

На правах рукописи



Гравит Марина Викторовна

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**

2.10.1. Пожарная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор **Ватин Николай Иванович**, директор Научно-технологического комплекса "Цифровой инжиниринг в гражданском строительстве" ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, **Гордиенко Денис Михайлович**, заместитель генерального директора по техническому регулированию «Автономная некоммерческая организация в сфере поддержки отечественных производителей «Консорциум «Производители охранных, пожарных, СКУД, систем безопасности» (АНО «Консорциум ПОПСБ»), Москва

профессор, доктор технических наук **Швырков Сергей Александрович**, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты), федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (ФГБУ ВО Академия ГПС МЧС России), Москва

профессор, доктор технических наук **Сафонов Владимир Сергеевич**, главный научный сотрудник Центра технологического прогнозирования и научно-технической информации ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), Москва

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха

Защита состоится «16» декабря 2025 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета У.2.10.1.33 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан "___" 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
У.2.10.1.33
кандидат технических наук, доцент

Бызов Антон Прокопьевич

3 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Пожарная безопасность производственных объектов нефтегазового комплекса (НГК) является важной государственной частью стратегии защиты жизни, здоровья людей, а также имущества от угроз военного, техногенного и экологического характера. Одним из основных элементов обеспечения пожарной безопасности таких объектов является требование к высокому уровню устойчивости их конструктивных систем при чрезвычайной ситуации, достигаемого, в том числе, применением средств огнезащиты.

Стальные конструкции зданий и сооружений производственных объектов НГК, в особенности производств с обращением сжиженных углеводородов, следует защищать не только от пожара, но и от криогенных разливов, поэтому необходимо использовать огнезащитные материалы, которые должны сохранять огнезащитную эффективность в диапазоне температур от -200°C до 1200 °C.

Под производственными объектами НГК, на которые могут воздействовать опасные факторы пожара, в работе понимаются объекты транспортирования, хранения, переработки углеводородов и их стальные конструкции: палубы и переборки танкеров, морских нефтедобывающих платформ, наружные установки, этажерки и эстакады (далее – объекты защиты).

В концепции вероятностного подхода к обеспечению пожарной безопасности, специалистами используется принцип, в котором согласно дереву событий, возможны аварии с разливом сжиженных углеводородов, воздействие криогенной жидкости на стальные конструкции и дальнейшее возгорание углеводородов в режиме реального пожара, т.е. пожара, обусловленного количеством разлившегося продукта [1,2,3].

Методами вычислительной гидродинамики (CFD) возможно воспроизвести достаточно близкую к реальности модель области распространения температуры и теплового потока в воздушной среде. Моделирование тепломассопереноса позволяет проанализировать динамику прогрева (или охлаждения) конструкций, прогнозировать поведение строительных конструкций при огневом и криогенном воздействии, определить теплофизические характеристики средств огнезащиты, подобрать требуемую толщину (расход) средства огнезащиты, и, как результат, сократить количество дорогостоящих экспериментов [4,5,6].

При проектировании крупных объектов нефтегазодобычи, переработки и транспортировки углеводородов, в следствии отсутствия требований в нормативных документах по пожарной безопасности, разрабатываются специальные технические условия (СТУ), в которых приводятся компенсирующие мероприятия по противопожарной защите. Учитываются положения зарубежных стандартов, таких как стандарты Национальной ассоциации по противопожарной защите (NFPA) и рекомендации Американского нефтяного института (API). При этом положения российских норм (в которых отсутствуют требования к огнестойкости конструкций с учетом углеводородного режима пожара – Н-режима, а только целлюлозного или стандартного – S-режима), являются приоритетными.

Проектные решения, принятые на объектах, требуют подтверждения соответствуя требованиям ст.6 Технического регламента о требованиях пожарной безопасности ФЗ-123 (ТРоПБ) в части величин пожарного риска. Расчеты пожарного риска выполняются согласно положениям «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (утверждена Приказом МЧС России от 26 июня 2024 года № 533), в которой не устанавливаются требования к огнестойкости строительных конструкций.

Основное требование к огнестойкости конструктивных и технологических элементов технологических линий и сооружений состоит в том, чтобы при возникновении аварии, связанной с пожаром, избежать расширения масштабов аварии и обеспечить возможность

эвакуации и/или покидания персоналом в установленное время, в соответствии с п.3, ст. 53 ТРоТПБ, где «безопасная эвакуация людей из зданий и сооружений при пожаре считается обеспеченной, если интервал времени от момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей в безопасную зону не превышает необходимого времени эвакуации людей при пожаре». Для расчета огнестойкости конструкций предлагается рассматривать как пожароопасную ситуацию все сценарии, где возможен пожар-взрыв, а не только те сценарии, которые представляют угрозу для жизни и здоровья людей. То есть, необходимо рассматривать ситуации, в которых не возникает опасность для жизни и здоровья людей (по причине их отсутствия), но существует пожаровзрывоопасный технологический процесс, например, управляемый дистанционно и за счет виртуальной и дополненной реальности (VR/AR). Специалистами проводится оценка риска аварий, однако не проводится оценка огнестойкости сооружений, поскольку отсутствуют расчетно-аналитические методы для расчета огнестойкости конструкций с пожаровзрывоопасным технологическим оборудованием при воздействии углеводородного и факельного горения [7]. В связи с экспансией мировой нефтегазовой промышленности в Арктику, актуальной является и защита указанных конструкций материалами, устойчивыми не только к воздействию углеводородного режима и криогенного разлива, но и к морскому и арктическому климату.

Необходимо, чтобы такой элемент пожарной безопасности как огнестойкость строительных конструкций, рассматривался системно, а не как набор отдельных превентивных событий. Согласно работам проф. Бурлова В.Г. [8] и др. представителей научно-педагогической школы «Системная интеграция процессов государственного управления» (г. Санкт-Петербург, Россия), теория функциональных систем и закон сохранения целостности предполагают условия обеспечения безопасности: законность, приоритет предупредительных мер, взаимодействие различных органов и организаций, наличие ресурсов и механизмов контроля. Приоритет предупредительных мер предполагает выявление и устранение потенциальных угроз, а также разработку и внедрение профилактических мероприятий, к которым относятся и мероприятия по повышению огнестойкости строительных конструкций.

Таким образом, в отсутствии научно-методического обеспечения для обоснования огнестойкости строительных конструкций зданий и сооружений объектов нефтегазового комплекса в условиях углеводородного горения, в том числе за счет применения огнезащитных материалов, стойких к криогенному разливу сжиженных углеводородов и к арктическому климату, требуются новые научно-обоснованные решения, внедрение которых имеет важное политическое и экономическое значение для Российской Федерации.

Степень разработанности темы исследования. Обеспечение пожарной безопасности объектов защиты НГК, а также, в частности, задачу повышения пределов огнестойкости конструкций с использованием различных средств огнезащиты рассматривали многие исследователи, среди которых следует упомянуть работы А.Н. Баратова, В.Р. Малинина, А.Я. Корольченко, В.И. Голованова, В.И. Присадкова, И.С. Молчадского, С.В. Пузача, Д.М. Гордиенко, Д.А. Корольченко, Н.И. Константиновой, Т.Ю. Ереминой, И.А. Болодьяна, О.А. Зыбиной, А.Ю. Шебеко, Ю.Н. Шебеко, В.П. Молчанова, И.Р. Хасanova, С.А. Швыркова, С.Г. Шуклина, С.В. Сафонова, А.С. Смирнова, А.Н. Гаращенко, В.Л. Страхова, Schaumann, P., Imran, M., Nolan, D.P., Put F., Wang WeiYong, Jiang Jian, Mahendran Mahen, Venkatesh Kodur, Jihong Ye, Jiang, Juncheng, Lucherini, A. и других.

В отличие от целлюлозного S-режима, влияние более интенсивного огневого воздействия Н-режима на конструкции требует изучения поведения как огнезащитных покрытий, так и непосредственно самих конструкций без огнезащиты. Для оценки огнестойкости конструкций широко применяется нестационарный анализ теплопередачи на основе метода конечных элементов. Экспериментально-аналитических системных исследований по потере прочности стальных конструкций в условиях Н-режима с различными видами огнезащиты и установление соотношений между пределами огнестойкости конструкций при различных режимах пожара в

литературе не обнаружено [9]. Исследуются незащищенные стальные конструкции [10, 11], конструкции с интумесцентной огнезащитой [12,13,14], с штукатурными и цементными составами [15], интумесцентной защитой и цементными плитами [14]. Авторы в [16] получили расчетную зависимость между приведенной толщиной незащищенной стальной конструкции и ее пределом огнестойкости для S- и H-режима пожара. Расчет деформации сжатых и изгибаемых стальных конструкций выполнен в докторской диссертации проф. Голованова В.И. для S-режима и традиционных средств огнезащиты (гипсокартонные листы, водные интумесцентные составы), однако воздействие H-режима на стальные конструкции и современные огнезащитные средства в работе не рассматривалось.

Целью работы является разработка усовершенствованного научно-обоснованного метода обеспечения огнестойкости стальных конструкций производственных объектов нефтегазового комплекса, в том числе с использованием новых огнезащитных материалов в условиях различных температурных режимов пожара. Для достижения указанной цели предстояло решить следующие задачи:

1. На основе экспериментальных данных по определению пределов огнестойкости конструкций с различными видами огнезащиты при воздействии различных температурных режимов разработать числовые модели для получения расчетных теплофизических характеристик и, соответственно, возможности прогнозирования пределов огнестойкости стальных конструкций.

2. Разработать математическую модель, позволяющую прогнозировать достижение температуры 500°C на необогреваемой стороне стальной конструкции с конструктивной огнезащитой с минимальной суммарной стоимостью огнезащитного материала.

3. Идентифицировать основные факторы, определяющие теплофизические свойства огнезащитных покрытий интумесцентного типа, влияющие на процесс термолитического формирования пенококсового теплоизолирующего слоя и установить функциональный вклад базовых компонентов интумесцентной композиции на распределение пор и коэффициент вспучивания пенококса.

4. Разработать методику расчета фактических пределов огнестойкости стальных конструкций наружных установок, эстакад и этажерок для объектов НГК с учетом определения зоны воздействия пожара углеводородов.

5. Разработать новые средства огнезащиты стальных конструкций производственных объектов нефтегазового комплекса, защищающие их от углеводородного и тоннельного режима пожара, а также рассмотреть рациональные способы нанесения эпоксидных огнезащитных покрытий.

6. Разработать требования к средствам огнезащиты при проектировании работ по огнезащите стальных конструкций зданий и сооружений НГК.

Объект исследования – устойчивость объекта защиты НГК при воздействии различных режимов пожара: стандартного (S), углеводородного (H) и струйного (Jet-Fire).

Предмет исследования – повышение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций объекта НГК при различных режимах пожара, в том числе с огнезащитой.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) получены новые расчетные коэффициенты эффективной теплопроводности и теплоемкости для средств огнезащиты стальных конструкций, в том числе для ограждающих и несущих конструкций палуб и морских платформ при углеводородном пожаре;

2) впервые разработана математическая модель, обеспечивающая достижение требуемых показателей конструктивной огнезащиты стальной конструкции при минимальной суммарной стоимости материала;

3) получены новые эффективные композиционные материалы на негорючих и полимерных компонентах для обеспечения высоких пределов огнестойкости строительных конструкций при воздействии стандартного, углеводородного и тоннельного режима пожара;

установлено влияние концентраций интеркалированного графита и типа связующего на огнезащитную эффективность рулонных интумесцентных покрытий;

4) уточнены и получены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между временем достижения критической температуры стальной конструкции с огнезащитой, позволяющие прогнозировать пределы огнестойкости при углеводородном режиме пожара, при известных значениях для стандартного режима, и соответственно, существенно снижать затраты на проведение экспериментов, регулируя расход средств огнезащиты;

5) разработана методика по определению фактических пределов огнестойкости стальных конструкций в зависимости от зон воздействия пожара, позволяющая рационально применять средства огнезащиты и более точно определять пределы огнестойкости конструкций.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в формировании научно-обоснованных положений, отражающих возможности повышения пределов огнестойкости стальных конструкций для объектов НГК за счет применения новых средств огнезащиты. Разработаны рецептуры и технологии высокоэффективных средств огнезащиты для применения на стальных конструкциях в условиях углеводородного режима пожара и криогенного воздействия. Разработана методика определения фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом определения воздействия зон пожара на объектах НГК с использованием полевой модели пожара и конечно-элементных моделях конструкций. Разработана методика нанесения интумесцентного средства огнезащиты с учетом принципов бережливого строительства, позволяющая сокращать производственные затраты и трудовые ресурсы до 30%. Значимость работы, в том числе, заключается в получении большого объема эмпирических данных, которые позволяют верифицировать теоретические положения исследования и служить основой для развития новых теоретических положений в будущих исследованиях.

Методология и методы исследования. Использованы современные методы экспериментального исследования огнестойкости строительных конструкций с огнезащитой, позволяющие получать достоверные результаты. Моделирование динамики распространения опасных факторов пожара проводилось в программном комплексе Pyrosim (Thunderhead Engineering Consultants, США), реализующим вычислительную гидродинамическую модель тепломассопереноса при горении. Квадратичная оптимизация проводилась в Microsoft Excel. Моделирование прогрева конструкций для решения обратной задачи теплопроводности проводилось в программных комплексах SOFiSTiK (Германия), ANSYS (США), ELCUT (ООО Тор, Россия), реализующих метод конечных элементов. Структуру поверхности пенококса интумесцентных покрытий определяли с помощью СЭМ Tescan Vega 3 SBH (Tescan, Чехия). Распределение порового пространства пенококса оценивали в программе ВидеоТест (г. Санкт-Петербург, Россия). Поведение интумесцентных сеток и отдельных ингредиентов при термоанализе изучались на синхронном термоанализаторе Shimadzu DTG-60 (Shimadzu Corporation, Япония). Модуль упругости интумесцентных сеток определяли на разрывной машине Shimadzu AG-X Plus 50kN (Shimadzu Corporation, Япония). Маломасштабные огневые испытания проводились в испытательной печи, реализующей стандартный и углеводородный температурный режим, производства ООО «НПК ПРОМИЗОЛ» (г. Москва, Россия).

Положения, выносимые на защиту:

1. Показатели эффективных теплофизических характеристик средств огнезащиты при высокотемпературном воздействии, полученные с использованием методов численного моделирования.

2. Математическая модель, позволяющая для конструктивных огнезащитных материалов производить обоснованный выбор технических характеристик огнезащитного материала по критерию минимизации удельной стоимости материала при обеспечении требований в части температурного воздействия на материал конструкции.

3. Особенности рецептур, механические и эффективные теплофизические характеристики новых средств огнезащиты для стальных конструкций в условиях стандартного и углеводородного режимов пожара.

4. Методика расчета огнестойкости стальных конструкций наружных установок, эстакад и этажерок объектов НГК с учетом расчетов проектной аварии (зоны воздействия пожара) и результаты оценки пределов огнестойкости стальных конструкций эстакад и этажерок объектов НГК.

5. Комплекс требований и рекомендации по выбору огнезащиты для стальных конструкций объектов НГК при выполнении проектных работ.

Степень достоверности результатов обоснована применением современных методов экспериментального исследования огнестойкости строительных конструкций, позволяющих получать достоверные результаты. Применены современные программные комплексы для теоретического изучения процессов теплопередачи.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует: п.2 «Разработка методологических основ и нормативных положений, направленных на обеспечение пожарной безопасности объектов защиты с целью возможности предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара»; п.5 «Исследование проблем повышения устойчивости объектов защиты к воздействию опасных факторов пожаров и их сопутствующих проявлений»; п. 7 «Разработка и совершенствование методов оценки, диагностики и прогнозирования, направленных на повышение огнестойкости строительных конструкций и объектов защиты»; п. 10 «Разработка научных основ, моделей и методов, направленных на создание и применение веществ и материалов пониженной горючести, средств огнезащиты и огнетушащих веществ».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях различных уровней, включая международные: международная научно-практическая конференция «Пожарная безопасность ТЭК» (2025 г., Оренбург), международный строительный форум 100+TECHNO BUILD (2024 г., Екатеринбург), I международная конференция «Безопасность городов с развитием электрического транспорта» (2024, Туапсе), IV международная конференция «Материалы и технологии в нефтегазовой отрасли. Коррозия» (2024, г. Санкт-Петербург), 17-я международная конференция по освоению ресурсов нефти и газа российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ «RAO/CIS OFFSHORE» (2023, г. Санкт-Петербург), XI Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» (2023 г., г. Волгоград); I международная конференция «Огнезащита строительных конструкций и материалов» (2023 г., г. Санкт-Петербург); XXII международной конференции «HEMs-2022», 2022 г., г. Томск); XV международная конференция «НЕФТЕГАЗСТАНДАРТ – 2021» (2021 г., г. Санкт-Петербург), 15-я международная конференция по освоению ресурсов нефти и газа российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ «RAO/CIS OFFSHORE» (2021 г., г. Санкт-Петербург), 4-я международная конференция по судостроению и развитию инфраструктуры континентального шельфа OMR 2020 (2020 г., г. Санкт-Петербург); International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering EECE-2020 г., г. Санкт-Петербург); VII международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018), (2018 г., г. Новосибирск); VII Международная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (2018 г., г. Москва); III Международная конференция по судостроению и развитию инфраструктуры континентального шельфа Offshore Marintec Russia, (2018 г., г. Санкт-Петербург); 13-я международная конференция по освоению ресурсов нефти и газа российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ «RAO/CIS OFFSHORE» (2017 г., г. Санкт-Петербург).

Научные результаты, приведенные в работе, получены при финансовой поддержке Комитета по науке и Высшей школе правительства Санкт-Петербурга (гранты Правительства

Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, 2022 г., 2025 г.), Российского фонда фундаментальных научных исследований (грант 23-29-00618).

Практическая значимость и реализация результатов работы:

- 1) предложен и научно обоснован комплекс требований к огнезащите стальных конструкций зданий и сооружений НГК, который использован при разработке нормативных документов по пожарной безопасности и отраслевых документах:
 - ГОСТ Р 55994–2014 «Испытания на огнестойкость. Руководящие указания по планированию и проведению крупномасштабных испытаний и моделированию без использования печи»;
 - ГОСТ Р ЕН 1336-2-2014 «Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы»;
 - ГОСТ Р 70446–2022 «Конструкции строительные. Средства огнезащиты деформационных швов. Методы испытаний на огнестойкость»;
 - СТО ПАО ГАЗПРОМ «Система обеспечения пожарной безопасности ПАО ГАЗПРОМ. Системы противопожарной защиты. Средства огнезащиты. Нормы проектирования и эксплуатации»; «Система обеспечения пожарной безопасности ПАО ГАЗПРОМ. Системы противопожарной защиты. Средства огнезащиты. Общие технические условия»;
 - СТО АРСС «Методические рекомендации по разработке проекта огнезащиты стальных конструкций»;
 - СП XX.XXXXX.2025 Конструкции стальные строительные. Правила обеспечения огнестойкости;
- 2) выполнена НИР по расчету критических температур и времени их достижения в условиях реального режима пожара для металлических ферм покрытия для производственного объекта «Центр строительства морских сооружений. Комплекс для изготовления оснований гравитационного типа» (Россия, Мурманская обл., Кольский р-он, село Белокаменка);
- 3) выполнены разделы НИР «Обеспечение огнестойкости зданий на объектах организаций системы «Транснефть», в части сравнительного анализа различных средств огнезащиты для объектов НГК и типовых проектных решений огнезащиты стальных конструкций и узлов сопряжения стальных конструкций зданий организаций системы «Транснефть» для ООО «НИИ Транснефть»;
- 4) выполнены разделы НИР «Лабораторные испытания лакокрасочных и огнезащитных покрытий с высоким уровнем адгезии для районов Крайнего Севера» для ООО «Газпромнефть НТЦ»;
- 5) разработаны и внедрены в серийное производство новые виды огнезащиты для строительных конструкций: конструктивная изгибающаяся (рулонная) интумесцентная огнезащита, сочетающая признаки конструктивной и интумесцентной огнезащиты, а также огнезащитные чехлы из негорючих рулонных материалов, позволяющие достичь высоких пределов огнестойкости (180 и более минут). Разработанные соискателем материалы внедрены более чем на 150 строительных объектах, в том числе в процессе строительства станции метро Нижегородская, а также на перегонах Некрасовской линии БКЛ Московского метрополитена.

Публикации. По результатам выполненных по теме диссертационной работы исследований опубликовано 58 работ, из них 23 - изданиях из перечня ВАК для публикации результатов докторских диссертаций, 22 - в журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Личное участие автора. Личный вклад автора заключается в постановке решаемых задач, руководстве и непосредственном участии в проведении экспериментальных и теоретических исследований, анализе полученных результатов, формулировке основных положений и

выводов по результатам исследований, руководство работами по исследованиям и внедрению результатов исследований.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 288 источников. Диссертация изложена на 276 страницах, не включая приложения, содержит 85 таблиц, 192 рисунка, список сокращений и условных обозначений, пять приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована научная проблема, цель и задачи исследования, представлены степень разработанности, объект и предмет исследования, сформулированы положения, характеризующие научную новизну работы и ее теоретическую и практическую значимость.

В главе 1 представлен анализ исследований, представленный в мировой литературе по обеспечению пределов огнестойкости стальных конструкций объектов НГК при условии воздействия S-, H- и Jet-Fire и реального режимов пожара, выполнен анализ требований к огнестойкости строительных конструкций на объектах нефтегазового комплекса в зарубежных и российских нормативных документах. Установлено, что отсутствуют расчетно-аналитические методы для расчета огнестойкости конструкций наружных установок, этажерок и эстакад с пожаровзрывоопасным оборудованием при различных температурах пожара [7]. На рисунке 1 показаны графики коэффициента отношения пределов огнестойкости $K = H/S$ для S- и H-режимов от критической температуры T_{kp} для стальных пластин без огнезащиты, полученные соискателем на основе известных данных для S- и H-режимов [14]. Как видно из рисунка 1, тренд-линии коэффициента соотношения предела огнестойкости для конструкции с приведенной толщиной 5 мм при 500°C составляет 3,3, что коррелирует с данными [11], где авторы для менее массивной конструкции получили коэффициент $K = 3,57$.

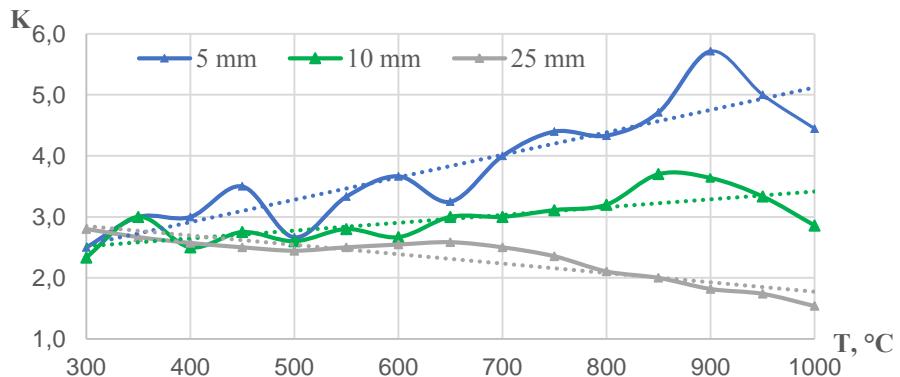


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента отношение пределов огнестойкости K для S- и H-режимов от критической температуры T_{kp} для незащищенных стальных пластин

В литературе не обнаружены масштабные экспериментальные исследования по определению взаимосвязи времени достижения T_{kp} при S- и H- режимах пожара при применении различных средств огнезащиты для стальных конструкций, кроме отчета инженеринговой и страховой компании AXA XL (прежнее название GAPS (2020), США) [17]. В отчете не приводятся данные по толщине материалов, их плотности, эффективной теплопроводности, поэтому сделать какие-либо выводы о зависимостях, которые позволяют

приближенно оценивать предел огнестойкости конструкции для Н-режима пожара, если известен предел огнестойкости для S-режима, не представляется возможным.

На основании выполненного анализа научных работ по теме диссертации произведен **выбор направлений исследования:**

- 1) провести теоретические и экспериментальные исследования по достижению пределов огнестойкости конструкций с различными средствами огнезащиты при воздействии стандартного, углеводородного режимов пожара и криогенного воздействия:
 - палуб и переборок нефтеналивных танкеров и нефтяных платформ;
 - огнезащитных штукатурных составов и эпоксидных красок;
 - плитных материалов;
 - новых разработанных средств огнезащиты на основе базальтового и кремнеземного волокна, интумесцентной рулонной огнезащиты с возможностью сухого монтажа в условиях арктического климата;
- 2) разработать математическую модель, позволяющую для конструктивных огнезащитных материалов производить обоснованный выбор технических характеристик огнезащитного материала по критерию минимизации удельной стоимости материала при обеспечении требований в части температурного воздействия на материал конструкции;
- 3) методом численного моделирования получить теплофизические характеристики средств огнезащиты конструкций с целью прогнозирования поведения конструкций и рационального выбора теплоизоляционного слоя;
- 4) разработать методику расчета фактических пределов огнестойкости стальных конструкций производственных объектов НГК;
- 5) предложить комплекс требований при проектировании работ по огнезащите стальных несущих конструкций зданий и сооружений НГК и разработать рекомендации по критерию выбора средств огнезащиты для стальных конструкций НГК.

Глава 2 посвящена экспериментальным и расчетно-аналитическим методам определения огнестойкости конструкций и огнезащитной эффективности средств огнезащиты при различных температурных воздействиях. На примере объекта защиты с габаритами в осях 280,0×335,5 м, высотой до низа ферм покрытия от 66,5 до 82,5 м использовалась полевая модель пожара с горючей нагрузкой в виде ацетилена и ПВХ-оболочки кабеля, определялось воздействие на конструкции температуры среды и время достижения незащищёнными стальными конструкциями критической температуры T_{kp} . Показано, что пределы огнестойкости ферм на различной высоте не достигают требуемых значений R15 при различных режимах пожара, с учетом работы автоматической противопожарной защиты через 6 мин после начала пожара. Разница в огнестойкости незащищенных стальных конструкций ферм при минимальной $T_{kp} = 500^{\circ}\text{C}$ составила для S-режима от 13,5–25,4 мин, для Н-режима 5,2–11,1 мин, для моделируемого (реального) пожара через 6 мин температура на поверхности ферм составила $T = 25\text{--}50^{\circ}\text{C}$.

В разделе 2.3 представлена математическая модель, позволяющая для конструктивных огнезащитных материалов производить выбор технических характеристик огнезащитного материала по критерию минимизации удельной стоимости. Для расчета использовались зависимости (1), (2), основанные на фундаментальной теории теплопередачи и подтвержденные огромным количеством экспериментальных данных, полученных европейскими исследователями на протяжении более чем 30 лет [18].

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot \frac{A_p}{V}}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \frac{\varphi}{3})} \cdot \Delta t - (e^{\frac{\varphi}{10}} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (1)$$

$(\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \theta_{g,t} > 0)$, где

$$\varphi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} \quad (2)$$

где A_p/V - коэффициент сечения для стальных конструкций с огнезащитой (м^{-1}); c_p - удельная теплоемкость огнезащитного материала ($\text{Дж}/(\text{кг К})$); d_p - толщина огнезащитного материала (м); Δt - промежуток времени (с); $\theta_{a,t}$ - температура стали в момент времени t ($^{\circ}\text{C}$); $\theta_{g,t}$ - температура среды в момент времени t ($^{\circ}\text{C}$); $\Delta\theta_{g,t}$ - увеличение температуры среды за промежуток времени Δt (К); λ_p - коэффициент теплопроводности огнезащиты ($\text{Вт}/(\text{м К})$); ρ_a - плотность огнезащитного материала ($\text{кг}/\text{м}^3$).

В качестве целевой функции рассматривалась функция зависимости удельной стоимости от основных характеристик теплоизоляционного материала. Математическая модель представлена выражением, где:

$$\tilde{y}^{I(II)} = s_{p=0}^{I(II)} + \sum_{j^{I(II)}=1}^{n^{I(II)}} \left(s_{p=j^{I(II)}}^{I(II)} \cdot x_{j^{I(II)}} + s_{p=n^{I(II)}+j^{I(II)}}^{I(II)} \cdot x_{j^{I(II)}}^2 \right) \quad (3)$$

$\tilde{y}^{I(II)}$ - прогнозное значение удельной стоимости огнезащитного материала, руб/ м^2 ; n - количество характеристик огнезащитного материала, определяющих его удельную стоимость, ед.; $s_{p=0}^{I(II)}$ - компонента удельной стоимости; s^I - параметры, описывающие состояние огнезащитного материала на момент начала пожара, характеризующиеся относительно большим влиянием на удельную стоимость материала (d_p, λ_p при 20°C , c_p при $20^{\circ}\text{C}, \rho_a$); s^{II} - параметры, характеризующиеся относительно небольшим влиянием на удельную стоимость материала (коэффициенты увеличения λ_p и c_p при $300^{\circ}\text{C}/500^{\circ}\text{C}$). Целевая функция сформирована на основе статистических данных по видам огнезащитного материала с использованием метода наименьших квадратов, который определяет параметры s_0, s_1, \dots, s_n зависимостями, при которых достигается минимальное значение суммы квадратов отклонений прогнозных значений удельной стоимости от фактических значений.

Модель определяется выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{p=0}^I + \sum_{j^I=1}^{n^I} \left(s_{p=j^I}^I \cdot x_{j^I} + s_{p=n^I+j^I}^I \cdot x_{j^I}^2 \right) + s_{p=0}^{II} + \sum_{j^{II}=1}^{n^{II}} \left(s_{p=j^{II}}^{II} \cdot x_{j^{II}} + s_{p=n^{II}+j^{II}}^{II} \cdot x_{j^{II}}^2 \right) \rightarrow \min; \\ \min_i \{x_{ij}\} \leq x_j \leq \max_i \{x_{ij}\}, j = 1, 2, \dots, n; \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \min_i \left\{ \frac{x_{ij}}{x_{ij'}} \right\} \cdot x_{j'} \leq x_j \leq \max_i \left\{ \frac{x_{ij}}{x_{ij'}} \right\} \cdot x_{j'}, j = 2, 3, \dots, n; j' = 1, 2, \dots, j-1; \\ \theta_{a,k=N}(\{x_j\}) \leq \theta_a^{\max}. \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \min_i \left\{ \frac{x_{ij}}{x_{ij'}} \right\} \cdot x_{j'} \leq x_j \leq \max_i \left\{ \frac{x_{ij}}{x_{ij'}} \right\} \cdot x_{j'}, j = 2, 3, \dots, n; j' = 1, 2, \dots, j-1; \\ \theta_{a,k=N}(\{x_j\}) \leq \theta_a^{\max}. \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \min_i \left\{ \frac{x_{ij}}{x_{ij'}} \right\} \cdot x_{j'} \leq x_j \leq \max_i \left\{ \frac{x_{ij}}{x_{ij'}} \right\} \cdot x_{j'}, j = 2, 3, \dots, n; j' = 1, 2, \dots, j-1; \\ \theta_{a,k=N}(\{x_j\}) \leq \theta_a^{\max}. \end{array} \right. \quad (7)$$

На рисунке 2 показана блок-схема модели для расчета стоимости конструктивного огнезащитного материала.

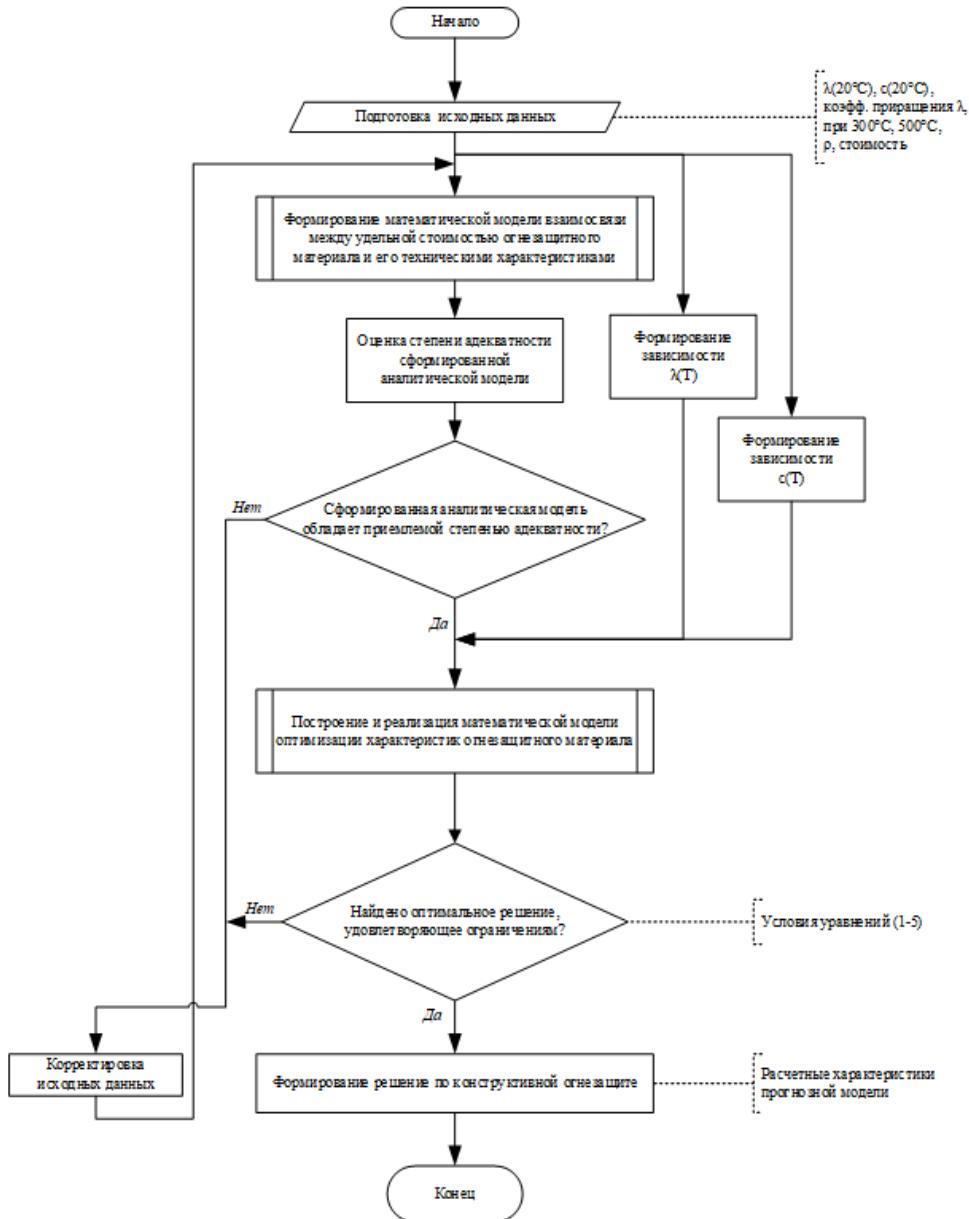
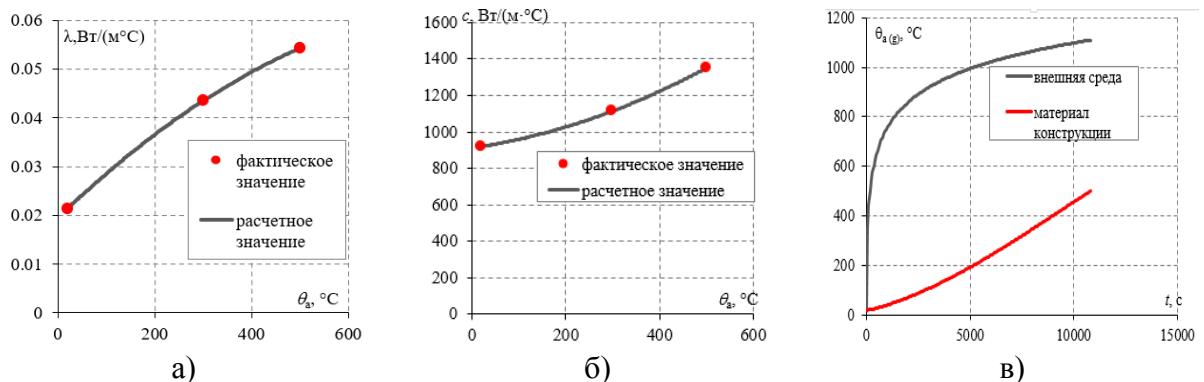


Рисунок 2 - Блок-схема модели для расчета стоимости огнезащитного материала

В результате решения задачи целевой функции в системе ограничений нелинейной оптимизации (задачи нелинейного программирования) определены расчетные значения прогнозных параметров эффективных коэффициентов λ и c конструктивных средств огнезащиты (рисунок 3).

Рисунок 3 – Зависимости параметров λ (а), c (б) от Θ (в) для решения с минимальной стоимостью, полученные в модели для трех опорных точек

Составлена выборка из 39 конструктивных огнезащитных материалов, таких как плиты на основе минеральной, базальтовой, керамической ваты, цементные и вермикулитные плиты, чехлы и кожухи. Значения переменных вычислялись с помощью генетических алгоритмов в среде Excel и надстройки Excel, инструмент «Поиск решения» (Solver). Коэффициент детерминации R для прогнозной модели составил 0,948. Прогнозная удельная стоимость огнезащитного конструктивного материала \bar{y} составила 574,497 руб./ m^2 .

Глава 3 посвящена огнестойкости конструкций морских платформ и танкеров в условиях S- и H-режимов и моделированию экспериментов для решения обратной задачи теплопроводности с целью получения эффективных теплофизических характеристик и определения рационального расхода средств огнезащиты. Предельными состояниями являлись параметры по потере целостности Е и теплоизолирующей способности I.

Исследовались переборки классов H-0, H-60, H-120, A-15, A-60 и палуба H-120 с теплоизоляцией минераловатными плитами. Испытания образцов переборок класса А по определению времени достижения предельного состояния в процессе огневого воздействия проводились согласно Резолюции ИМО А.754(18) «Рекомендация по испытаниям на огнестойкость для переборок классов "А", "В" и "F"», 1993 г. при условии создания в огневой камере печи S-режима. Испытания образцов класса Н проводились согласно H-режиму по EN 1363-2:1999 Fire Resistance Tests—Part 2: Alternative and Additional Procedures. На основе экспериментальных данных проведено моделирование прогрева переборок и палубы в ПК ELCUT на основе конечно-элементной модели с использованием связывания задач нестационарной теплопередачи и механических напряжений и деформаций (рисунок 4). Применились граничные условия 3-го рода, коэффициенты конвекции приняты согласно EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on Structures—Part 1–2: General Actions—Actions on Structures Exposed to Fire.

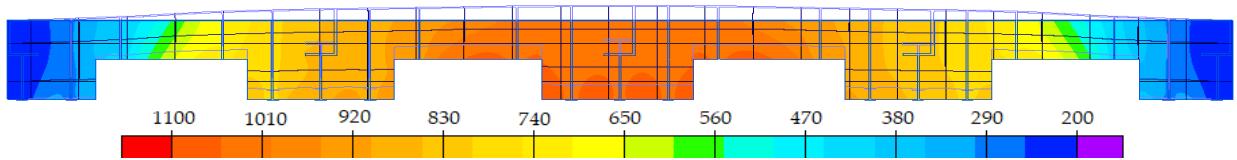


Рисунок 4 – Деформационная схема палубы H-120 в модели ELCUT

Получены расчетные зависимости температуры от времени в точках расположения термопар на необогреваемой поверхности для переборок и палубы. Расхождение с экспериментальными данными для образцов класса Н составило не более 5% (рисунок 5).

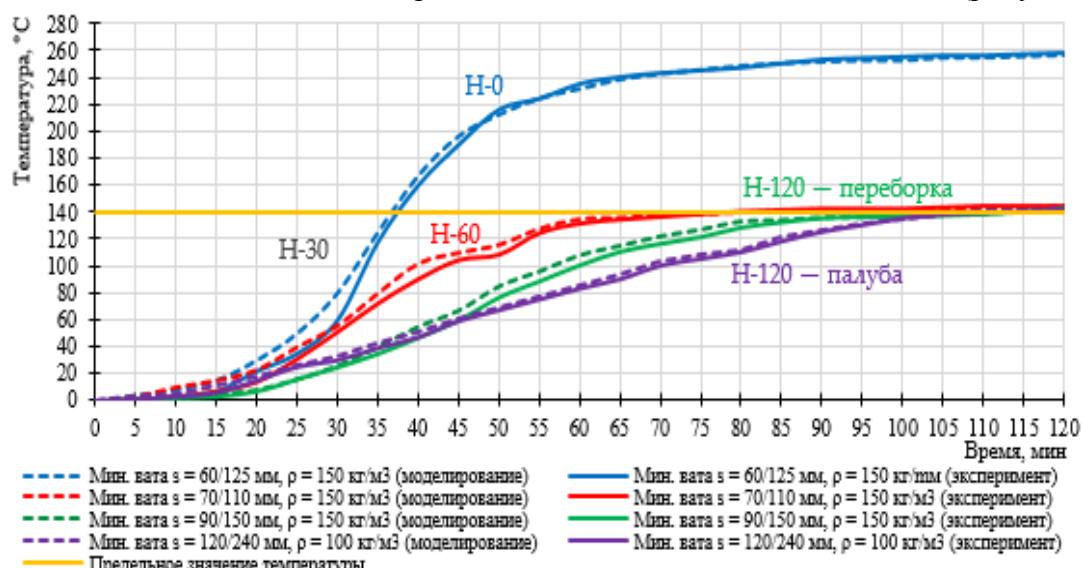


Рисунок 5 – Графики зависимости температура-время для образцов при H-режиме

Для получения требуемых пределов огнестойкости переборок класса А использовалась минеральная вата $\rho = 80\text{--}100 \text{ кг}/\text{м}^2$ с расходом материала 40–85 мм (толщина плит). Для класса Н применялась более плотная минеральная вата (от 100 $\text{кг}/\text{м}^2$) с расходом 110–240 мм. Для защиты стальных палуб и переборок при Н-режиме с толщиной стали 4,5–5 мм, следует на 70–80% увеличивать расход минеральной ваты и применять большую плотность по сравнению с S-режимом.

Результаты моделирования показали, что проектирование переборок Н-0 с толщиной изоляции 60/125 мм и $\rho = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$, Н-120 с толщиной изоляции 90/150 мм и $\rho = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$, А-15 с толщиной изоляции 40 мм и $\rho = 80 \text{ кг}/\text{м}^3$, А-60 с толщиной изоляции 60/85 мм и $\rho = 100 \text{ кг}/\text{м}^3$ и палубы Н-120 с толщиной изоляции 120/240 мм и $\rho = 100 \text{ кг}/\text{м}^3$, является нерациональным по толщине применяемой изоляции. Модель переборки Н-0 с минеральной ватой с $\rho = 240 \text{ кг}/\text{м}^3$ и толщиной изоляции 40/105 мм показала возможность сокращения толщины изоляции на 16%. Модель переборки Н-120 с минеральной ватой с $\rho = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$ и толщиной изоляции 100/130 мм показала возможность сократить толщину применяемой изоляции на 13%. По результатам моделирования для переборок А-15, А-60, Н-0, Н-60, Н-120 и палубы Н-120, получены значения расчетных прогибов, которые не превышали предельные значения, что подтверждает возможность применения минераловатных плит с уменьшенными значениями толщины для судовых конструкций и морских платформ [19].

По результатам моделирования в результате решения обратной задачи теплопроводности получены значения эффективных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости минеральных ват производства Rockwool (1), Paroc (2), АО Тизол (3) (Таблица 1). Рассчитан коэффициент отношения пределов огнестойкости для перегородок по времени достижения критической температуры (140°C на необогреваемой поверхности) при S- к Н-режиму. Среднее значение коэффициента составило $K=1,43$.

Проведено моделирование в ПК Pyrosim (время моделирования составляло 7300 с, расчетная сетка разбивалась на ячейки $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м и захватывала фрагмент несущего каркаса судна размерами $3,0 \times 17,0 \times 13,0$ м) по распространению разлива СПГ из танкера. Выявлен медленный рост температуры в центре каркаса и рост до 1000°C сверху и с боков расчетной области, что возможно объяснить низкой концентрацией кислорода и большим количеством дыма (палуба вверху и внизу). Показана возможность использования палуб и переборок Н-60 и Н-15 в течение 40 минут развития пожара при заданных условиях [20] (рисунок 6).

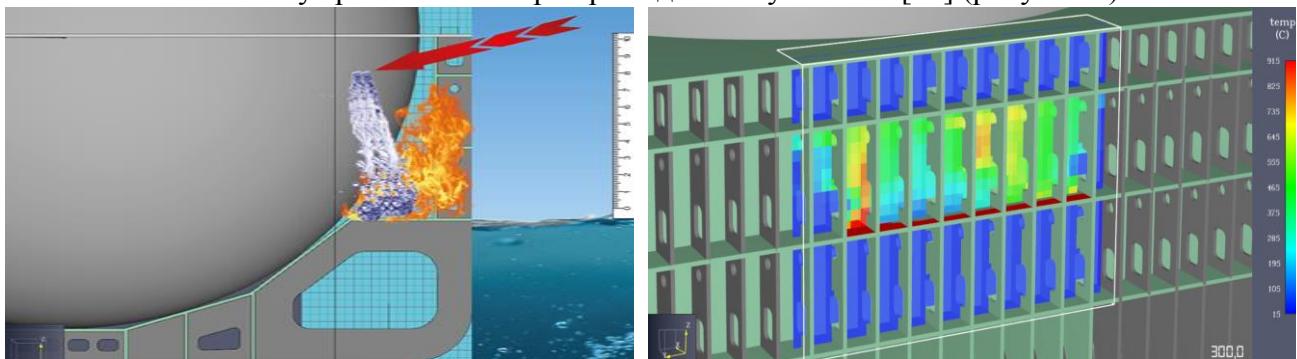


Рисунок 6 – Потенциальный сценарий пробоины и срез температуры в модели на 300 сек

Сделан вывод, что моделирование таких объектов представляет собой определенные сложности в связи разнофакторной физической моделью истекания СПГ из танкера с учетом того, что скорость выгорания СПГ на море увеличивается в два раза, и процессы тепломассопереноса при разливе СПГ экспериментально мало изучены.

Таблица 1 – Расчётные коэффициенты эффективной теплопроводности и теплоёмкости минеральной ваты в переборке класса А-60 в зависимости от температуры

Температура, Т, °С	20	100	300	500	800	900	1000	1200
Коэф. теплопроводности, λ (1), Вт/К·м	0,034	0,045	0,078	0,131	0,243	0,281	0,320	0,341
Коэф. теплопроводности, λ (2), Вт/К·м	0,037	0,047	0,095	0,197	0,383	0,445	0,509	0,520
Коэф. теплопроводности, λ (3), Вт/К·м	0,035	0,046	0,085	0,165	0,323	0,374	0,427	0,681
Коэф. теплоемкости, С, Дж/кг·К	840	860	900	929	971	988	1004	1020

В главе 4 рассмотрены эксперименты с использованием штукатурок и эпоксидных покрытий для стальных конструкций как средств огнезащиты с мокрым методом нанесения. Для конструкций со штукатурным покрытием Игнис Лайт (ООО Прозаск, Россия) испытывались образцы №1.1, №1.2, №3.0, №4.1, №4.2 по определению времени достижения критического состояния в условиях S-режима. Испытания образца с штукатурным составом №2.0 проводились при условии создания в огневой камере Н-режима. Для образцов №1.1, №1.2 и №2.0 предельным состоянием при испытании на огнестойкость являлась потеря несущей способности (R) вследствие возникновения предельных деформаций; испытания для образцов с покрытиями №3.0, №4.1 и №4.2 проводились до наступления $T_{kp} = 500$ °С. Опытные образцы с покрытиями № 1.1, № 1.2 и № 2.0 испытывались под воздействием постоянной статической нагрузки 195,22 кН при условии вертикального сжатия с шарнирным опиранием с одной стороны и жестким защемлением с другой стороны колонны. В Таблице 2 представлены характеристики образцов стальных профилей с огнезащитными штукатурными покрытиями.

Таблица 2 - Основные параметры образцов конструкций со штукатурными составами

№ образца	Профиль конструкции	Высота, мм	Приведенная толщина металла, t_{red} , мм	Толщина, мм	Режим пожара
№ 1.1. 1.2	I 40Ш1	2700	7,47	32	S
№ 2.0	I 40Ш1	2700	7,47	32	H
№ 3.0	I 20Б1	1700	3,40	23	S
№ 4.1. № 4.2	I 20Б1	1700	3,40	35	H

Моделирование конструкций с штукатурными составами проводилось в ПК ELCUT (граничные условия 1-рода). На рисунке 7 представлены временно-температурные зависимости для стальных колонн со штукатурным составом во время огневых испытаний при S- и H-режимах. По результатам экспериментального исследования образцов на графике в промежутке от 25 до 50 минут наблюдается ярко выраженная площадка выпаривания.

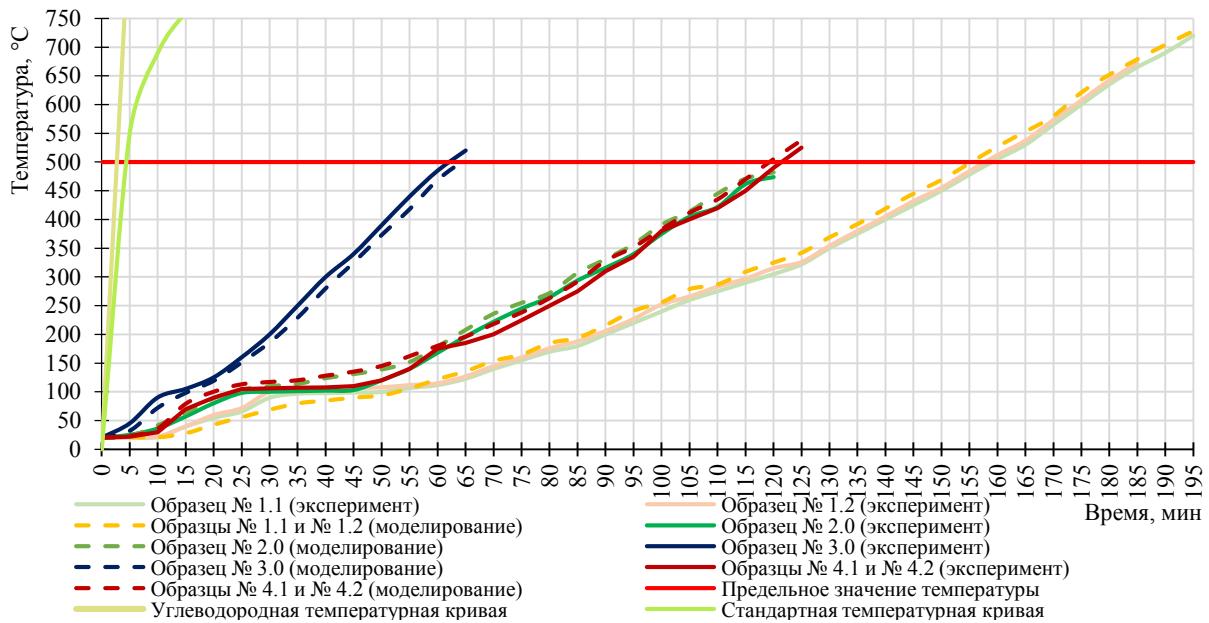


Рисунок 7 – Графики зависимости температура-время для образцов при S- и H-режимах

Рассчитаны деформации вертикальных стальных конструкций, определено время прогрева конструкций и средняя плотность штукатурных составов для обеспечения требуемого предела огнестойкости ($300 \text{ кг}/\text{м}^3$). Результатом моделирования, в том числе, стали полученные зависимости отношения времени достижения $T_{\text{кр}}$ при S- и H- режимах пожара для выявления коэффициента $K = H/S$. В Таблице 3 приводятся усредненные расчетные значения эффективных коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости для штукатурного состава с плотностью $300 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Таблица 3 – Расчётные коэффициенты эффективных теплофизических характеристик для штукатурного состава с плотностью $300 \text{ кг}/\text{м}^3$ в зависимости от температуры

Температура, T, °C	20	100	200	300	500	700	900	1000	1200
Коэф. теплопроводности, λ , $\text{Вт}/\text{К}\cdot\text{м}$	0,086	0,077	0,081	0,089	0,104	0,116	0,132	0,138	0,145
Коэф. теплоемкости, С, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$	420	900	1320	1750	2540	3330	4250	4800	5630

При рассмотрении динамики изменения эффективных коэффициентов теплопроводности выделены два классических этапа: от $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ имеется незначительное снижение, демонстрирующее испарение воды из штукатурного состава, свыше $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается плавный линейный рост. Построены nomogramмы для стальных образцов, покрытых штукатурным составом плотностью $300 \text{ кг}/\text{м}^3$, при $T_{\text{кр}} 400^{\circ}\text{C}, 500 \text{ }^{\circ}\text{C}, 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при S- и H-режимах, позволяющие определять требуемую приведенную толщину металла конструкции.

В разделе 4.6 исследуются эпоксидные огнезащитные покрытия, распространенные на объектах НГК в связи с отличной производительностью работ и высокими значениями пределов огнестойкости конструкций (90-120 мин). При огневом воздействии такие покрытия образуют плотный пенококс. В Таблице 4 представлены основные параметры и результаты испытаний образцов. Образцы №2.1, №2.2 представляли собой идентичные конструкции с разной толщиной нанесенного эпоксидного покрытия, испытанные при воздействии H- режима пожара без армирующей сетки. Для образцов №3.1 и №3.2 применялась сетка размерами $20 \times 20 \text{ мм}$. Для образца №3.3 применялась сетка размерами $50 \times 50 \text{ мм}$. Испытания опытных образцов №2.3 – №2.8 проведены с целью определения разницы в огнезащитной эффективности (ОЭ) между S- и H-воздействием на стальные конструкции. Испытания образцов №1.0, №5.0, №6.0

проводились при воздействии Н-режима после 10-минутного криогенного воздействия (Кр) путем погружения образца в жидкий азот при температуре -196 °С. За предельное состояние принималось достижение металлом опытного образца температуры, равной -60°С. После завершения криогенного воздействия образцы №1.0, №5.0 и №6.0 извлекались из сосуда с жидким азотом и подвергались огневому воздействию Н-режима.

Таблица 4 – Основные параметры и результаты испытаний образцов

№ образца	Профиль	H, мм	t _{red} , мм	Средняя толщина, мм	Режим испытания	ОЭ, мин
1.0	□100x8	2700	7,46	11,50	Кр + Н	120
2.1	I 50Б2	1700	5,81	9,20	Н	120
2.2	I 50Б2	1700	5,81	8,40	Н	90
2.3	I 14Б1	1700	5,81	10,30	Н	60
2.4	I 14Б1	1700	5,81	14,44	Н	120
2.5	I 14Б1	1700	5,81	6,30	S	90
2.6	I 14Б1	1700	5,81	8,75	S	120
2.7	I 50Б2	1700	5,81	4,13	Н	90
2.8	I 50Б2	1700	5,81	4,00	Н	90
3.1	I 50Б2	1700	5,81	11,20	Н	90
3.2	I 50Б2	1700	5,81	11,20	Н	90
3.3	I 50Б2	1700	5,81	11,20	Н	60
4.0	I 30К1	2700	6,29	13,70	Н	120
5.0	I 30К1	2700	6,29	10,60	Кр + Н	90
6.0	Ø100x8	2700	7,35	20,00	Кр + Н	90

Для рецептур интумесцентных покрытий, содержащих классическую триаду: полифосфат аммония (ПФА), меламин (МЕ), пентаэритрит (ПЕ) установлено, что размеры пор в пенококсе должны распределяться следующим образом: доля пор с Ø0,5–1 мм не должна превышать 30 %, с Ø более 2 мм – 3 % от общего количества равномерно распределенных пор. Пенококс получали в муфельной печи при 500°C, так как именно при этой температуре его высота максимальна и поры хорошо различаются. Фотография пенококса в разрезе и гистограмма распределения пор в пенококсе, полученная в ПК ВидеоТест, приведены на рисунке 8.

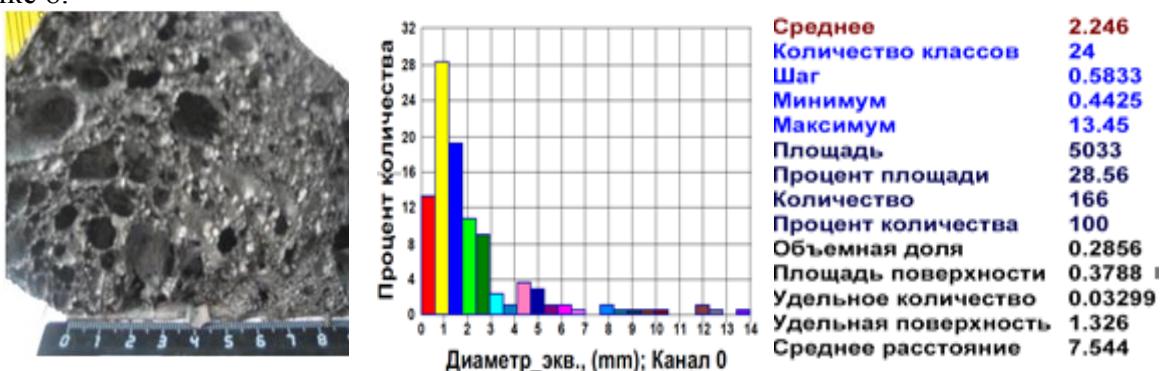


Рисунок 8 – Фото пенококса с составом ПФА:МЕ:ПА = 20:10:10

Выявлено, что значение коэффициента вспучивания K_{вс} покрытия должно располагаться в интервале 40–65, поскольку при более высоких значениях K_{вс}, образовавшийся на испытуемом образце (стальной колонне) пенококс, либо сползает, либо растрескивается. Установлено, что потеря массы огнезащитного покрытия в навеске при термогравиметрическом

анализе не должна превышать 45% от первоначальной при увеличении температуры в испытательной камере дериватографа до 500°C. На рисунке 9 показана диаграмма взаимосвязи между параметрами потери массы при термогравиметрическом анализе (Δm), коэффициентом вспучивания $K_{\text{вс}}$ и диаметром пор пенококса.

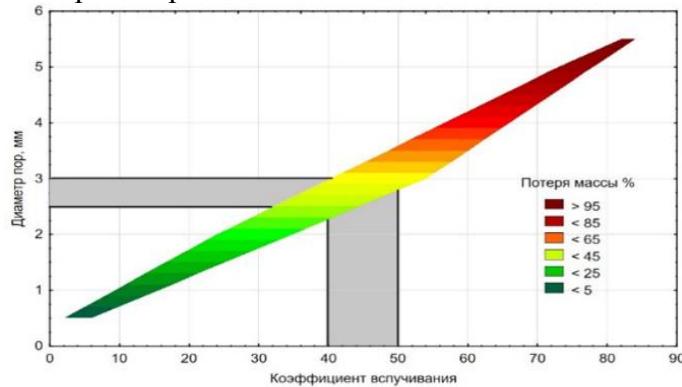


Рисунок 9 - Взаимосвязь между параметрами Δm , $K_{\text{вс}}$ и диаметром пор пенококса

Моделирование прогрева конструкции в ПК ELCUT с интумесцентной огнезащитой осуществлялось в два этапа: 1) после начала огневого воздействия в среднем до 100°C покрытие принимается в виде слоя толщиной покрытия согласно Таблице 3; 2) полагали, что в течение последних минут огневого воздействия вокруг образцов сформирован защитный слой пенококса толщиной 40 мм (среднее значение 40 мм по высоте и распределению ячеек).

По результатам решения обратной задачи теплопроводности определены теплофизические свойства образовавшегося пенококса для всех образцов. В Таблице 4 приведен пример для образца №1.0. Построены графики зависимости температуры огневого воздействия от времени достижения предельных состояний для покрытий образцов по экспериментальным и расчетным значениям, полученным в конечно-элементных моделях (рисунок 11). Проведено сравнение образцов №1.0, №2.2, №3.1, имеющих примерно одинаковые толщины покрытия (11,5/8,4/11,2 мм) и приведенные толщины металлов (7,46/5,81/5,81 мм). Согласно результатам экспериментов, для образцов №2.3, №2.4 и №2.7, образование пенококса завершилось в интервале 6–10 минут. Для образца №2.5 время образования пенококса находится в интервале 36–42 минут, для образца №2.6 – в интервале 55–60 минут, для образца №2.8 – в интервале 37–45 минут.

Как видно из рисунка 10 и таблицы 4, среднее значение толщины для эпоксидных покрытий для обеспечения огнезащитной эффективности 120 мин составляет примерно 12 мм. Разброс сходимости полученных результатов не превышает 10%, что, по-видимому, объясняется достаточно близким сходством рецептур огнезащитных красок и подтверждается данными термического анализа. Различие состоит в качестве сеток, технологии производства и условий проведения огневого эксперимента: при предварительном криогенном воздействии характеристики покрытий более низкие, чем в его отсутствия и непосредственного воздействия Н-режима.

Получены усредненные значения эффективных теплофизических характеристик пенококса эпоксидных покрытий при 120 мин, когда его стабилизация завершена. Принятые допущения обозования пенококса после выхода и стабилизации его в виде ячеистой структуры хорошо коррелируют с экспериментальными данными, которые возможно усреднить для инженерных расчетов по огнезащите конструкций. Получены зависимости температуры от времени в точках расположения термопар на поверхности опытных образцов при Н-режиме и определены теплофизические свойства пенококса, образованного из эпоксидного покрытия для образца №1 (Таблица 5).

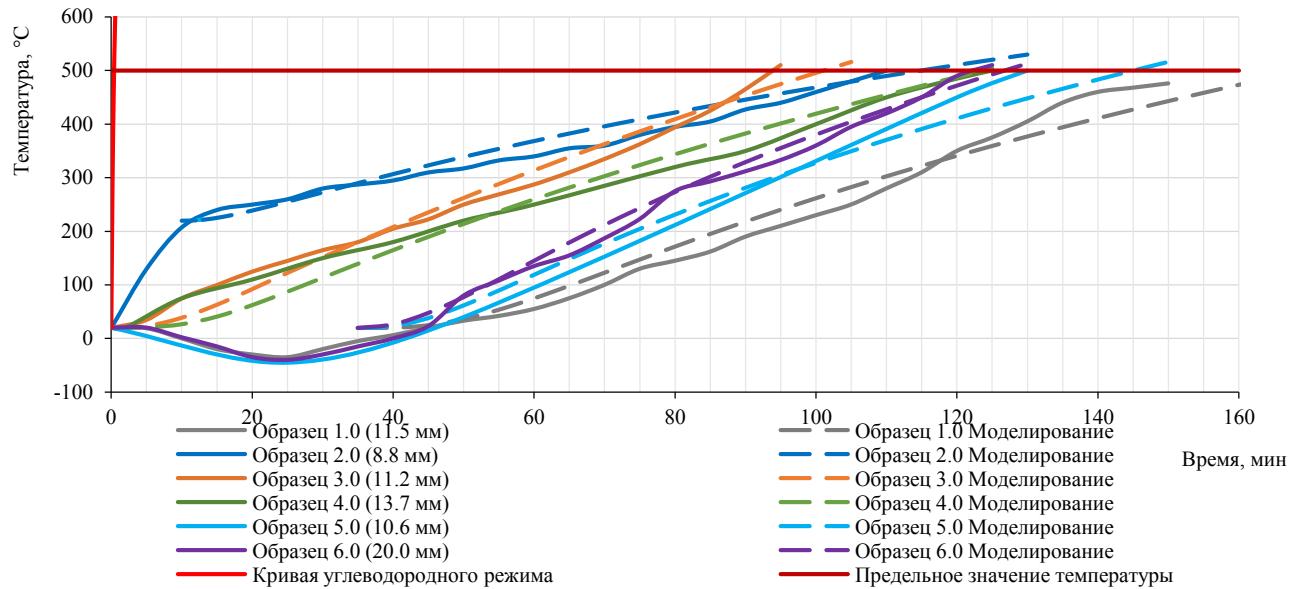


Рисунок 10 - Экспериментальные и расчетные температурные кривые образцов Н-режиме

Как видно из рисунка 11, график для образца № 2.0 с толщиной покрытия 8,8 мм и плотностью 220 кг/м³, растет с большей скоростью до достижения температуры 220 °C в течение первых 10 минут эксперимента, характеризующейся окончанием образования слоя пенококса, далее нагрев характеризуется равномерным ростом до $T_{kp} = 500$ °C. В сравнении с графиками для образцов № 1.0 и № 3.0, имеющими сопоставимую толщину покрытия (11,5 мм и 11,2 мм соответственно), но имеющие более высокие показатели плотности (300 кг/м³, 310 кг/м³) и коэффициенты теплопроводности пенококса, график для образца № 2.2 растет с меньшей скоростью. График для образца № 1.0 показывает более плавное изменение температуры по времени по результатам криогенного и огневого воздействий вплоть до окончания испытаний на 150-й минуте. В результате расчетов установлено, что для обеспечения огнезащитной эффективности не менее 120 минут при S-режиме, оптимальная толщина эпоксидного покрытия составляет 8–9 мм, в то время как при воздействии Н- режима пожара толщина составляет 14–15 мм.

Таблица 5 – Эффективные теплофизические показатели пенококса для образца №1.0

Температура, °C	20	100	200	300	500	700	800	1000	1200
Коэф. теплопроводности, λ , Вт/К·м	0,080	0,070	0,071	0,072	0,074	0,091	0,101	0,131	0,171
Коэф. теплоемкости, С, Дж/кг·м	1300	800	825	850	900	955	980	1000	1050

Методом аппроксимации для образцов №2.3 – №2.8 получены nomограммы зависимости времени достижения критической температуры стальных образцов от приведенной толщины металла t_{red} конструкции при различных толщинах сухого слоя покрытия (рисунок 11).

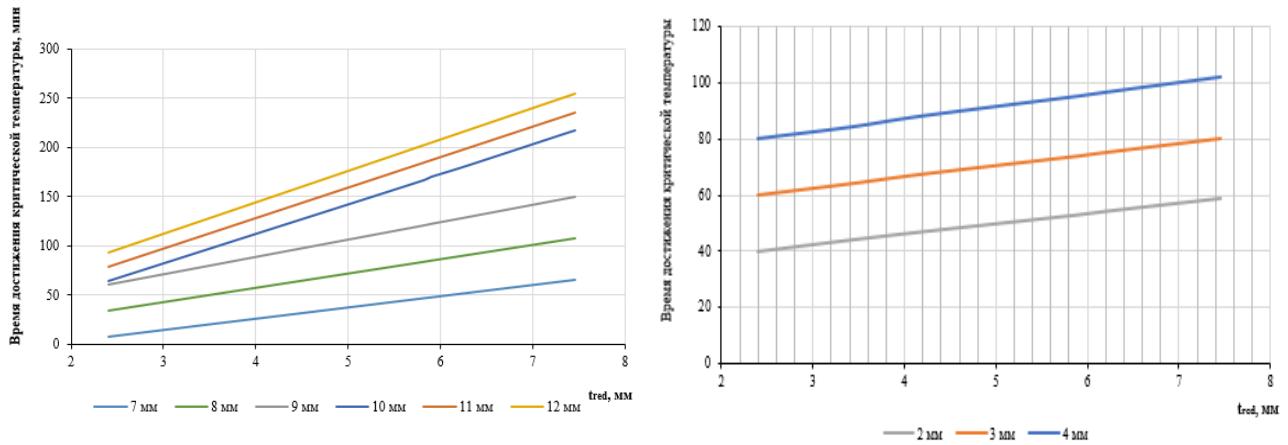


Рисунок 11 – Зависимость времени достижения $T_{\text{кр}}$ от приведенной толщины металла при Н-режиме (слева) при S-режиме (справа) для эпоксидного покрытия

Как показали исследования, необходимо иметь данные об огнезащитной эффективности покрытий как при криогенном воздействии, так и без него, поскольку при криогенном воздействии показатели огнезащитной эффективности более низкие. Номограммы для огнезащитных покрытий (графики зависимости температура-время для каждой приведенной толщины конструкции) также следует представлять, как с учетом криогенного розлива и Н-режима пожара, так и с учетом отсутствия криогенного розлива и только огневым воздействием.

В режиме Jet-Fire проведены испытания для штукатурных и эпоксидных композиций. На рисунке 12 приведены графики зависимости толщины покрытия и огнезащитной эффективности от времени достижения $T_{\text{кр}}$ данного штукатурного состава с вермикулитом (№2), а также эпоксидных композиций (образцы №№1,2,3) и песчаная штукатурка (образцы №№1).

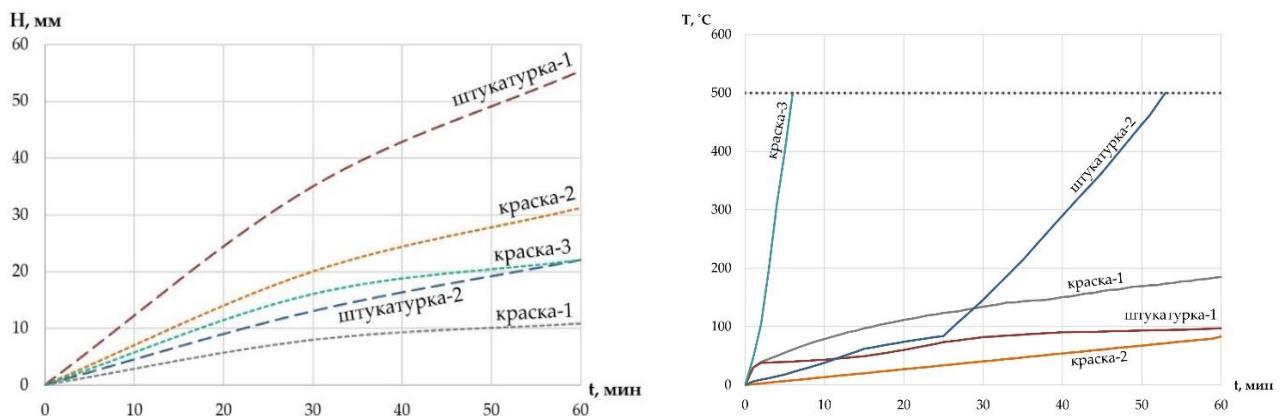


Рисунок 12 – Зависимости значений толщины материала, при которой $T_{\text{кр}}$ достигается в течение 60 минут (слева) и время достижения $T_{\text{кр}}$ (справа) от времени для штукатурных и эпоксидных покрытий

Образец краски №3 не содержал углеродную сетку и подвергся эффекту огневой эрозии, образцы эпоксидных красок №1 и №2 обладали достаточно хорошей огнезащитной эффективностью при толщинах 10 и 30 мм соответственно.

В главе 5 рассматривается огнестойкость стальных конструкций с использованием конструктивной огнезащиты с сухим методом нанесения, а именно: цементсодержащие плиты, кожухи на основе супертонкого базальтового волокна, огнестойкие потолки и изгибающаяся интумесцентная огнезащита в виде сетки с ячейками, заполненным интумесцентным составом.

На рисунке 13 и в Таблице 6 представлены результаты испытаний плит Aestuver Pyro-Safe (производитель Fermacell, Германия, поставщик ООО Прозаск, Россия) при S- и Н- режиме.

В ПК ELCUT проведено моделирование прогрева конструкций с граничными условиями I рода, эффективные теплофизические характеристики получены за счет решения обратной задачи теплопроводности.

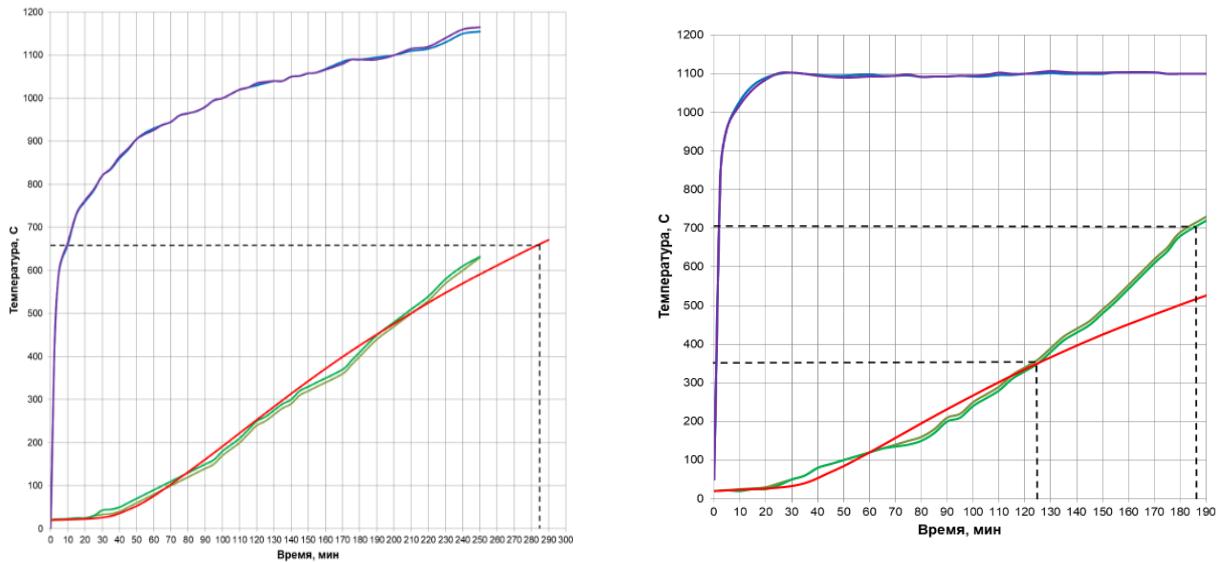


Рисунок 13 – Зависимости температура-время при S- и H режимах для плит (красная линия – моделирование, зеленая – эксперимент).

При Н-режиме расчетные значения температур, полученные до 125 мин, не отличаются от экспериментальных более чем на 20%. Однако после 125 мин происходит резкое изменение, поскольку при проведении эксперимента на 125 мин начала происходить постепенная деформация огнезащитных плит и раскрытие вертикальных швов облицовки. Расчет в модели показал, что данная конструкция при нагрузке 30 тс может достигнуть предела огнестойкости на 290 мин огневого воздействия, но на практике для этого необходимо дорабатывать соединения огнезащитных плит, чтобы раскрытие вертикальных швов облицовки не происходило.

Таблица 6 – Сравнение результатов экспериментального исследования и моделирования стальной колонны с плитами Aestuver Pyro-Safe

Режим пожара	Критическая температура, °C	Время достижения предела огнестойкости, мин		Температура на образцах, °C		Предел огнестойкости конструкции	
		Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
S	665	247 (245)*	285	630 (632)*	661	R240	R240
H	713	184 (188)*	290	720 (715)*	710	R180	R290

Примечание. Испытывалось два образца согласно требованиям к эксперименту*

Результатом моделирования, в том числе, стали полученные зависимости коэффициента отношения T_{kp} при S-режимах и H-режимах в одинаковые моменты времени при изменении толщины огнезащиты (рисунок 14), начальной теплопроводности, скорости изменения теплопроводности, начальной теплоемкости, скорости изменения теплоемкости и плотности. В результате расчетов, по всем перечисленным параметрам отношение $K = S/H$ практически всегда составляет 1,5 – 2 раза.

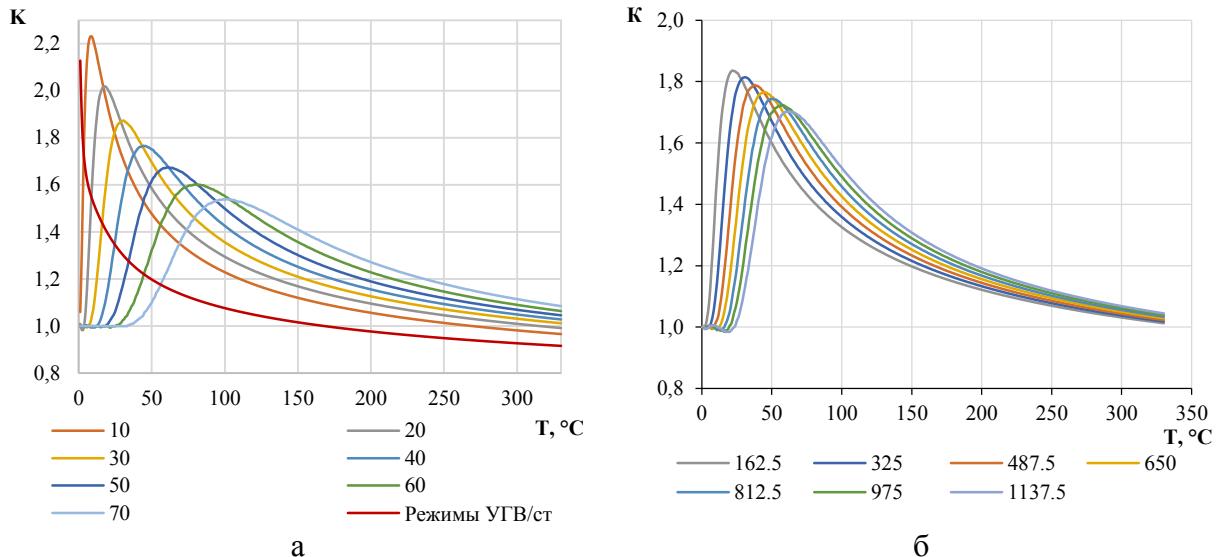


Рисунок 14 – Номограммы изменения отношения прогрева стальной колонны при Н-режиме к значениям температур прогрева при S-режиме: а) при различных значениях толщины огнезащиты s , мм и (б) - при различных значениях плотности ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$

В разделе 5.2 Для защиты стальных конструкций от Н-режима ($T_{\max} = 1200^\circ\text{C}$) и близкого к нему по параметру температуры в печи ($T_{\max} = 1300^\circ\text{C}$) тоннельного режима пожара [21], в диссертационном исследовании разработана конструктивная огнезащита ПРОМИЗОЛ-Микс-Проплейт в виде кожухов, содержащие базальтовое и керамическое волокно с ремнями на стальных застежках (рисунок 15). Данный вид огнезащиты сложен в изготовлении, однако обладает высокой огнезащитной эффективностью – 180, 240 минут (таблица 7). Получен патент на изобретение RU 2725720 С1.

В результате испытаний установлено, что оболочка (кожух) толщиной в 50 мм позволяет достигнуть значение огнезащитной эффективности (ОЭ) более 180 мин и 243 мин по потере огнестойкости при критическом прогибе для образца №5. Испытания образца №1 прекращены в связи с достижением металла колонны $T_{kp} = 500^\circ\text{C}$ на 130 мин при S-режиме, образца №2 и на 93 мин при Н-режиме. Испытание образца №3 по согласованию с заказчиком прекращены на 243 мин огневого воздействия. Средняя температура по термопарам, установленным на металле образца №3, составила $749,5^\circ\text{C}$. Критическая температура $T_{kp} 500^\circ\text{C}$ достигнута на 180 минуте.

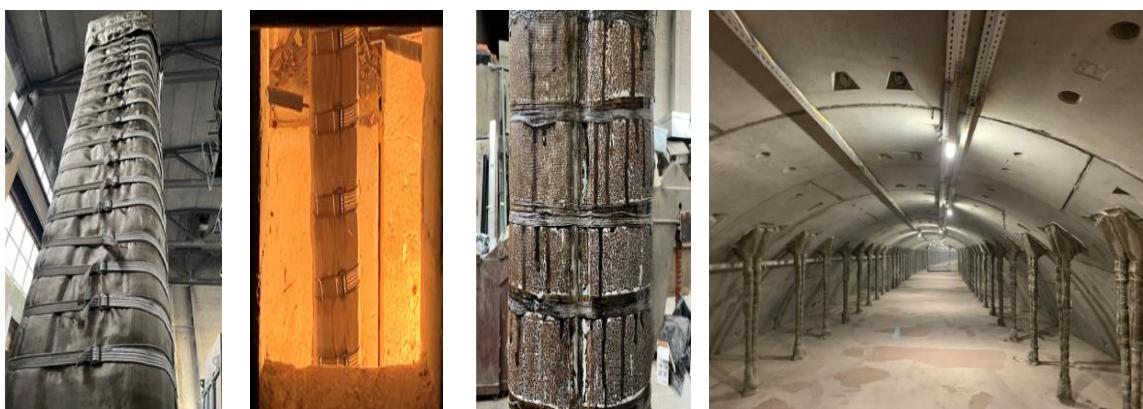


Рисунок 15 – Огнезащита ПРОМИЗОЛ-Микс-Проплейт на всех стадиях эксперимента и фото талрепов с кожухами на станции метрополитена Некрасовка, г. Москва

Таблица 7 – Данные экспериментов для огнезащиты ПРОМИЗОЛ-Микс-Проплейт

№ образца	Профиль/ нагрузка	Высота, H, мм	t_{red} , мм	Толщина покрытия, мм	Режим испытания	ОЭ*, мин
1	I 20Б1	1700	7,46	50	S	130
2	I 20Б1	1700	5,81	15	H	30
3	I 20 Б1	1700	5,81	15	S	60
4	I 20Б1	1700	5,81	50	H	93
5	I40Ш1/ 19,9 тс	2700	5,81	50	S	243/180

В ПК ELCUT проведено моделирование прогрева конструкций, граничные условия I рода, эффективные теплофизические характеристики получены за счет решения обратной задачи теплопроводности (Таблица 8). Графики зависимости температура-время в контролируемых точках на поверхности образцов под огнезащитой при эксперименте и моделировании представлены на рисунке 16.

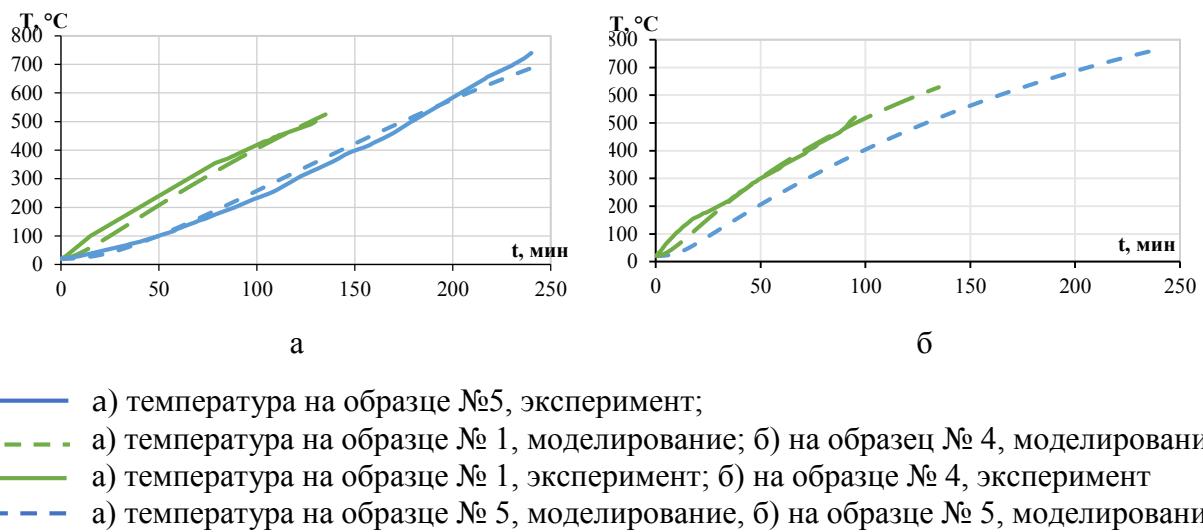


Рисунок 16 – Графики зависимости температура-время при S- (а) и H-режимах (б) для образцов №№1,2,3

Таблица 8 – Расчетные эффективные коэффициенты λ и С для кожуха в зависимости от температуры толщиной 50 мм (образец № 3)

Температура, T, °C	20	100	300	500	600	700	900	1000	1200
Коэф. теплопроводности, λ , Вт/К·м									
Коэф. теплопроводности, С, Дж/кг·К									

Расчетное время достижения $T_{kp} = 500^\circ\text{C}$ для конструкции с огнезащитой составило 130 мин (S-режим) и 90 мин (H-режим). На рисунке 18 показано отношение температур прогрева между H-режимом (рисунок 17,а) и S-режимом (рисунок 17,б) при равных промежутках времени. Для рационализации использования огнезащиты разработаны модели конструкции колонны образцов №№1,2 с различными толщинами огнезащитного покрытия и получен график зависимости времени достижения T_{kp} от толщины защитного покрытия при S- и H-режимах. Как видно из рисунка 17(в), для получения предела огнестойкости R120 при S-режиме

для образцов №№1,2 (Таблица 7) достаточно применять огнезащиту с толщиной 45 мм, при Н-режиме при толщине огнезащиты 45 мм достигается предел огнестойкости R90. Для получения предела огнестойкости R120 при S-режиме пожара для образца № 3 достаточно применять огнезащиту с толщиной 25 мм, при Н-режиме толщина покрытия должна составлять 45 мм.

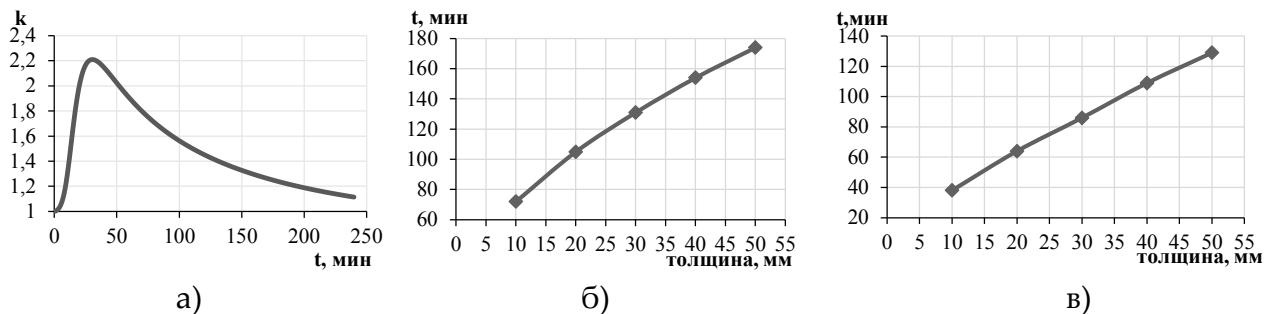


Рисунок 17 – Графики отношения времени прогрева металла колонн образца для образца №1 и №2 между Н- и S-режимами на равных промежутках времени (а); график зависимости времени достижения $T_{\text{кр}}$ для образцов №1, №3 от толщины покрытия при S- (б) и Н- (в) режимах

Разработана конструктивная огнезащита в виде гибкой сетки, с нанесенной в объеме полимерной интумесцентной композицией с различными антипиренами (рисунок 18). Средство огнезащиты представляет собой комбинацию интумесцентного покрытия и конструктивную огнезащиту (сухой монтаж) с возможностью эксплуатации в различных климатических условиях, в том числе Арктическом климате. Получен патент на изобретение RU 2711076 С1.

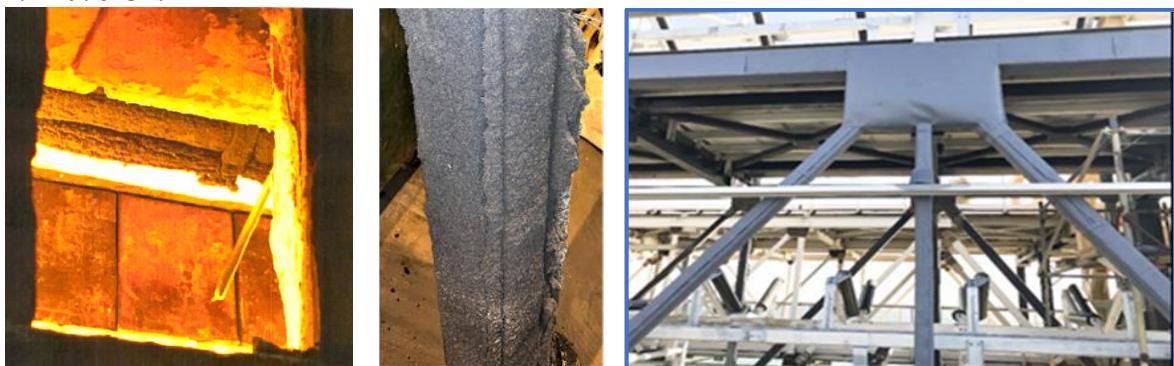


Рисунок 18 – Интумесцентная рулонная огнезащита при испытании, после испытания и при эксплуатации снаружи объекта защиты

Для получения интумесцентной сетки разработан ряд рецептур с различным содержанием акриловых и силиконовых полимеров, интеркалированного графита (ИГ) и антипиренов. Среди 8 рецептур с вариативностью по содержанию ИГ, пленкообразователя и др. ингредиентов, выбиралась рецептура, обеспечивающая максимальный показатель коэффициента вслучивания $K_{\text{вс}}$, максимальное время достижения 500°C на образце стальной конструкции при огневом испытании, а также образцы с наиболее упорядоченной структурой пенококса согласно фотографиям СЭМ, минимальной потерей массы при термическом анализе и минимальной полноте заполняемости ячеек полимерной матрицы в сетке (рисунок 19, Таблица 9).

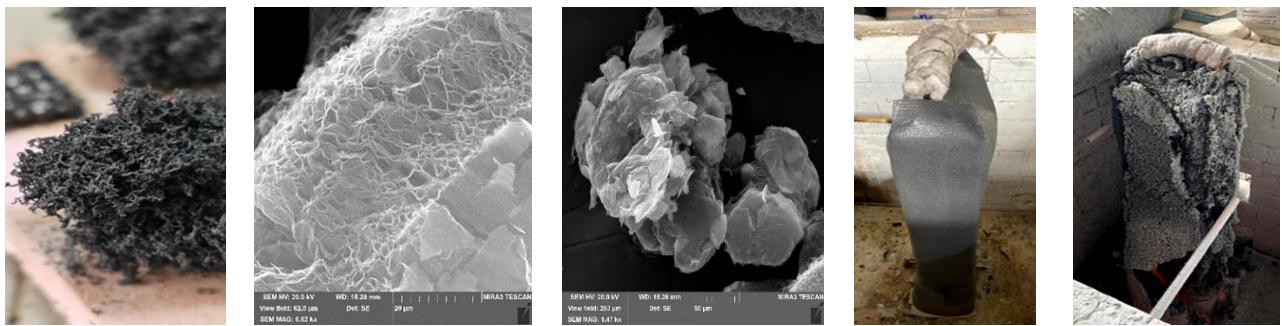


Рисунок 19 – Фотографии исследований образцов сетки для рецептуры № 5

Установлено, что термодеструкция исследуемых материалов на силиконовом связующем наступает при 234-334°C, максимальная скорость деструкции у всех образцов наблюдалась при 353°C.

Таблица 9 – Свойства образцов интумесцентного рулонного покрытия

№ рецептуры, вид связующего, содержание ИГ, %	K _{bc} , мм	Время достижения 500°C, мин	% ячеек	TG, Δ m, %	T°C, Δ m	Модуль упругости, Н/мм ²	Удл. при разрыве, %*
№1, акрил, 5%	20	20,0	100	50	474,9	-	-
№6, акрил, 25%	30	36,4	80-90	50	381,5	-	-
№5, акрил, 40%	50	44,2	80-90	60,7	600	10,83/5,86	-
№5.1, акрил, 50%	70	-	100	-		158,6/228,9	-
№4, силикон, 0%	20	16,3	100	50	509,6	-	-
№2 силикон, 25%	30	40,0	100	29,1	500,2	85,1/48,7	5,21/4,18
№3 силикон, 50%	50	43,3	100	26,2	600,1	260,2/470,2	
№3.1 силикон, 60%	37	-	100	-		-	-

Примечание* - направления ткани в образце по направлениям по основе/по утку

Для образцов на акриловом связующем время термодеструкции наступило при температурах 220°C-290°C, максимальная скорость деструкции наблюдалась при 400°C, а максимальный коксовый остаток составлял 25 %. Время полного разрушения исследуемых материалов при максимальной скорости убыли массы составило 6 - 10 мин в зависимости от вида образца.

Как видно из таблицы 9, модуль упругости интумесцентной сетки, удлинение при разрыве и максимальное напряжение незначительно различаются по утку и основе, полимерная композиция главным образом влияет на механические свойства, и лучшими из образцов являются образцы № 3 на силиконовом связующем, и № 5 на акриловом, содержащие 40–50% ИГ. Данная концентрация ИГ является критической, так как большее содержание ИГ приводит к хрупкости, ломкости и растрескиванию сетки, а также расpusканию графита при измерении K_{bc}.

Проведены испытания на огнестойкость балок с огнезащитной сеткой и приведенной толщиной 3,4 и 4,3 мм, с нагружением балок соответственно 68,67 кН и 81,63 кН. У данных образцов сетки поверхностная плотность составляет 200 ± 15 , г/м², количество заполненных ячеек увеличено до 100%, толщина слоя композиции 2,0–2,5 мм. Получены результаты R60 на огнестойкость и на огнезащитную эффективность 45 мин, в том числе и для конструкций типа ЛСТК (лёгкие стальные тонкостенные конструкции). Продукция серийно выпускается ООО «НПК ПРОМИЗОЛ» (г. Москва, Россия).

В главе 6 представлена концепция, содержание и основные положения разработанной соискателем «Методики расчета огнестойкости конструкций наружных установок, этажерок и эстакад объектов нефтегазового комплекса» (далее – Методика). Методика базируется на

принципах, представленных в методологии расчета пожарного риска на производственных предприятиях, и на методиках оценки степени риска для магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Рассматриваются все сценарии, где возможен пожар-взрыв, а не только те сценарии, в которых может допускаться угроза жизни и здоровью людей. Методика в виде блок-схемы представлена на рисунке 19. Пунктирной линией обозначена часть блок-схемы из ГОСТ Р ИСО 16732-1-2024 «Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии». Количественная оценка пожарного риска начинается с определения характеристики объекта защиты. Следующим этапом является идентификация опасностей, данные о которых используются для определения и выбора групп сценариев пожара. При определении сценариев устанавливаются виды сооружений и конструкций, находящихся в пожароопасной зоне согласно генеральному плану объекта защиты.

Методика апробирована на примере оценки пределов огнестойкости стальных конструкций трех эстакад нефтегазоносных сетей месторождений при кустовом расположении скважин (нефть как горючая нагрузка) и двух этажерок нефтегазовых сооружений (метanol как горючая нагрузка). В полевой модели в ПК Pyrosim получили зоны воздействия пожаров и параметры температуры и теплового потока, действующие на конструкции. Проектную мощность пожаров, расчетные сценарии, горючую нагрузку принимали в соответствии с проектной документацией на объекты защиты. Определили воздействия температуры и теплового потока на конструкции. Расчетным методом, согласно данным проектной документации (разделы КР, КМ на проектирование объектов защиты), определили критическую температуру стальных конструкций, в ПК ELCUT выполнили моделирование прогрева стальных конструкций, определили их фактическую огнестойкость и необходимость применения огнезащиты.

Полный алгоритм расчета огнезащиты приведен на рисунке 20. В результате анализа проектной документации выбирался наиболее опасный сценарий и один из вероятных с развитием пожара факела и пролива. Для эстакад наиболее опасными сценариями являлись разгерметизация участков трубопровода с образованием дефектного отверстия характерного размера. Частота разгерметизации участков проектируемого трубопровода определена с учетом образования различных видов разгерметизации и внутреннего диаметра трубопровода. Зоны действия теплового потока приведены в проектной документации на объекты защиты и получены в ПК TOXI+Risk 5 (ЗАО Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, г. Москва, Россия).

Геометрия сооружений (конструкции – колонны, балки, перекрытия и т.д.) импортирована из Revit (производство Autodesk Inc., США) с применением формата IFC (рисунок 22). Датчики, фиксирующие температуру окружающей среды, установлены в горизонтальной и вертикальной плоскости на расстоянии от 0 до 15 м от очага пожара с шагом 3 м.

Продолжительность расчета составила 300 с. Данное значение принято как расчетное время отключения технологических трубопроводов при ручном управлении. Для рассматриваемых сценариев смоделированы восемь дополнительных ситуаций, каждая из которых учитывает различное направление ветровой нагрузки.

Моделирование прогрева конструкции при S- и H-режиме осуществлялись согласно уравнениям режимов пожара и задавались как граничные условия 1-го рода в ПК ELCUT. Моделирование прогрева конструкции при реальном пожаре задавалось температурами, полученными из температурного поля на границе воздушной среды согласно расчетам в ПК Pyrosim. При подготовке модели в ПК Pyrosim задавали непроницаемую холодную поверхность земли, поверхность горелки с расходом горючего, соответствующего заданной удельной мощностью тепловыделения, открытые границы расчетной области, точки мониторинга лучистого теплового потока, точки мониторинга температуры и вертикальной скорости. Недостающие параметры задавались, исходя из базы данных программы для типовой горючей нагрузки.

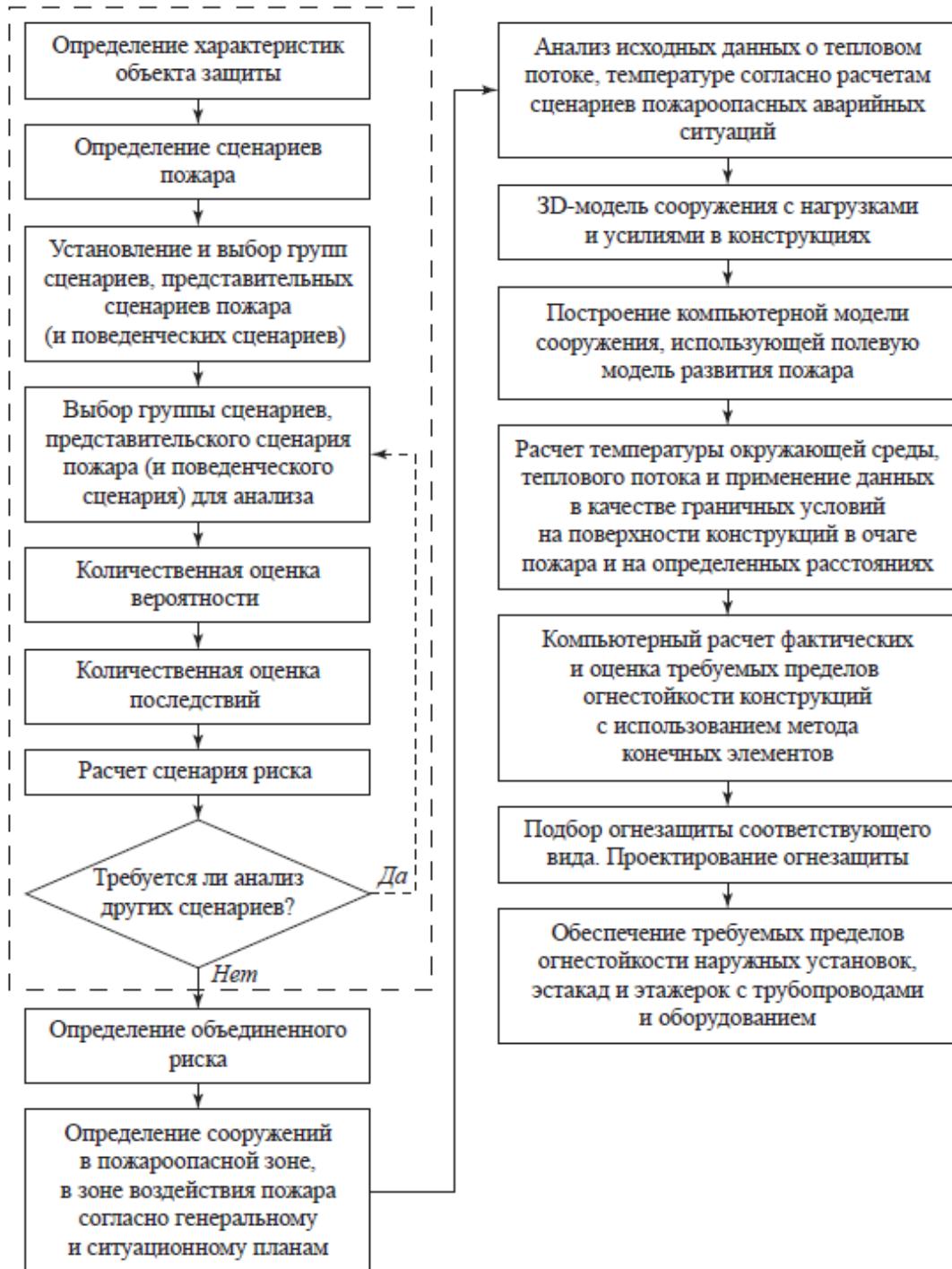


Рисунок 20 - Алгоритм оценки фактических пределов огнестойкости конструкций для принятия проектных решений проектными организациями.

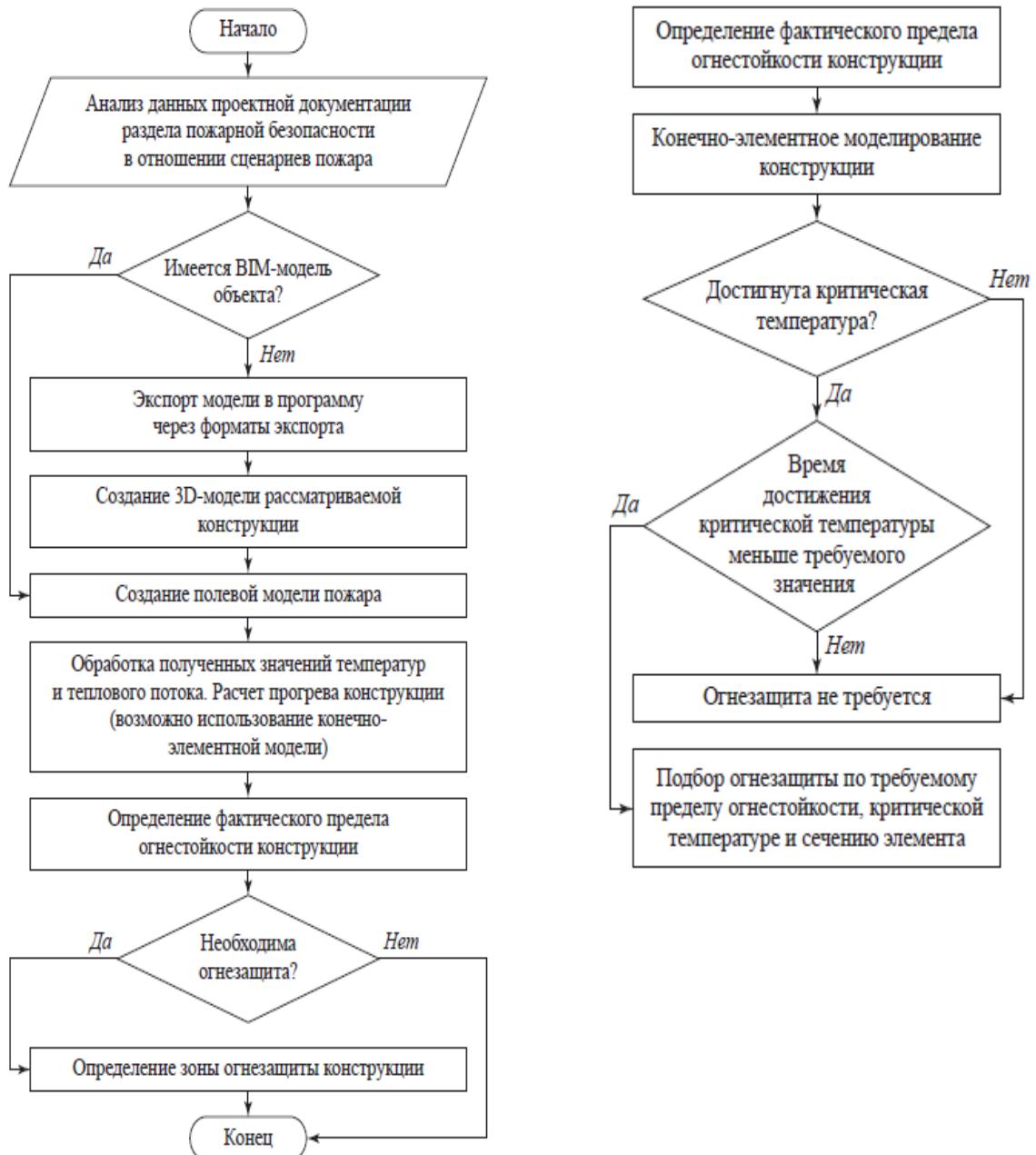


Рисунок 21 - Алгоритм расчета огнестойкости конструкций

Например, для месторождения № 1 рассмотрены 54 сценария, наиболее опасным принят сценарий с разрушением газопровода Ø530 мм с возникновением струйного горения. Количество опасных веществ определялось с учетом нормативного времени срабатывания запорных устройств, установленных на границах технологических блоков. Длительность моделирования в ПО PyroSim составляла от 300 с (с учетом максимального времени срабатывания запорной арматуры) до 7300 с, размеры сетки выбраны $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м.

Для фиксации изменения показателей температуры и величины теплового потока на расстояниях 0, 3, 6 и 12 метров от очага пожара в модели устанавливали датчики.

Сценарий пожара пролива №1.1 характеризуется максимальной зоной распространения поражающих факторов с площадью пролива $376,1 \text{ м}^2$. Сценарием с наиболее вероятной аварийной ситуацией, согласно проектной документации, является сценарий 1.2 с площадью пролива $46,9 \text{ м}^2$. Характеристики сценария 1.1 приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Сценарии для месторождения № 1

№ сценария	Последствия	Основной поражающий фактор	Кол-во опасного вещества, участвующего в аварии, т	Кол-во опасного вещества, участвующего в создании ОФП, т	Зоны действия теплового потока
1.1	Пожар пролива	Тепловое излучение	15,213	15,213	10,5 кВт/ м ² –30,9 м, 1,4 кВт/м ² – 55,8 м

На рисунке 22 представлена схема эстакады с расположением трубопровода, ее модель в Revit и распространение температуры на 300 с пожара.

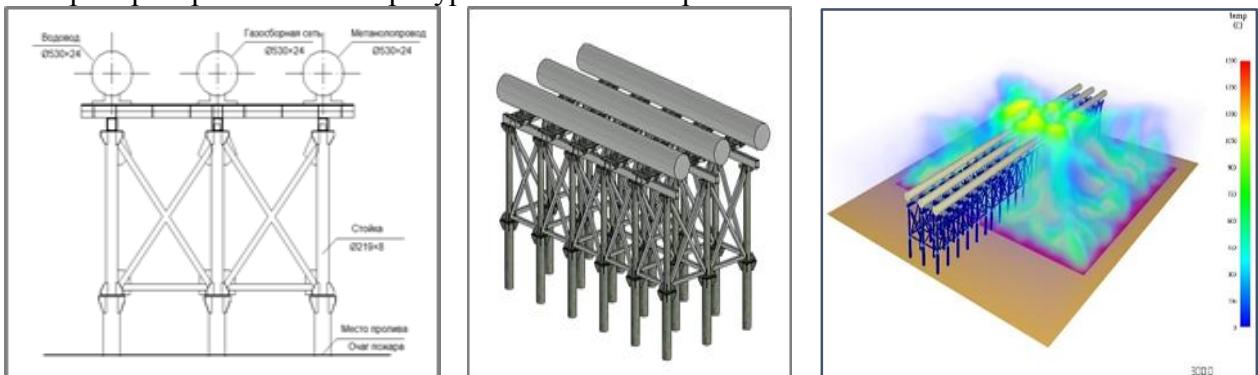


Рисунок 22 – Зоны действия теплового потока для сценария 1.1, модель эстакады и распространение температуры в модели в ПК Pyrosim

На рисунке 23 приведены графики зависимости плотности теплового потока и температуры от времени на уровне нижней балки. Наиболее подвержены тепловому потоку продольные балки и сам трубопровод, на поверхности которых плотность теплового потока может достигать 180 кВт/м.

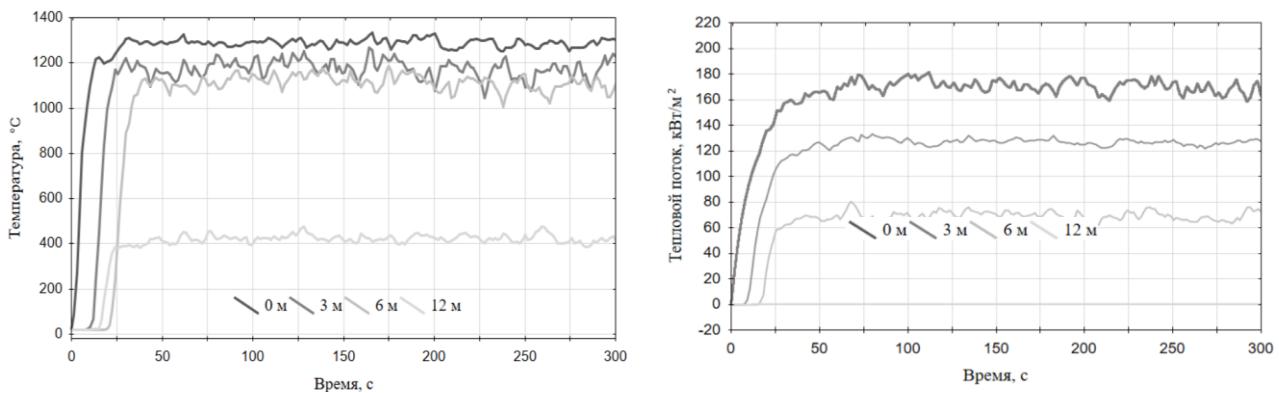


Рисунок 23 – Графики зависимости температуры и теплового потока от времени

На рисунке 24 показаны области распределения температуры в зависимости от времени и расстояния от очага пожара для самого вероятного сценария и для самого опасного сценария. Серая плоскость показывает критическую температуру стальной конструкции и ее достижение в зависимости от расстояния от очага пожара.

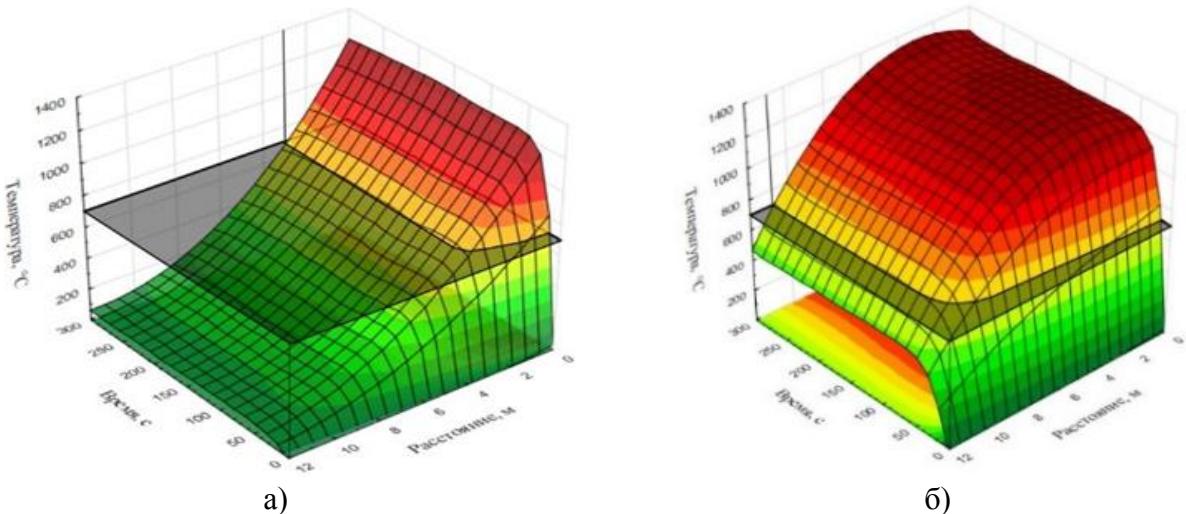


Рисунок 24 – Графики зависимости температуры от времени и расстояния от очага пожара
для а) самого вероятного сценария 43,18 МВт, б) самого опасного сценария 305,24 МВт

Значения пределов огнестойкости для опорной колонны (рисунок 23) сведены в Таблицу 11, где используются обозначения: R_{tp} - требуемый предел огнестойкости; R_s - предел огнестойкости при S-режиме пожара; R_h - предел огнестойкости при H-режиме и R_ϕ - фактический предел огнестойкости.

Таблица 11 - Пределы огнестойкости конструкции в очаге пожара для сценария 1.1

№	Конструкция	T_{kp} , °C	R_{tp} , мин	R_s , мин	R_h , мин	R_ϕ , мин
1	Стойка	700	60	16	4,5	2,8

В результате расчетов по трем месторождениям, огнезащита конструкций эстакад для обеспечения огнестойкости R60 потребовалась на расстоянии не более 10,7 м при очаге пожара 305,24 МВт; при очаге 38,6 МВт достижение критической температуры достигается до 3 м. По двум сценариям для сооружения № 1 сделан вывод, что в зоне 6–12 м необходимо проводить проверку с теплотехническим расчетом. При пожаре пролива огнезащита требуется до 6 метров, фактические пределы огнестойкости конструкций составили $R_{\phi}15$. При пожаре факела огнезащита требуется до 9 метров, фактические пределы огнестойкости конструкций также $R_{\phi}15$. Без учета ветра максимальная высота факела с температурой 1150°C достигала высоты 16 м. Выше 8 метров при значении $T_{kp} = 700^{\circ}\text{C}$ огнезащита не нужна. Полученные результаты сведены в график зависимости температуры от времени и теплового потока для высоты 0–15 м над уровнем земли (рисунок 25).

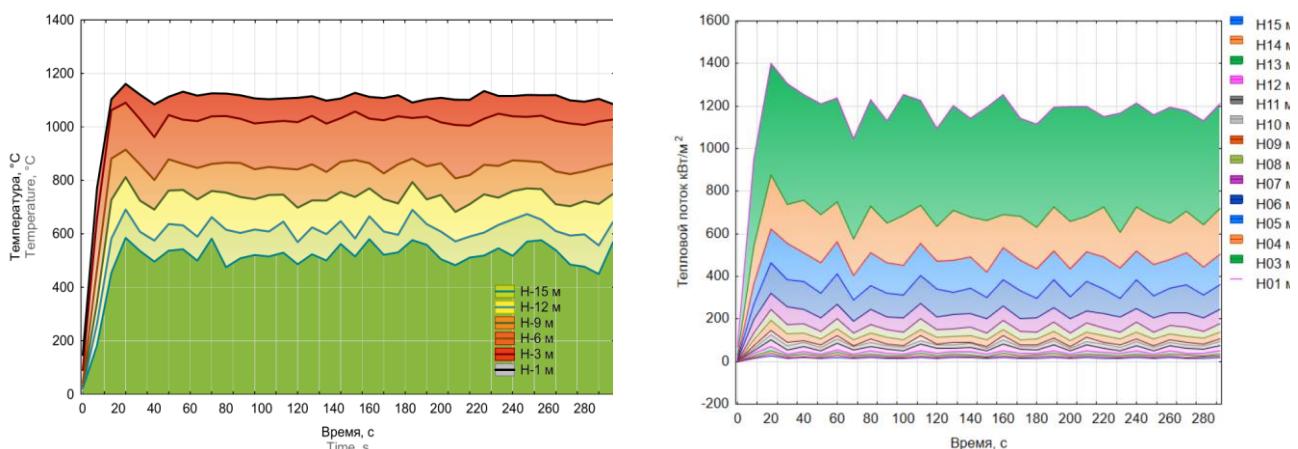


Рисунок 25 – Зависимость температуры от времени и теплового потока для высот 1–15 м

Аналогично произведена оценка огнестойкости конструкций типовых этажерок. Рассматривались сценарии пожаров-проливов и факельного горения для двух этажерок с тремя сценариями на объектах НГК. На примере рассмотренных сценариев для этажерки №2 на рисунке 26, огнезащита требуется на высоте до 10 м от уровня земли. В зоне 6–12 м необходимо проводить проверку с теплотехническим расчетом. Для конструкций данной этажерки следует применять огнезащиту до 10 м, согласно предложенной Методике. Согласно действующей норме в СП 4.13130.2013 Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты, огнезащиту следует выполнить на высоту 12 м. На рисунке 26 выполнено сравнение полученных зон нанесения огнезащитных материалов.

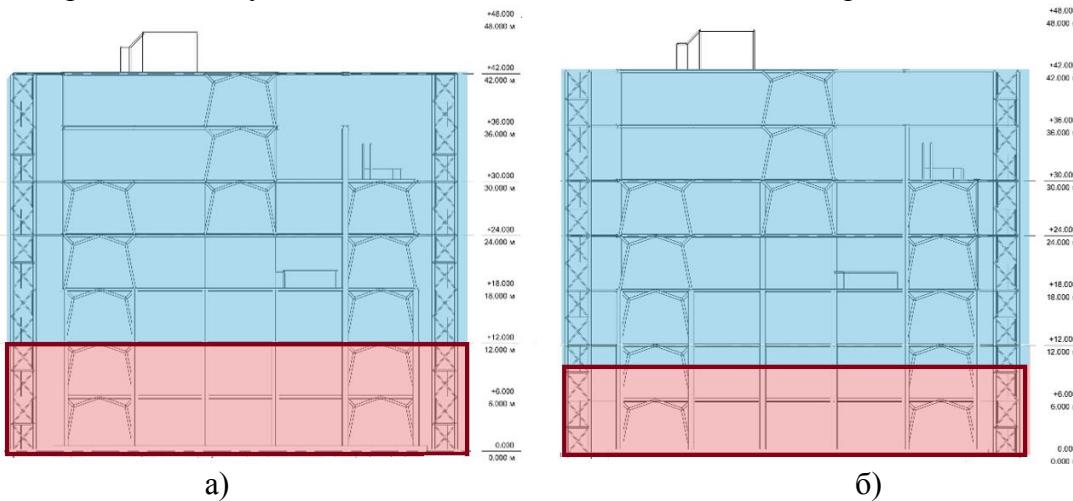


Рисунок 26 - Сравнение полученных зон нанесения огнезащитных материалов: а) согласно СП 4.1313; б) согласно предлагаемой Методике

На основе моделей в ПО PyroSim выполнен анализ влияния ветровой нагрузки на пределы огнестойкости стальных конструкций эстакад и этажерок. Прирост радиуса зоны влияния пожара составил от 4,5 до 8,6 м. На рисунке 27 показано распределение температуры вокруг очага пожара для эстакады №1.1 без учета и с учетом ветровой нагрузки.

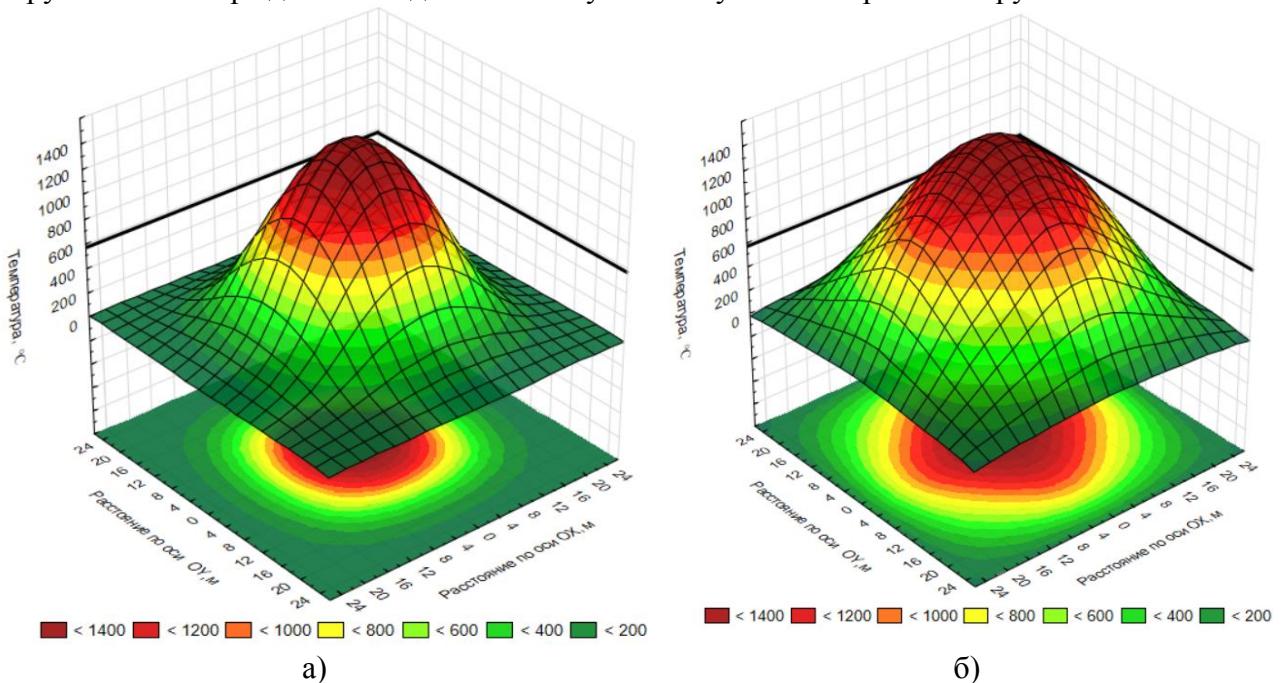


Рисунок 27 – Распределение температуры среды вокруг очага пожара а) без учета ветровой нагрузки; б) с учетом ветровой нагрузки

В Таблице 12 представлены характеристики зон воздействия пожара для всех сценариев с учетом ветровой нагрузки.

Таблица 12 - Зоны воздействия пожара с учетом ветровой нагрузки

№ Объекта	Мощность пожара, МВт	T _{kp} , °C	Принятая скорость ветра, м/с	Радиус зоны воздействия пожара, м	Радиус зоны воздействия пожара с учетом ветра, м	Изменение зоны воздействия пожара, м
1.1	305,24	695	7,7	10,7	19,3	8,6
2.1	72,21	700	3,6	5	6,9	1,9
3.1	134,60	700	2,7	8,9	11,4	2,5
2.1	349,76	500	4,1	11,5	16,4	4,9
2.2	785,18	568	3,2	13,6	18,1	4,5
2.3	681,87	624	3,2	12,4	16,5	4,1

На рисунке 28 показана иллюстрация потери геометрической неизменяемости этажерки без учета и с учетом ветровой нагрузки на этажерку.

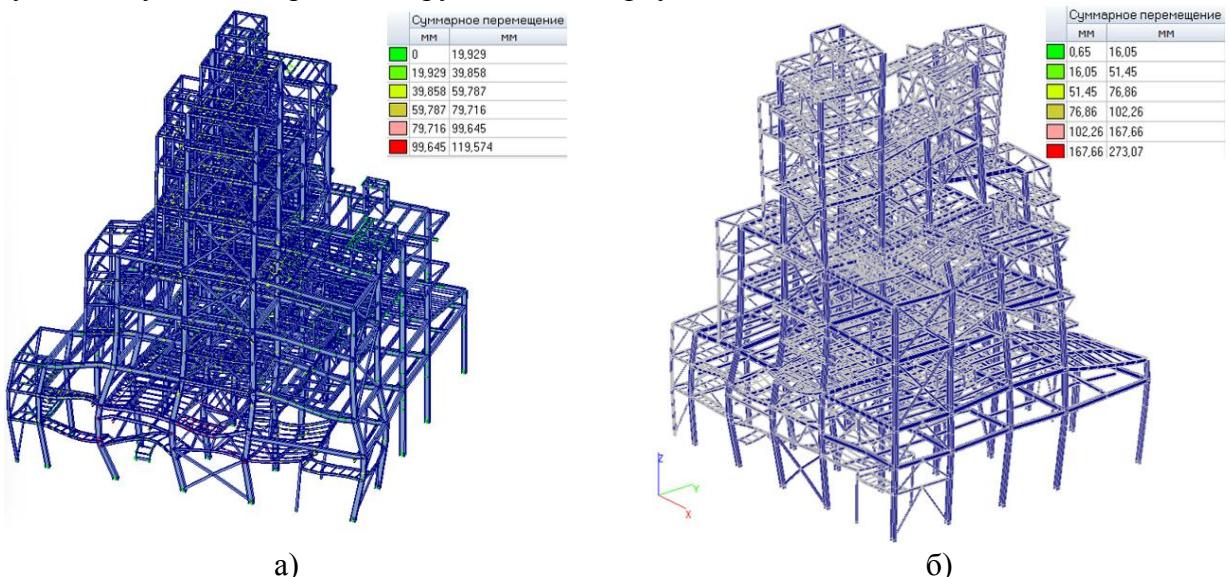


Рисунок 28 – Деформированная конструктивная схема объекта а) без учета ветровой нагрузки, б) с учетом ветровой нагрузки

Горизонтальное смещение пламени и зоны повышенной температуры составило от 2 до 6 метров, однако влияние ветра на вертикальное распространение ОФП не существенно.

В главе 7 обобщены значения достижения T_{kp} в соответствии с S- и H-режимами пожара и значения коэффициентов $K = S/H$ (отношение времени достижения предельных состояний для элементов конструкций) для всех вариантов конструкций, рассмотренных в данной работе и экспериментальным данным согласно [16]. Согласно рисунку 29 видно, что область применения коэффициента K возможно разделить на три группы: до 90 мин (включительно) $\sim 1,7$; в диапазоне от 90 до 180 мин $\sim 1,5$; начиная со 180 мин коэффициент K стремится к 1. Ввиду большой неопределенности и необходимости учитывать каждое из значений пределов огнестойкости, полученных в ходе отдельных экспериментов, рекомендуется при проектировании огнезащиты принимать значения K до 180 мин как 1,7, а после 180 мин принимать в значении 1,2.

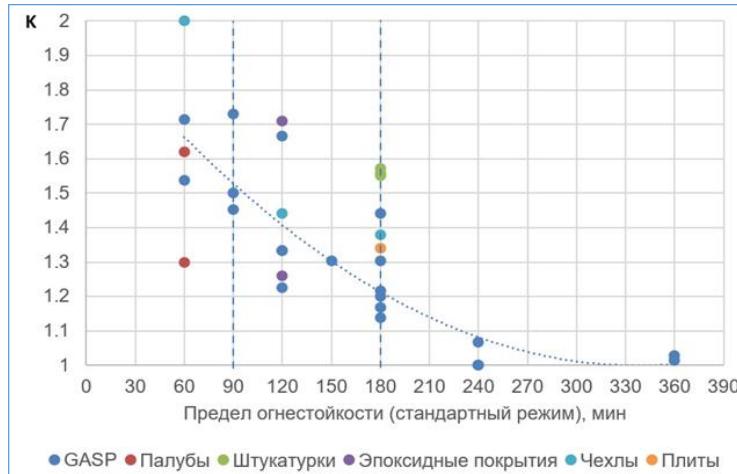


Рисунок 29 – Коэффициент К в зависимости от T_{кр} для различных видов огнезащиты

Выявлено, что огнестойкость конструкции при пожаре, вызванном углеводородами, меньше в 1,3–1,6 раза по сравнению с результатами, полученными при S-режиме. Коэффициент перспективе: стены, перегородки, шторы). Получены значения для температуры 500°C для вертикальных колонн. В первые 20 мин воздействия пожара, коэффициент K составляет 2,2–2,0 раза, а затем график значений K стремится к 1, что обусловлено поведением температурных кривых Н- и S-режима согласно математическим зависимостям, которые приведены в международной системе стандартизации.

Предложен перечень факторов, которые необходимо учитывать при выборе средств огнезащиты стальных конструкций объектов НГК, а именно: характер пожарной нагрузки (температурный режим целлюлозного или углеводородного пожара, струйного режима Jet-fire); требуемые пределы огнестойкости стальных строительных конструкций в условиях развития различных видов режимов пожара; условия эксплуатации (условия воздействия климатических факторов и промышленной атмосферы) и соответственно, сроки эксплуатации при таких воздействиях; стойкость к криогенному розливу; ремонтопригодность огнезащитных покрытий и особенность технологии нанесения и монтажа. Разработаны критерии выбора средств огнезащиты для стальных конструкций НГК на основе технических характеристик и экономических показателей огнезащитных покрытий, позволяющие при проектировании обеспечить условия рационального выбора материалов.

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы.

В приложениях приведены описание методов испытаний на огнестойкость конструкций, криогенное воздействие и огнезащитную эффективность покрытий на конструкциях, таблицы исходных данных и результаты расчета прогнозной модели для достижения температуры 500°C на необогреваемой стороне стальной конструкции с конструктивной огнезащитой, а также представлены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации на основании выполненных исследований, предложены научно-обоснованные решения, которые заключаются в совершенствовании метода обеспечения огнестойкости стальных конструкций производственных объектов нефтегазового комплекса при различных температурных воздействиях, состоящего из следующих компонент:

- определение зон воздействия пожара согласно сценариям развития пожара и математическом моделировании предела огнестойкости стальных конструкций при реальном, S-режимах и Н-режимах пожара при проливах горючего на технологических этажерках и эстакадах объектов нефтегазовой отрасли;

- применение математического моделирования для получения эффективных теплофизических характеристик применяемых огнезащитных материалов;
- разработка и внедрение новых эффективных огнезащитных материалов, рационализации способов нанесения (монтажа) огнезащитных покрытий и определении минимальной стоимости;
- разработка требований и рекомендаций при проектировании средств огнезащиты стальных несущих конструкций зданий и сооружений нефтегазового комплекса.

В ходе проведения диссертационного исследования получены следующие научные результаты:

1. Установлены расчетные значения теплофизических характеристик огнезащитных материалов, удовлетворительно сходящихся с экспериментальными результатами. Разработаны nomограммы зависимости расхода средств огнезащиты, пределов огнестойкости и/или достижения критической температуры стали для различных средств огнезащиты при S-, H- и Jet-fire режимах пожара.
2. Установлена взаимосвязь коэффициента вспучивания K_{vc} для интумесцентного огнезащитного покрытия с триадой компонентов ПА:МЕ:ПЕ, от размера пор и потери массы. Для достижения огнезащитной эффективности не менее 45 мин, поры в пенококсе вспучивающегося огнезащитного покрытия должны распределяться следующим образом: доля пор с диаметром 0,5–1 мм не должна превышать 30 %, с диаметром более 2 мм – 3 % от общего количества равномерно распределенных пор. K_{vc} покрытия должно располагаться в интервале 40–65; потеря массы образца покрытия при ТА не должна превышать 45 % до 500 °C.
3. Разработаны и внедрены новые огнезащитные материалы рулонного интумесцентного типа сухого монтажа для S-режима до 60 мин, и негорючие рулонные материалы для H-режима пожара, позволяющие достигать 240 минут.
4. Разработана математическая модель, позволяющая для конструктивных огнезащитных материалов производить выбор технических характеристик огнезащитного материала по критерию минимизации удельной стоимости материала при обеспечении требований в части температурного воздействия S-режима на материал конструкции.
5. Разработана и внедрена методика расчета фактических пределов огнестойкости конструкций для объектов НГК с учетом определения зоны воздействия пожара, позволяющая более точно устанавливать необходимые области применения средств огнезащиты. Показано, что для объектов нефтегазовой промышленности не следует применять S-режим пожара, так как огнестойкость незащищенных стальных конструкций может завышаться в 2,0–2,5 раза.
6. Показано, что огнестойкость конструкции с огнезащитой при пожаре, вызванном углеводородами, снижается в 1,3–1,6 раза по сравнению с результатами, полученными при стандартном испытании на огнестойкость. Получены коэффициенты $K = S/H$ для температуры 140 °C в случае плоских поверхностей (палубы, переборки, в перспективе: стены, перегородки, шторы) и для вертикальных конструкций для температуры 500 °C. Установлено, что на данное соотношение влияют характеристики теплоизоляционного материала: плотность, эффективная теплопроводность и теплопемкость, а также расположение материала, способы крепления и монтажа. Рекомендуемые значения коэффициента K для огнестойкости до 180 мин составляют 1,7, а после 180 мин составляют 1,2.
7. Предложен комплекс требований для проектирования работ по огнезащите стальных несущих конструкций зданий и сооружений НГК в условиях Арктики. Предложены критерии выбора огнезащитных материалов для стальных конструкций НГК на основе технических характеристик, экономических показателей огнезащитных покрытий. Показано, что целесообразно для каждого защищаемого технологического участка согласно определяемой зоны воздействия пожара проводить расчеты с использованием программных продуктов, реализующих полевую модель с возможностью расчета в окружающей среде и определять максимальные и возможные проектные аварии. В зависимости от таких зон воздействия пожара и должны определяться требуемые пределы огнестойкости конструкций объектов защиты НГК.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Hurley, D. Gottuk, J. Hall et al. SFPE handbook of fire protection engineering, 5th edition: Springer: 2016 // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition.
2. D. Nolan. Handbook of fire and explosion protection engineering principles: for oil, gas, chemical and related facilities: Third edition 2014. Elsevier Inc ISBN: 978-0-323-31301-8
3. Jin, Y., & Jang, B. S. (2015). Probabilistic fire risk analysis and structural safety assessment of FPSO topside module. Ocean Engineering, 104, 725–737. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.019>
4. Fernanda da Silva Santos, Alexandre Landesmann, Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire, Fire Safety Journal, Volume 69, 2014, Pages 57-68, ISSN 0379-7112, DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.010
5. Lim, J. W., Baalisampang, T., Garaniya, V., Abbassi, R., Khan, F., & Ji, J. (2019). Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 62. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103970>
6. M. Imran, M. S. Liew, M. S. Nasif, U. M. Niazi, and A. Yasreen. Hazard assessment studies on hydrocarbon fire and blast: an overview // Advanced Science Letters. 2017. Vol. 23(2). P. 1243–1247.
7. Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Гилетич А.Н. Методы определения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций производственных объектов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2018. – Т.27, № 11. – С.51-57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27/11/51-57.
8. E.P. Istomin, V.G. Burlov, V.M. Abramov, et al., International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, Surveying Geology & Mining Ecology Management 19, ed.5.3, 139-145, Sofia (2019) DOI:10.5593/sgem2019/5.3/S21.018
9. Gravit, M.V.; Kotlyarskaya, I.L.; Zybina, O.A.; Korolchenko, D.A.; Nuguzhinov, Z.S. Fire Resistance of Building Structures and Fire Protection Materials: Bibliometric Analysis. Fire 2025, 8, 10. <https://doi.org/10.3390/fire8010010>
10. Outinen, J., & Mäkeläinen, P. (2004). Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down. Fire and Materials, 28(2–4), 237–251. <https://doi.org/10.1002/fam.849>
11. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety-2019. Т.28, №6. – С.29-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
12. Lucherini, A.; de Silva, D. Modelling Intumescent Coatings for the Fire Protection of Structural Systems: A Review. J. Struct. Fire Eng. 2024, 15, 483–507.
13. Weisheim, W.; Schaumann, P.; Sander, L.; Zehfuß, J. Numerical Model for the Fire Protection Performance and the Design of Intumescent Coatings on Structural Steel Exposed to Natural Fires. J. Struct. Fire Eng. 2019, 11, 33–50
14. Hafiz, T.; Covello, J.; Wnek, G.E.; Melaiye, A.; Wei, Y.; Ji, J. Intumescent Coatings and Their Applications in the Oil and Gas Industry: Formulations and Use of Numerical Models. Polymers 2025, 17, 1923. <https://doi.org/10.3390/polym17141923>
15. Wang,W.; Zhu, T.; Gao, X.; Yang, J.; Chen, X.; Wang,W. Fire Test on Insulated Steel Beams with Fire-Protection Coating and Fiber Cement Board. Buildings 2025, 15, 2121. <https://doi.org/10.3390/buildings15122121>
16. Шебеко А. Ю., Шебеко Ю. Н. Взаимосвязь величин температуры строительных конструкций при стандартном и углеводородном температурных режимах пожара // Пожарная безопасность. 2017. № 2. С. 41–45.
17. AXAXL Risk Consulting (GASP). Available online: <https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf>

18. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций, – М.: Стройиздат. 1985. 216 с. - Перевод изд.: Resistance au feu des structures beton - asier - bois / B. Barthelemy, J. Kruppa.
19. Gravit, M., Shabunina, D., Ershova, N., Politi, V. (2023). Strength Characteristics of Steel Structures for Marine Transport in Fire Conditions. In: Guda, A. (eds) Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 509. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_113
20. Сафонов, В.С. Проблемы обеспечения безопасности объектов сжиженного природного газа, Часть III: Характерные сценарии и возможные последствия аварий на танкерах для транспортировки сжиженного природного газа и подводных газопроводах. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». 2023. – 272 с.
21. Zisis, T.; Vasilopoulos, K.; Sarris, I. Numerical Simulation of a Fire Accident in a Longitudinally Ventilated Railway Tunnel and Tenability Analysis. Appl. Sci. 2022, 12, 5667. <https://doi.org/10.3390/app12115667>

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В изданиях, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки РФ и индексируемых в БД Scopus:

1. Gravit, M.V.; Kotlyarskaya, I.L.; Zybina, O.A.; Korolchenko, D.A.; Nuguzhinov, Z.S. Fire Resistance of Building Structures and Fire Protection Materials: Bibliometric Analysis. Fire **2025**, 8, 10. DOI:10.3390/fire8010010
2. Gravit, M.; Korolchenko, D.; Nedviga, E.; Portnov, F.; Diachenko, S. Impact of Jet Fires on Steel Structures: Application of Passive Fire Protection Materials. Fire **2024**, 7, 281. <https://doi.org/10.3390/fire7080281>
3. M. Gravit, E. Nedviga, O. Fridrikh. The Impact of Cryogenic Media and Jet Fire on Epoxy Intumescence Compositions Designed to Protect Equipment and Building Structures of the Oil and Gas Industry. Occupational Safety in Industry.2024.№ 6.p.47–55. DOI:10.24000/0409-2961-2024-6-47-55
4. Gravit, M., Kotlyarskaya, I., Abdulova, D. Non-combustible composite materials for fire curtains: thermal analysis and microscopy. Magazine of Civil Engineering. 2024. 17(3). Article no. 12705. DOI: 10.34910/MCE.127.5
5. Gravit, M.; Dmitriev, I.; Shcheglov, N.; Radaev, A. Oil and Gas Structures: Forecasting the Fire Resistance of Steel Structures with Fire Protection under Hydrocarbon Fire Conditions. Fire **2024**, 7, 173. DOI:10.3390/fire7060173
6. Gravit, M.; Prusakov, V.; Shcheglov, N.; Kotlyarskaya, I. Fire Protection of Steel Structures of Oil and Gas Facilities: Multilayer, Removable, Non-Combustible Covers. Fire **2024**, 7, 86. DOI:10.3390/fire7030086
7. Gravit, M.; Shabunina, D.; Shcheglov, N. Thermal Characteristics of Epoxy Fire-Retardant Coatings under Different Fire Regimes. Fire **2023**, 6, 420. DOI:10.3390/fire6110420
8. Gravit, M.; Shabunina, D.; Nedryshkin, O. The Fire Resistance of Transformable Barriers: Influence of the Large-Scale Factor. Fire **2023**, 6, 294. DOI:10.3390/fire6080294
9. Komarov, A.; Korolchenko, D.; Gromov, N.; Korolchenko, A.; Jafari, M.; Gravit, M. Specific Aspects of Modeling Gas Mixture Explosions in the Atmosphere. Fire **2023**, 6, 201. DOI:10.3390/fire6050201
10. V.A. Prusakov, M.V. Gravit, Ya.B. Simonenko. Superthin Basalt Fiber as the Base of a Matrix of the Fire-Resistant Filling of Deformation Joints in Building Structures. Glass Physics and Chemistry, 2023, Vol. 49, No. 1, pp. 75–80. DOI:10.1134/s1087659622600879
11. Gravit, M.; Ikhiyanov, N.; Radaev, A.; Shabunina, D. Implementation of Elements of the Concept of Lean Construction in the Fire Protection of Steel Structures at Oil and Gas Facilities. Buildings **2022**, 12, 2016. DOI:10.3390/buildings12112016

12. Gravit, M.; Shabunina, D.; Antonov, S.; Danilov, A. Thermal Characteristics of Fireproof Plaster Compositions in Exposure to Various Regimes of Fire. *Buildings* 2022, 12, 630. DOI:10.3390/buildings12050630
13. Gravit, M., Shabunina, D., Ershova, N., Politi, V. (2023). Strength Characteristics of Steel Structures for Marine Transport in Fire Conditions. In: Guda, A. (eds) Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 509. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-031-11058-0_113
14. Gravit, M.; Shabunina, D. Numerical and Experimental Analysis of Fire Resistance for Steel Structures of Ships and Offshore Platforms. *Fire* 2022, 5, 9. <https://doi.org/10.3390/fire5010009>
15. Gravit, M.; Klementev, B.; Shabunina, D. Fire Protection of Steel Structures with Epoxy Coatings under Cryogenic Exposure. *Buildings* 2021, 11, 537. <https://doi.org/10.3390/buildings11110537>
16. Gravit, M.; Shabunina, D. Structural Fire Protection of Steel Structures in Arctic Conditions. *Buildings* 2021, 11, DOI:10.3390/buildings11110499
17. Marina Gravit, Elena Golub, Boris Klementev, Ivan Dmitriev. Fire Protective Glass Fiber Reinforced Concrete Plates for Steel Structures under Different Types of Fire Exposure. *Buildings* 2021, Vol.11, Issue 5, 187. <https://doi.org/10.3390/buildings11050187>
18. M. Gravit, I. Dmitriev, Numerical Simulation of Fire Resistance of Steel Ship Bulkheads, *Transportation Research Procedia*, Vol.54, 2021, Pp.733-743, ISSN 2352-1465, DOI:10.1016/j.trpro.2021.02.127
19. Gravit, M.V., Golub, E.V., Grigoriev, D.M., Ivanov, I.O. Fireproof suspended ceilings with high fire resistance limits. *Magazine of Civil Engineering*. 2018.84(8).Pp. 75–85. DOI:10.18720/MCE.84.8.
20. Gravit M. et al. Increase of Fire Resistance Limits of Building Structures of Oil-and-Gas Complex Under Hydrocarbon Fire // *Adv. Intell. Syst. Comput.* 2018. Vol. 692.
21. Gravit M.V., Golub E.V., Antonov S.P. Fire protective dry plaster composition for structures in hydrocarbon fire. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 3. Pp. 86–94. DOI:10.18720/MCE.79.9.
22. Korotkov, A.S., Gravit, M. 3D-map modelling for the melting points prediction of intumescent flame-retardant coatings. *SAR and QSAR in Environmental Research*. 2017.Vol. 28, Issue 8, 3 Pp. 677-689. DOI: 10.1080/1062936X.2017.1370725

Монографии

1. Гравит М.В., Нефтегазовые сооружения: огнестойкость и огнезащита стальных конструкций: монография/ М.В. Гравит. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 384 с.: ил., табл. ISBN 978-5-9729-2325-0
2. Olga Zybina, Marina Gravit. Intumescence Coatings for Fire Protection of Building Structures and Materials. Springer Series on Polymer and Composite Materials. 2020. Publisher Springer International Publishing. XI, p.210. ISBN 978-3-030-59422-0
3. Гравит М.В. Огнестойкость легких стальных тонкостенных конструкций: монография / М. В. Гравит, И.И. Дмитриев. – СПб.: Политех-пресс, 2020. – 213 с. ISBN 978-5-7422-7032-4

Публикации в журналах, включенных в ВАК, РИНЦ

1. Гравит М.В., Мамедов Э.З., Дмитриев И.И. Методика расчета фактических и обоснование требуемых пределов огнестойкости стальных конструкций эстакад и этажерок нефтегазового комплекса//*Вести газовой науки*. №1 (61)/2025. С.191-204. Режим доступа: [https://vniigaz.gazprom.ru/d/journal/53/83/vgn-1-\(61\)-2025.pdf](https://vniigaz.gazprom.ru/d/journal/53/83/vgn-1-(61)-2025.pdf)
2. Гравит М.В., Мамедов Э.З. Моделирование огнестойкости конструкций эстакад нефтегазовых сетей месторождений при кустовом расположении скважин // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 36–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51
3. Ю.Е. Тюленев, М.В. Гравит. Режим горения Jet-Fire – вызов для огнестойкости конструкций объектов нефтегазового комплекса // Газовая промышленность, № 8, 2024. С.76-82.
4. Гравит М.В., Антонов С.П., Фридрих О.А., Недвига Е.С. Системы огнезащиты стальных конструкций с цементными плитами и противопожарным барьером при криогенном и Jet-Fire

воздействиях // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2024. № 2. С. 75–86. DOI: 10.25257/FE.2024.2.75-86.

5. Ю.Е. Тюленев, М.В. Гравит, Д.Е. Шабунина. Огнезащита стальных конструкций эпоксидными составами как эффективный инструмент обеспечения пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса // Газовая промышленность, № 8, 2023. С.100-107.
6. Гравит М. В., Шабунина Д.Е. Штукатурные составы как огнезащита стальных конструкций объектов нефтегазового комплекса // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, №. 3, 2022, С. 46–55 - DOI: 10.25257/FE.2022.3.46-55 - EDN: JODQTC
7. Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов// Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30. № 5. С. 5–22.
8. Гравит М.В., Прусаков В.А., Коротин И.Г., Тимофеев Н.В., Симоненко Я.Б. Интумесцентная конструктивная изгибающаяся огнезащита для строительных конструкций и кабельных линий. Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2020;29(3):18-32. <https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.03.18-32>
9. И.В. Абрамов, М.В. Гравит, Э.И. Гумерова. Повышение пределов огнестойкости судовых и строительных конструкций при углеводородном температурном режиме//Газовая промышленность. № 5, 2018. С. 106–115.
10. Прусаков В.А., Гравит М.В., Тимофеев Н.С., Симоненко Я.Б., Гуторов К.В., Шевченко А.М.К.С. Огнезащита деформационных и линейных швов зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety, 2018. - Т.27, № 2–3. - С.45 - 56. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.45-56.
11. Недрышкин О.В., Гравит М.В. Программные комплексы моделирования опасных факторов пожара // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 38-46.
12. Сильников М.В., Гравит М.В., Зыбина О.А. Термоаналитическое исследование различных марок полифосфата аммония для интумесцентных огнезащитных композиций. Вопросы оборонной техники. научно–технический журнал. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 9–10. С.76 – 79.
13. Гравит М.В. Гармонизация российских и европейских нормативных документов, регламентирующих методы испытаний на огнестойкость строительных конструкций с использованием средств огнезащиты // Пожаровзрывобезопасность, том.23, 2014. № 5.С.38 – 46.
14. Хасанов И. Р., Гравит М. В., Косачев А.А., Пехотиков А. В., Павлов В. В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // Пожаровзрывобезопасность.- 2014.- Т. 23, № 3.С.49-57.
15. Гравит М.В. Цветовое исполнение для строительных конструкций с огнезащитными вспучивающимися покрытиями // Пожаровзрывобезопасность. 2013. № 10. С.47 – 51.
16. Гравит М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающих покрытий // Пожаровзрывобезопасность. 2013. №5. С.33-37.
17. Еремина Т.Ю., Гравит М.В., Дмитриева Ю.Н. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 7.С.52-56.
18. Гравит М.В. Нормативные документы Европейского содружества, устанавливающие требования к оценке соответствия огнезащитных вспучивающихся покрытий для строительных конструкций // Лакокрасочные материалы и их применение. 2013.№ 3.С.38-43.
19. Хасанов И.Р., Еремина Т.Ю., Гравит М.В., Макеев А.А. Использование принципа расширенного применения результатов испытаний строительных конструкций и материалов в европейской системе нормирования пожарной безопасности // Архитектура и Строительство России. 2013. № 3.С.24-28

20. Еремина Т.Ю., Гравит М.В., Дмитриева Ю.Н. Исследование электропроводности полифосфатов аммония для интумесцентных огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 9. С.38 – 41.
21. Еремина Т.Ю., Гравит М.В., Дмитриева Ю.Н. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 7. С.52 – 56.
22. Бессонов Н.М., Еремина Т.Ю., Гравит М.В., Дмитриева Ю.Н. Метод и программа расчета времени прогрева стальных конструкций, защищенных огнезащитной вспучивающейся краской «Терма» // Пожаровзрывобезопасность. Том 17. 2008. № 6. С. 27–32.
23. Крашенинникова М.В. Тенденции и перспективы в разработке композиций вспучивающихся огнезащитных покрытий для повышения пределов огнестойкости строительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. 2008. № 2. С. 36–39.

Патенты и охранные документы

1. Гравит М.В., А.Е. Радаев, Н.Е. Щеглов. Программа для формирования прогнозной модели оценки стоимости приобретения огнезащитного материала для объектов промышленного и гражданского строительства / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025680107, 01.08.2025.
 2. Гравит М.В., Прусаков В.А. Многослойное огнестойкое эластичное полотно с огнезащитным интумесцентным рулонным покрытием. Патент на изобретение № 283932, 29.04.2025.
 3. Прусаков В.А., Чалов В.П., Гравит М.В., Ватин Н.И. Гибкая накладная огнестойкая кабельная проходка для тонкостенных препрятствий. Патент на изобретение № 2761812 С1, 13.12.2021.
 4. Прусаков В.А., Гравит М.В. Огнезащитное интумесцентное рулонное покрытие. Патент на изобретение RU 2711076 С1, 15.01.2020.
 5. Прусаков В.А., Гравит М.В., Антонов С.П. Огнестойкое многослойное изделие для огнезащиты строительных конструкций. Патент на изобретение RU 2725720 С1, 2020.07.03.
 6. Сечина И.Д., Пшеничников А.М., Гравит М.В., Недрышкин О.В. Многослойное полотно трансформируемой противопожарной препрятствия. Патент на полезную модель RU 187845 U1, 19.03.2019.
 7. Ефимов О.И., Барабанов Э.М., Гравит М.В., Генрих Д.И., Турышев Б.И. Огнезащитное устройство для кабельного перехода переборки. Патент на изобретение RU 2690110 С2, 30.05.2019. Заявка № 2016134193 от 22.08.2016.
 8. Прусаков В.А., Гравит М.В., Антонов С.П. Огнестойкая кабельная проходка для стен и перекрытий зданий. Патент на изобретение RU 2705620 С1, 11.11.2019.
 9. Генрих И.О., Таланов Д.Г., Ефимов О.И., Гравит М.В., Турышев Б.И. Способ получения огнезащитного состава и огнезащитный состав для трубопроводного и кабельного перехода переборки. Патент на изобретение RU 2675848 С2, 25.12.2018.
 10. Еремина Т.Ю., Крашенинникова М.В. Состав краски огнезащитной атмосферостойкой. Патент на изобретение № 2312548, 27.12.2007 г.
- Гравит = Крашенинникова