. 2.* – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (Санкт-Петербург), 2021. – С. 61–63. – ISBN 978-5-85983-358-0.

33. Береговский, А. В. Безопасность труда при сварочных работах // / А. В. Береговский, Е. А. Носатова // *Молодежь и научно-технический прогресс : IX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4 т. Т. 3.* – Старый Оскол : ООО «Ассистент плюс», 2016. – С. 187–191. – ISBN 978-5-9908120-4-8.

34. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача от 28.01.2021 № 2 (ред. от 17.03.2025) // *Контур. Норматив : справочно-*

правовая система. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=500059&ysclid=mkgsqrbhuz90064006235> (дата обращения: 26.11.2025).

35. Руководство по вопросам шума в окружающей среде для Европейского региона: резюме / Всемирная организация здравоохранения. Европейское региональное бюро. – Номер документа: WHO/EURO:2018-3287-43046-60264. – Копенгаген, Дания, 2018. – 8 с.

36. Спирын, В. Ф. К некоторым проблемам хронического воздействия производственного шума на организм работающих (обзор литературы) / В. Ф. Спирын, А. М. Старшов // Анализ риска здоровью. – 2021. – № 1. – С. 186–196. – DOI 10.21668/health.risk/2021.1.19.

37. Вибрационная болезнь : учебное пособие для обучающихся / составители : К. А. Зыков, А. М. Попкова, Н. С. Сметнева [и др.]. – Москва : РИО МГМСУ, 2022. – 47 с.

38. Кузнецова, А. Д. Структурный шум на производстве, выявление вклада и методы снижения / А. Д. Кузнецова // Noise Theory and Practice. – Т. 7, № 2. – 2021. – С. 218–225. – eISSN 2412-8627.

39. Тюрина, Н. В. Оценка эффективности кабины для снижения шума на рабочих местах / Н. В. Тюрина, К. П. Фиев, А. А. Воронова // Noise Theory and Practice. – 2023. – Т. 9, № 4. – С. 92–101. – eISSN 2412-8627.

40. Кирпичников, В. Ю. Экспериментальные исследования эффективности вибропоглощающего покрытия с металлическим армирующим слоем различной толщины / В. Ю. Кирпичников, А. И. Сятковский, А. Е. Шашурин // Noise Theory and Practice. 2022. – Т. 8, № 1. – С. 29–34. – eISSN 2412-8627.

41. Феоктистова, Т. Г. Защита от теплового излучения : методическое пособие для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» / Т. Г. Феоктистова, С. В. Монахова. – Москва : Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2008. – 16 с.

42. International Commission on Illumination : CIE S 017 / E: 2020 ILV International Lighting Vocabulary. – Vienne, 2020. – Текст: электронный. – URL:

<https://cie.co.at/publications/international-lighting-vocabulary> (дата обращения: 10.05.2025).

43. Галанин, Н. Ф. Лучистая энергия и ее гигиеническое значение / Н. Ф. Галанин ; редактор А. И. Зятюшков. – Ленинград : Медицина, 1969. – 181 с.

44. Chinnasamy, S. A study on ultraviolet radiation and its effects S. Chinnasamy, M. Ramachandran, C. Sivaji // REST Journal on Advances in Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 1, No. 2. – P. 1–9.

45. The damaging effects of long UVA (UVA1) rays: a major challenge to preserve skin health and integrity / F. Bernerd, T. Passeron, I. Castiel, C. Marionnet // International journal of molecular sciences. – 2022. – Vol. 1, No. 15. – Article no. 8243.

46. Приказ Минтруда от 31 января 2022 г. № 36 «Об утверждении Рекомендаций по классификации, обнаружению, распознаванию и описанию опасностей» // Контур. Норматив : справочно-правовая система. – URL:<https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=414162&ysclid=mkgt0is1o8445226276> (дата обращения: 20.11.2025).

47. Алексеев, С. В. Гигиена труда : учебник для санитарно-гигиенических факультетов мединституты / С. В. Алексеев, В. Р. Усенко. – Москва : Медицина, 1988. – 576 с.

48. Вашко, И. М. Охрана труда / И. М. Вашко. – Минск : Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2012. – 96 с.

49. Near infrared (NIR) light therapy of eye diseases: A review / Q. Zhu, S. Xiao, Z. Hua [et al.] // International Journal of Medical Sciences. – 2021. – Vol. 18, No. 1. – P. 109.

50. The impact of far-UVC radiation (200–230 nm) on pathogens, cells, skin, and eyes – a collection and analysis of a hundred years of data / M. Hessling, R. Haag, N. Sieber, P. Vatter // GMS Hygiene and Infection Control. – 2021. – Vol. 16. – DOI 10.3205/dgkh000378.

51. Ham, W. T. Retinal sensitivity to damage from short wavelength light / W. T. Ham, H.A. Mueller, D. H. Sliney // Nature. – 1976. – Vol. 260. – P. 153–155.

52. Feller, R. L. Accelerated Aging: Photochemical and Aspects / R. L. Feller. – USA, 1994 – 263 p.
53. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеев. – Изд. 2-е, стер. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с.
54. Bergman, T. L. Fundamentals of heat and mass transfer / T. L. Bergman, A.S. Lavine. – 8th edition. – Los Angeles : John Wiley & Sons, Inc. 2017. – 1046 с.
55. Ficker, T. Thermal balance of human body at local workplace / T. Ficker // Indoor and Built Environment. – 2024. – Vol. 33, No. 6. – P. 1016–1029.
56. Spellman, F. R. Physical hazard control: preventing injuries in the workplace / F.R. Spellman. – London : Bloomsbury Publishing PLC, 2023. – 129 p.
57. Самара, А. Б. Защита от теплового излучения на предприятиях металлургической промышленности / А. Б. Самара // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3 т. Т. 2. – Красноярск, 2022. – С. 699–702.
58. Козий, С. С. Исследование интенсивности теплового излучения и эффективности теплозащитных экранов : методические указания / С. С. Козий, Т. Б. Козий, В. В. Морозов. – Самара : СГАУ, 2015. – 32 с.
59. Шакиров, Ф. М. Гигиеническая оценка теплового излучения и исследование эффективности теплозащитных экранов : методические указания / Ф. М. Шакиров, С. С. Козий, Т. Б. Козий. – Самара : Издательство Самарского университета, 2021. – 45 с.
60. Шарендо, Н. С. Защита от тепловых излучений. Расчет теплозащитных экранов / Н. С. Шарендо, А. А. Маслова // Современные проблемы экологии : доклады XXVIII Всероссийской научно-практической конференции / под общей редакцией В. М. Панарина. – Тула : Инновационные технологии, 2022. – С. 62–64.
61. Лобанов, М. Л. Защитные покрытия : учебное пособие / М. Л. Лобанов. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2014. – 200 с.

62. Сиротюк, В. В. Современные конструктивно-технологические решения при строительстве плавающих насыпей / В. В. Сиротюк // Строительство. Строительные материалы и изделия. – 2014. – Т. 35, № 1. – С. 66–73.
63. Пенополиуретан – современный теплоизоляционный материал / Е. А. Морозов, Д. А. Майдан, Е. А. Кузнец, Д. В. Кутырева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2010. – № 9. – С. 86. – ISSN 1996-3955.
64. Бобров, Г. В. Теория и технология формирования неорганических покрытий : монография / Г. В. Бобров, А. А. Ильин, В. С. Спектор. – Москва : Альфа-М, ИНФРА-М, 2014. – 925 с. – ISBN 978-5-98281-407-4.
65. PS-PVD deposition of thermal barrier coating / M. Goral, S. Kotowski, A. Nowotnik [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 237. – P. 51–55.
66. Горелов, В. П. Фазовые переходы в моноклинном ZrO_2 / В. П. Горелов, С. А. Беляков, Р. К. Абдурахимова // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, № 3. – С. 472–477. – DOI 10.21883/FTT.2023.03.54747.541.
67. Miller, R. A. Phase distributions in plasma-sprayed zirconia-yttria / R. A. Miller, R. G. Garlick, J. L. Smialek // American Ceramic Society Bulletin. – 1983. – Vol. 62, No. 12. – P. 1355–1358.
68. Structural properties of zirconia doped with some oxides / H. A. Abbas, F. F. Hamad, A. K. Mohamad [et al.] // Diffus. Fundam. – 2008. – Vol. 8, No. 7. – P. 1–8.
69. Оковитый, В. В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий / В. В. Оковитый // Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 26–32. – ISSN 2227-1031.
70. Garvie, R. C. Structure and thermomechanical properties of partially stabilized zirconia in the $CaO-ZrO_2$ system / R. C. Garvie, P. S. Nicholson // Journal of the American Ceramic Society. – 1972. – Vol. 55, No. 3. – P. 152–157.
71. Progress on high-temperature protective coatings for aero-engines / L. Guo, W. He, W. Chen [et al.] // Surface Science and Technology. – 2023. – Vol. 1 (6). – P. 1–39.

72. Present status and prospects of nanostructured thermal barrier coatings and their performance improvement strategies / L. Liu, Sh. Wang, B. Zhang [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Vol. 97. – P. 12–34.

73. Влияние кривизны поверхности подложки на структуру и свойства термобарьерных, конденсационных покрытий. Электронно-лучевые процессы / К. Ю. Яковчук, Ю. Э. Рудой, Л. М. Нероденко [и др.] // *Современная электрометаллургия*. – 2011. – № 1. – С. 22–29.

74. Overview on advanced thermal barrier coatings / R. Vassen, M. O. Jarligo, T. Steinke [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 205. – P. 938–942.

75. Schäfer, G. W. Lanthane aluminate thermal barrier coating / G.W. Schäfer, R. Gadow // *Proceedings of the Annual Cocoa Beach Conference, The American Ceramic Society, Westerville, OH, 1999*. – P. 291–297.

76. Обзор современных способов формирования термобарьерных покрытий / А. Ф. Медников, К. С. Медведев, Г. В. Качалин [и др.] // *Глобальная энергия*. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 132–148. – DOI 10.18721/JEST29409.

77. Padture, N. P. Thermal barrier coatings for gasturbine engine applications / N. P. Padture, M. Gell, E. H. Jordan // *Science*. – 2002. – Vol. 296. – P. 280–284.

78. Wu, Y. High-temperature sintering resistance of novel NdYbZr₂O₇ thermal barrier coating / Y. Wu, D. Y. He // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 456. – Article no. 129275. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2023.129275.

79. Wei, Q. Direct patterning ITO transparent conductive coatings / Q. Wei, H. Zheng, Y. Huang // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2001. – Vol. 68, No. 3-4. – P. 383–390.

80. Brewer, S. H. Indium tin oxide plasma frequency dependence on sheet resistance and surface adlayers determined by reflectance FTIR spectroscopy / S. H. Brewer, S. Franzen // *Journal of Physical Chemistry B*. – 2002. – Vol. 106, No. 50. – P. 12986–12992.

81. Matsui, H. Sn-Doped In₂O₃ Nanoparticles as Thermal Insulating Materials for Solar – Thermal Shielding in the Infrared Range / H. Matsui, H. Tabata // *ACS Applied Nano Materials*. – 2021. – Vol. 4, No. 6. – P. 6269–6279.

82. Radiative-cooling composites with enhanced infrared emissivity by structural infrared scattering through indium tin oxide nanoparticles in a polymer matrix / S. Park [et al.] // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2023. – Vol. 15, No. 12. – P. 16026–16033.

83. Daricioglu, M. O. Functionalization of glass fiber woven fabrics by indium tin oxide (ITO) coatings for electromagnetic wave absorption / M. O. Daricioglu, C. Durucan, A. F. Dericioglu // *Materials Science and Engineering: B*. 2023. – Vol. 294. – Article no. 116502.

84. The main role of thermal annealing in controlling the structural and optical properties of ITO thin film layer / M. Ahmed, A. Bakry, A. Qasem, H. Dalir // *Optical Materials*. – 2021. – Vol. 113. – Article no. 110866.

85. Indium–tin oxide films obtained by extraction pyrolysis / N. Y. Snezhko, A. L. Belousov, A. V. Ryzhenkov, T. N. Patrusheva // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 49, No. 5. – P. 721–725. – DOI 10.1134/S0040579515050152.

86. Михнюк, Т. Ф. Охрана труда и основы экологии : учебник для студентов вузов / Т. Ф. Михнюк. – Минск : Высшая школа, 2007. – 356 с.

87. Печень, Т. М. Организация планирования способов защиты организма человека от ультрафиолетового излучения / Т. М. Печень // *Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года) : материалы конф. В 2 ч. Ч. 1.* – Минск, 2014. – С. 372–373.

88. Батыгин, А. И. Характеристика и условия обеспечения работающих дерматологическими средствами защиты / А. И. Батыгин, Н. Н. Симакова // *Общество. Наука. Образование : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 19–20 апреля 2023 г. / под редакцией А. В. Ефимова, Т. И. Монастырской.* – Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2023. – С. 49–55. – DOI 10.55648/978-5-91434-082-4-2023-49-55.

89. ГОСТ 12.4.253-2013 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз и лица. Общие технические требования. – Москва : Стандартиформ. 2019. – 49 с.

90. ГОСТ 12.4.254-2013 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз и лица при сварке и аналогичных процессах. Общие технические условия. – Дата актуализации: 01.01.2021. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 26 с.

91. ГОСТ Р EN 379-2011 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз и лица при сварке и аналогичных процессах. Автоматические сварочные светофильтры. Общие технические условия. – Дата актуализации: 01.06.2025. – Москва : Стандартиформ. 2012. – 16 с.

92. AFNOR NF EN 167-2002 Personal eye-protection – Optical test methods Защита глаз индивидуальная. Оптические методы испытаний. – Дата принятия 01.02.2002.

93. UNI EN 168-2003 Personal eye-protection – Non-optical test methods Защита глаз индивидуальная. Неоптические методы испытаний. – Дата опубликования: 15.02.2002. – 34 с.

94. Гурбо, А. А. Исследование области применения солнцезащитных стекол / А. А. Гурбо // 72-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов : тезисы докладов, Минск, 12–23 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 3. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 87–90.

95. Орлова, С. С. Защитные и декоративные покрытия в светопрозрачных фасадах / С. С. Орлова, А. А. Орлов // Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки : сборник статей международной научно-практической конференции. В 8 ч. Ч. 8. – Уфа, 2016. – С. 174–176. – ISBN 978-5-906925-55-8.

96. Патент RU 2230870 С2 20.06.2004. Многослойное изделие для остекления защищаемых объектов / В. А. Космачев, В. А. Мельник, А. В. Мельник [и др.]. – № 2002122616/03; заявл. 23.08.2002 ; опубл. 20.06.2004.

97. Патент RU 2551152 С2 20.05.2015. Темное тонированное стекло / Л. Д. Шелестак, Д. П. Тиль заявл. 27.01.2012 ; опубл. 20.05.2015, Бюл. № 14. – 18 с.

98. Макарян, И. А. О перспективах разработки новых энергосберегающих устройств на основе «умного» стекла / И. А. Макарян, В. П. Грачев, С. М. Алдошин // Энергосберегающие технологии, системы, материалы и приборы. – 2012. – № 11. – С. 98–112. – ISSN 1608-8298.

99. 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.

100. Piegari, A. Wideband optical coatings for protecting artwork from ultraviolet and infrared radiation damage / A. Piegari, P. Polato // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2003. – Vol. 5. – P. 152–156.

101. Hybrid sol-gel materials for realization of radiation protective coatings—a review with emphasis on UV protective materials / B. Mahltig, T. Leisegan, M. Jakubik, H. Haufe // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2021. – P. 1–12.

102. Impact of nanostructured thin ZnO film in ultraviolet protection / M. S. Ghamsari, S. Alamdari, W. Han, H. Park // International Journal of Nanomedicine. – 2012. – Vol. 12. – P. 207–216.

103. Zayat, M. Preventing UV-light damage of light sensitive materials using a highly protective UV-absorbing coating / M. Zayat, P. Garcia-Parejoab, D. Levy // Chemical Society Reviews. – 2007. – No. 36. – P. 1270–1281.

104. Sakamoto H., Qiu J. and Makishima A. The preparation and properties of CeO₂–TiO₂ film by sol–gel spin-coating process H. Sakamoto, J. Qiu, A. Makishima // Science and Technology of Advanced Materials. – 2003. – No. 4. – С. 69–76.

105. 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. – EDN LPATKQ.

106. Ищенко, А. А. Солнцезащитные средства. II. Неорганические УФ-фильтры и их композиции с органическими протекторами / А. А. Ищенко, А. А. Свиридова // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2006. – № 12. – С. 3–16.

107. Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices / U. Ozgur, Ya. I. Alivov, Liu C., A. Teke [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 98. – Article no. 041301.

108. Исаева, Е. С. Применение наночастиц в косметологии / Е. С. Исаева, И. А. Макарова // Технологии материалов : сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей. – Ульяновск, 2022. – С. 46–48.

109. Структура и свойства пленок оксида циркония, легированных оксидом иттрия, полученных методом лазерного осаждения в вакууме / Н. А. Босак, А. Н. Чумаков, А. А. Шевченко, Л. В. Баран // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 2. – С. 10–18.

110. Ce-doped titanium oxide composite films with enhanced water vapor barrier and light-blocking properties for encapsulation / Yu. Yao, W. Zhang, R. Pan [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – November 5, 2025. – Vol. 724. – Article no. 137464.

111. Taneja, Y. Recent Advances in Elemental Doping and Simulation Techniques: Improving Structural, Photophysical and Electronic Properties of Titanium Oxide / Y. Taneja, D. Dube, R. Singh // Journal of Materials Chemistry. C. – 2024. – No. 12. – P. 14774–14808.

112. Sassi, S. Cu-Doped TiO₂ Thin Films by Spin Coating: Investigation of Structural and Optical Properties / S. Sassi, A. Bouich, A. Hajjaji [et al.] // Inorganics. – 2024. – Vol. 12, No. 7. – P. 188–209. – DOI 10.3390/inorganics12070188.

113. Taşdemirci, T. Impact of Annealing Temperature on Physical Properties of Manganese Sulfide Thin Film / T. Taşdemirci // *Kocaeli Journal of Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 8 (1). – P. 86–93. – DOI 10.34088/kojose.1562878.

114. Muthee, D. K. Effect of annealing temperature on structural, optical, and photocatalytic properties of titanium dioxide nanoparticles / D. K. Muthee, B. F. Dejene // *Heliyon*. – 2021. – Vol. 7, No. 6. – Article no. e07269. – DOI 10.1016/j.heliyon.2021.e07269.

115. Ksenevich, V. K. Effect of the oxidative annealing temperature on the structural and optical characteristics of tin oxide films / V. K. Ksenevich, V. A. Dorosinets, M. A. Samarina [et al.] // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2025. – Vol. 91. – P. 1233-1239. – DOI 10.1007/s10812-025-01842-z.

116. Yu, Z. Indium tin oxide as a semiconductor material in efficient p-type dye-sensitized solar cells / Z. Yu, I. Perera, T. Daeneke // *NPG Asia Mater.* – 2016. – No. 8. – Article no. e305. – DOI 10.1038/am.2016.89.

117. 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.

118. 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.

119. Preparation of plasma sprayed nanostructured GdPO₄ thermal barrier coating and its hot corrosion behavior in molten salts / M. Z. Li, Y. X. Cheng, L. Guo [et al.] // *Ceramics International*. – 2017. – Vol. 43. – P. 7797–7803.

120. Гольдаде, В. А. Методы получения тонких пленок : практическое пособие / В. А. Гольдаде, Н. Н. Федосенко. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – 41 с.

121. Борило, Л. П. Тонкопленочные неорганические наносистемы / Л. П. Борило ; под редакцией д. т. н., проф. В. В. Козика. – Томск : Томский государственный университет, 2012. – 134 с.

122. Иванов, А. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование / А. Иванов, Б. Смирнов // Наноиндустрия. – 2012. – Т. 36, № 6. – С. 28–34. – ISSN 1993-8578.

123. Тверьянович, Ю. С. Получение нанодисперсных материалов и тонких пленок методами лазерной абляции в жидкости и в вакууме / Ю. С. Тверьянович, А. А. Маньшина, А. С. Тверьянович // Успехи химии. – 2012. – Т. 81, № 12. – С. 1091–1116. – ISSN 0042-1308.

124. Мишени для получения ВТСП 2 поколения методом импульсного лазерного напыления / А. Е. Воробьева, И. М. Абдюханов, Д. Н. Раков [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2012. – № 2 (73). – С. 108–113. – ISSN 3034-4670.

125. Политыко, К. Н. Анализ технологий нанесения высокоэнтропийных покрытий методом физического осаждения / К. Н. Политыко, И. В. Колесников, Д. С. Мантуров // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2024. – № 4. – С. 369–390.

126. Оура, К. Введение в физику поверхности / К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин ; под редакцией В. И. Сергиенко. – Москва : Наука, 2006. – 490 с.

127. Дермель, И. В. Особенности магнетронного распыления металлов в присутствии реактивных газов / И. В. Дермель, К. А. Шашкеев // Труды ВИАМ. – 2017. – № 11 (59). – С. 107–116.

128. Назаров, А. М. Формирование покрытий оксида циркония с пучково-плазменной обработкой / А. М. Назаров, А.И. Камардин, Ш.З. Курбанбаев // IRS. – 2025. – С. 496.

129. Патрушева, Т. Н. Растворные пленочные технологии : учебное пособие / Т. Н. Патрушева. – Красноярск : ИПК СФУ, 2010 – 304 с.

130. Model-based control of iron- and copper oxide particle distributions in porous γ -Al₂O₃ microspheres through careful tuning of the interactions during impregnation / B. Seynnaeve, J. Lauwaert, P. Vermeir [et al.] // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 276. – DOI 10.1016/j.matchemphys.2021.125428.

131. Холькин, А. И. Экстракционно-пиролитический метод получения оксидных функциональных материалов / А. И. Холькин, Т. Н. Патрушева. – Москва : Комкнига, 2006. – 187 с.

132. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 21.11.2023 № 817н «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» (зарегистрирован 30.11.2023 № 76179) // Контур. Норматив : справочно-правовая система. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=461108#l2> (дата обращения 27.11.2025).

133. Постановление Главного государственного санитарного врача от 02.12.2020 № 40 «Об утверждении санитарных правил СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» // Консорциум Кодекс [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573230583> (дата обращения 27.11.2025).

134. Green technology for functional coatings N.N. Khrapko, T.N. Patrusheva, S.K. Petrov // V International conference “Actual Scientific & Technical Issues of Chemical Safety” (ASTICS-2020) : Book of Abstracts. – 2020. – P. 121–122.

135. Холькин, А. И. Достижения в области функциональных покрытий, полученных экстракционно-пиролитическим методом / А. И. Холькин, Т. Н. Патрушева, Н. Н. Храпко, А. Л. Белоусов // *Металлургия цветных, редких и благородных металлов : сборник докладов XV Международной конференции имени члена-корреспондента РАН Геннадия Леонидовича Пашкова*. – Красноярск, 2022. – С. 207–214.

136. 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.

137. 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.

138. 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.

139. 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.

140. Modification of structure, electrical, linear and third-order nonlinear optical properties of spray pyrolyzed tin oxide films by deposition temperature / Н. Р. Asha, N. B. Gummagol, P. Sh. Patil, B. V. Rajendra // Superlattices and Microstructures – 2021. – Vol. 155. – Article no. 106920.

141. 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.

142. 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.

143. 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).

144. Разработка системы распыления раствора для синтеза тонкопленочных структур методом спрей-пиролиза / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, В. И. Кондрашин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 126–135. – DOI 10.21685/2072-3059-2021-4-10.

145. Таус, J. Optics of non-crystalline solids / J. Таус // In : Optical Properties of Solids. – North-Holland, 1966. – P. 277–313.

146. Materials Project : база данных [сайт]. – URL: <https://materialsproject.org/> (дата обращения: 09.12.2025). – DOI 10.17188/1272589.

147. Kittel, Ch. Introduction to solid state physics / Charles Kittel. – 8th ed. – John Wiley & Sons, Inc, 2005. – 680 с.

148. Rockenberger, A. Near-Edge X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy and Optical Analysis of NiO Thin Films / A. Rockenberger // Physical Review. B. – 1998.

149. Введенский, А. В. Электронные характеристики оксидов Cu(I) и Cu(II), анодно сформированных на монокристаллах меди / А. В. Введенский, С. Н. Грушевская, С. В. Ганжа // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 312–325.

150. Сомова, Ю. В. Обеспечение безопасности и экологичности технических систем : Практикум / Ю. В. Сомова, Е. А. Волкова, Е. А. Москвина. – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019. – 65 с.

151. Храпко, Н. Н. 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.

152. Методические указания МУК 4.3.4120-25 «Методы контроля. Гигиеническая оценка микроклимата на рабочих местах» – Введ. 2025-01-01. – Москва : Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. – 45 с.

153. Методика измерения параметров ультрафиолетового излучения для целей специальной оценки условий труда МИ УФ.ИНТ-12.01-2024. – Москва : ООО «ПРОММАШ ТЕСТ Метрология», 2024. – 17 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ
И.о. ректора
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова»
д.т.н., профессор


А.Е. Шапурин
«23» 05 2025 г.



УТВЕРЖДАЮ
Руководитель группы
ООО «Комбайновый завод
«РОСТСЕЛЬМАШ»


Н.С. Лупарь
«15» 05 2025 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом установлено, что по результатам диссертационного исследования преподавателя кафедры Е5 «Экология и производственная безопасность» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» Храпко Натальи Николаевны в обществе с ограниченной ответственностью «Комбайновый завод «Ростсельмаш» испытаны и внедрены практические рекомендации и технологии, позволяющие снизить до санитарных норм воздействие теплового излучения и неионизирующего излучения оптического диапазона (УФ), возникающего при эксплуатации оборудования на рабочих местах литейного и сварочного цехов следующих рабочих местах: электрогазосварщик, кузнец, литейщик и термист, на рабочих участках которых эксплуатируются оборудование являющееся источником теплового или ультрафиолетового излучения.

Практические рекомендации включают:

- технологию нанесения оксидных покрытий на средства защиты от теплового излучения и неионизирующего излучения оптического диапазона (УФ);
- рекомендации по выбору места установки защитных конструкций.

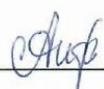
Разработанный комплекс мероприятий обеспечивает снижение уровня теплового излучения и неионизирующего излучения оптического диапазона в производственных цехах и может быть использован как при проектировании, так и при модернизации защитных конструкций. Разработанная технология имеет высокую степень универсальности, простоты нанесения и технологичности, основана на использовании отечественных материалов и обеспечивают выполнение санитарных норм, что улучшает класс условий труда до 2.

Ожидаемый социально-экономический эффект, полученный за счет улучшения условий труда может быть оценен после широкого внедрения на объектах исследования.

От ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова
преподаватель кафедры Е5
«Экология и производственная
безопасность»


Н.Н. Храпко

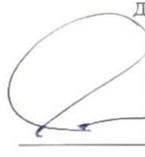
От организации
(123) Заместитель начальника отдела
охраны труда и промышленной
безопасности ООО «КЗ
РОСТСЕЛЬМАШ»


А.О. Фирсова



УТВЕРЖДАЮ
Ректор
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова
д.т.н., профессор


А.И. Шапурин
«5» _____ 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ
Директор по капитальному строительству и
эксплуатации
Акционерного общества «Научно-
производственное объединение
«Северо-Западный региональный центр
Концерна ВКО «Алмаз-Антей» -
Обуховский завод»


Клопов Ю.Д.

«10» _____ 12 _____ 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в акционерном обществе «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод» были апробированы и внедрены практические рекомендации и технологии, разработанные по итогам диссертационного исследования старшего преподавателя кафедры Е5 «Техносферная безопасность и вычислительная механика» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова Храпко Натальи Николаевны.

Внедрение направлено на обеспечение безопасности на рабочих местах литейного, термического и сварочного цехов (литейщик, термист, сварщик и другие) на рабочих участках которых эксплуатируется оборудование, являющееся источником теплового или ультрафиолетового излучения. Внедренные решения позволяют снизить уровни указанных факторов до требований санитарных норм.

Внедренный комплекс включает:

- Технологию нанесения оксидных покрытий на средства индивидуальной и коллективной защиты от теплового и ультрафиолетового излучения.
- Методические рекомендации по оптимальному размещению защитных экранов и конструкций.

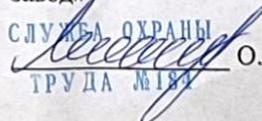
Разработанный комплекс мероприятий обеспечивает эффективное снижение уровней теплового и ультрафиолетового излучения в производственных помещениях. Предложенные решения применимы как при проектировании новых, так и при модернизации существующих систем защиты. Технология нанесения покрытий характеризуется высокой универсальностью, простотой применения, технологичностью и основана на использовании отечественных материалов. Внедрение обеспечивает приведение условий труда в соответствие с санитарными нормами, что позволяет улучшить класс условий труда на соответствующих рабочих местах до 2-го (допустимого).

Ожидаемый социально-экономический эффект, полученный за счет улучшения условий труда может быть оценен после широкого внедрения на объектах исследования.

От ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова
старший преподаватель кафедры Е5
«Техносферная безопасность и
вычислительная механика»


Н.Н. Храпко

От организации
Руководитель службы охраны труда
Акционерного общества «Научно-
производственное объединение
«Северо-Западный региональный центр
Концерна ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский
завод»


О.А. Скасырская

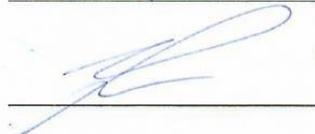


АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

Комиссия в составе начальника учебного управления М.В. Прудниковой, декана факультета Е «Оружие и системы вооружения» Е.А. Знаменского и и.о. заведующего кафедрой Е5 «Техносферная безопасность и вычислительная механика» А.Ю. Олейникова составила настоящий акт о том, что материалы диссертационного исследования Храпко Натальи Николаевны, старшего преподавателя кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», внедрены и используются в учебном процессе для обучения студентов по направлению подготовки бакалавриата 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.

Результаты исследований Храпко Н.Н. легли в основу ряда разделов лекций, а также нашли применение в лабораторных работах по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» и практических занятиях по дисциплинам «Безопасность механизмов и машин» и «Производственная безопасность».

Начальник учебного управления
Проректор по ОО
Декан факультета Е «Оружие и
системы вооружения»


М.В. Прудникова

Е.А. Знаменский

И.о. заведующего кафедрой Е5
«Техносферная безопасность и
вычислительная механика»


А.Ю. Олейников

Ст. преподаватель кафедры Е5
«Техносферная безопасность и
вычислительная механика»


Н.Н. Храпко