Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

*На правах рукописи*

Мальцев Алексей Николаевич

# РАЗРАБОТКА СПОСОБА ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИЙ ОТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ ЛАНДШАФТНЫХ ПОЖАРОВ

2.10.1. Пожарная безопасность

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
кандидат педагогических наук, доцент
Лазарев Александр Александрович

Иваново – 2025

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ..... 12
1.1 Анализ особенностей и условий противопожарного обустройства населенных пунктов ..... 12
1.2 Трудногорючие материалы для ограничения распространения огня ..... 20
1.3 Обзор методов испытания трудногорючих материалов ..... 27
1.4 Обзор математических методов расчета теплопроводности противопожарной преграды ..... 34
1.5 Выводы по 1 главе ..... 40
1.6 Постановка задач ..... 41
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ..... 43
2.1 Используемые материалы и изделия ..... 43
2.2 Краткое описание применяемых экспериментальных методов ..... 50
2.2.1 Определение горючих веществ и материалов для создания тестового очага пожара ..... 51
2.2.2 Стендовые испытания материалов ..... 52
2.2.3 Метод огневых испытаний материалов ..... 52
2.3 Выводы по 2 главе ..... 54
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРОТИВОПОЖАРНУЮ ПРЕГРАДУ ..... 56
3.1 Разработка конструкции быстровозводимой противопожарной преграды для защиты от ландшафтных пожаров ..... 56
3.2 Математическая модель определения динамики распространения температуры в противопожарной преграде для защиты от низовых ландшафтных пожаров ..... 60
3.3 Выводы по 3 главе ..... 79

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ПРЕГРАДЫ ..... 81
4.1 Результаты экспериментального исследования эксплуатационных и конструктивных характеристик противопожарной преграды ..... 81
4.2 Определение поведения противопожарной преграды для защиты от ландшафтных пожаров в условиях огневых испытаний ..... 112
4.3 Выводы по 4 главе ..... 130
ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАТРАТ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА ОТ ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА ..... 132
5.1 Определение математического ожидания экономических потерь от ландшафтного пожара ..... 133
5.2 Расчет экономических потерь от ландшафтного пожара ..... 134
5.3 Определение эффективности затрат на обеспечение пожарной безопасности для защиты населенного пункта от ландшафтного пожара ..... 135
5.4 Выводы по 5 главе ..... 137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 138
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ..... 140
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ..... 165
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ..... 166
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 ..... 167
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 ..... 173
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 ..... 174
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 ..... 175
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 ..... 176
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 ..... 177
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 ..... 184
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 ..... 185

# ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования**

В основных направлениях «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» на 2024-2030 годы, утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 предусматривается кардинальное повышение безопасности территориальной целостности и защиты территорий Российской Федерации с учетом складывающейся мировой обстановки от возможных угроз различного уровня, включающих в себя ландшафтные (природные) пожары [153]. При этом акцентируется внимание на разработку, внедрение, применение и использование новых средств, способов и методов обеспечения пожарной безопасности целостности государства.

Актуальность защиты территорий от ландшафтных пожаров является приоритетной задачей. Каждый год территория Российской Федерации подвергается выгоранию больших площадей, на которых бушуют ландшафтные пожары (Южная Сибирь, Забайкалье, Урал), уничтожающие или повреждающие большое количество жилых домов и хозяйственных построек. По имеющимся данным [122] за 2019-2024 года произошло 324845 пожаров на открытых территориях в Сибири, суммарный ущерб от которых составил более 6,3 миллиардов рублей.

В соответствии с пунктом 70 Правил противопожарного режима в Российской Федерации, утвержденных постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 (ред. от 03.02.2025) предусматривается выполнение 1 из 3 вариантов реализации противопожарных мероприятий [124]. К ним относятся:

- очистка прилегающей к лесу территории от сухой травянистой растительности, пожнивных остатков, валежника, порубочных остатков, мусора и других горючих материалов на полосе шириной не менее 10 метров от леса;

- отделение леса противопожарной минерализованной полосой шириной не менее 1,4 метра;

- создание иной противопожарной преграды (иного противопожарного барьера).

Однако на практике возникают случаи невозможности проведения первых двух противопожарных мероприятий из-за отсутствия подъездных путей для специальной техники. При этом третий вариант организационно-технического решения в нормативном документе не описан [124]. Так, например, в водоохранной зоне озера Байкал, расположенного в Восточной Сибири, отсутствуют возможности проложить минерализованные полосы, не нарушая требования законодательства РФ. Указанные ограничения обусловлены запретом на проведение в полном объеме противопожарных мероприятий [158]. Действующий закон налагает ограничения – запрещает в полном объеме проводить противопожарные мероприятия. Из-за подобной коллизии под угрозу попадают населенные пункты, находящиеся в непосредственной близости от лесных массивов [134]. Отсутствие научных исследований в данной области способствуют комплексному подходу к решению данной проблемы путем разработки и создания универсальной противопожарной преграды. Таким образом, актуальность исследования заключается в разрешении противоречия между социальным заказом на выполнение мероприятий по защите от ландшафтных пожаров в труднодоступных для специальной техники местах и отсутствием соответствующих научно-обоснованных и организационно- технических решений.

**Степень разработанности темы исследования**

Исследование связано с разработкой способа защиты территорий от распространения низовых ландшафтных пожаров посредством создания противопожарных преград на основе композиционных материалов. При этом под способом в рамках проводимого исследования понимается система действий по разработке, созданию, испытанию, применению технических средств (устройств), направленных на ограничение распространения низового ландшафтного пожара. В исследованиях Залесова С.В., Гомана П.Н., Арбузова В.В., Кректунова А.А., Fisher R., Lewis B., Price O. решается проблема организации пожарной

безопасности на открытых пространствах и в лесах при помощи создания разного рода инженерно-технических сооружений природного и естественного характера. Однако, предлагаемые авторами исследований решения, не затрагивают вопросы изучения труднодоступных территорий (участков) местности. Также в настоящее время отсутствует информация о патентных исследованиях, решающих вопросы обеспечения безопасности и защиты труднодоступных участков местности. Вопросами обеспечения пожарной безопасности нефтегазовой отрасли с помощью тепловых экранов «Согда» занимались Брушлинский Н.Н., Усманов М.Х., Шимко В.Ю. Аспекты в области защиты зданий с помощью противопожарных преград рассматривались Полежаевым Ю.В., Шимко В.Ю., Заикиным С.В., Копыловым Н.П., Ридигер П.Д., Friday O, Cramer S. и др. Методы тепловой защиты для объектов представлены в трудах Полежаева Ю.В., Михайлова В.В. Исследованиями в области тепломассопереноса занимались многие отечественные и зарубежные специалисты Лыков А.В., Федосов С.В., Козлачков В.И., Присадков В.И., Кошмаров Ю.А., Баканов М.О. и др. Проблемам моделирования теплопереноса в строительных конструкциях с огнезащитой и оценке их огнестойкости посвящены труды Ройтмана В.М., Жукова В.В., Страхова В.Л., Никифорова А.Л.  и ряда других ученых. Поведение строительных материалов в условиях воздействия высоких температур изучались Смирновым Н.В., Ширяевым Е.В., Соколовой Ю.А., Наумовым А.Г.

**Цель исследования –** разработка способа защиты территорий от распространения ландшафтных пожаров на нижнем ярусе травянистой растительности в труднодоступных территориях посредством создания противопожарных преград с использованием огнестойких композиционных материалов на основе стеклоткани с кремнийорганическим соединением.

Для достижения цели исследования определены следующие **задачи:**

1. Провести анализ существующих подходов и способов обеспечения пожарной безопасности населенных пунктов при возникновении ландшафтных

пожаров в условиях невозможности проезда специальной техники при создании минерализованной полосы.

2. Разработать методы стендовых и огневых испытаний устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара.

3. Разработать технические средства для предотвращения распространения ландшафтного пожара, использование которых составляет основу предложенного способа защиты.

4. Создать новый композиционный материал на основе стеклоткани с кремнийорганическим соединением.

5. Разработать математическую модель процесса теплопереноса при тепловом воздействии на устройство для предотвращения распространения ландшафтного пожара, учитывающую температуру распространения в слоях предложенного материала в условиях быстрого прогрева.

6. Провести оценку защитной способности разработанного устройства по сдерживанию огневого воздействия ландшафтного пожара.

7. Оценить эффективность затрат на установку устройства для предотвращения распространения ландшафтного пожара в сравнении с традиционными методами (выжигание сухой травы, очистка от валежника).

**Научная новизна.** В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие научные результаты:

- предложен новый композиционный материал на основе стеклоткани с нанесенным кремнийорганическим соединением;

- впервые разработаны устройства для предотвращения распространения ландшафтного пожара;

- разработаны методы стендовых и огневых испытаний устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара;

- предложена математическая модель процесса теплопереноса, позволяющая обосновать метод расчета и определить динамику распространения температуры в

композиционном материале в условиях быстрого прогрева для создания устройств ограничения распространения ландшафтного пожара.

**Теоретическая значимость работы** заключается:

1. В разработке научно обоснованных методов испытаний устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара, а также в выборе материала огнезащитного полотна с учетом разработанной математической модели теплопереноса, позволяющей определить динамику распространения температуры в композиционном материале.

2. В получении зависимости изменения температуры в образцах материалов от продолжительности времени нагрева и потери массы.

3. В создании базы данных по теплофизическим характеристикам для разработки устройств в целях предотвращения распространения ландшафтного пожара.

**Практическая значимость работы** заключается:

1. В разработке технических защитных устройств, их конструкций и способа применения, позволяющих эффективно ограничивать распространение пламени и обеспечивать пожарную безопасность объектов для защиты от воздействия опасных факторов пожара.

2. В создании устройств, обеспечивающих эффективную защиту населенных пунктов от ландшафтных пожаров при минимальных затратах, основанных на применении материалов низкой себестоимости, что снижает затраты на создание устройств без ущерба для их эффективности.

3. В обосновании выбора огнезащитного материала и конструкций быстровозводимых технических устройств в условиях проведения стендовых и огневых испытаний.

Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность Остаповского сельского поселения Шуйского муниципального района Ивановской области, ООО «Византия», а также в образовательный процесс Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России.

**Область исследования**. Работа выполнена в соответствии п. 3 в части, касающейся разработки моделей и методов исследования пожароопасных свойств материалов; п. 5, а также п. 16 в части, касающейся разработки технических средств, направленных на обеспечение безопасности людей и ограничение распространения опасных факторов пожара и их сопутствующих проявлений паспорта специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

**Методология и методы исследования.**

В работе описаны результаты обобщения, систематизации и анализа отечественной и зарубежной научно-технической литературы по теме исследования. Для проведения исследований применялись современные методы исследования:

- численно-аналитическое моделирование;

- регрессионный анализ (для исследования взаимосвязей между показателями);

- метод «микропроцессов» (для описания процессов, связанных с передачей тепла в материале в условиях воздействия ландшафтного пожара);

- метод экспертных оценок (для ранжирования величин по критерию их важности).

**На защиту выносятся следующие положения**:

1. Конструкции устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара, использование которых составляет основу предложенного способа защиты территорий, с оптимальной длинной модуля до 3 м при скорости ветра до 17 м/с.

2. Методы стендовых и огневых испытаний устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара, а также результаты их применения.

3. Математическая модель, позволяющая определить динамику распространения температуры в композиционном материале технических средств для предотвращения распространения низового ландшафтного пожара.

**Степень достоверности и обоснованность научных результатов исследования.**

Исследование проведено с применением современных физических методов анализа, а также математической обработки данных. Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлены использованием методик по ГОСТам и соответствием полученных экспериментальных данных физико-химическим представлениям о процессах теплопереноса и результатам экспериментальной работы других авторов, а также апробацией материала на конференциях международного и всероссийского уровней. Во время проведения исследований было проведено 50 стендовых и 12 полевых экспериментов.

**Апробация результатов исследования**. Результаты работы докладывались и обсуждались на: XVII, XIX Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2022, 2024 гг.); III Международной научно-практической конференции «Перспективные технологии и материалы» (Севастополь, ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, 2022 г.); Научно – практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: Сборник материалов Дней науки» (Екатеринбург, Уральский институт ГПС МЧС России, 2022 г.); IX Межрегиональном семинаре «Экологические аспекты современных городов» (Иваново, ИВГПУ, 2022, 2023 гг.); VIII Международной научно – практической конференции «Современные энергосберегающие процессы и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ – 2023» (Москва, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023 г.); VI Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2023 г.); IV Международном Косыгинском форуме «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета», посвященного 120 – летию со дня рождения А.Н. Косыгина, секция «Повышение энергоресурсоэффективности,

экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (EESTE – 2024)», посвященного 120 – летию со дня рождения П.Г. Романкова (Москва, 20-22 февраля, 2024 г.); II Международной научно-практической конференции «Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование» (Иваново, ИВГПУ, 2024 г.).

**Публикации**. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 статьях, среди которых 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных действующим перечнем ВАК (в том числе в международной базе данных Scopus – 1 статья). Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных. Техническая новизна работы защищена 2 патентами РФ на полезную модель.

**Структура и объём работы**. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Общий объем работы составляет 185 страниц машинописного текста. Работа иллюстрирована 42 рисунками, содержит 56 таблиц и 10 приложений. Список литературы включает в себя 202 наименования.

**Личный вклад автора.** Автором сформулированы цели и задачи диссертационной работы, разработан комплекс теоретических и экспериментальных исследований; предложены и научно обоснованы подходы к проведению расчета, позволяющего определить динамику распространения температур в слоях огнезащитного материала; разработаны конструкции устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара; проведена статистическая обработка данных. Автор принял личное участие в проведении теоретических исследований и постановке экспериментов.

# ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Анализ особенностей и условий противопожарного обустройства населенных пунктов

Ежегодно человечество сталкивается с проблемой массового выгорания лесов, а впоследствии и населенных пунктов. Так называемые «ландшафтные пожары» [26, 76, 89, 156] охватывают колоссальные по площади территории, как в Российской Федерации, так и за рубежом, которые уничтожают или повреждают большое количество жилых домов и хозяйственных построек. Так, например, в 2015 году в результате сильных пожаров, произошедших в Южной Сибири, Забайкалье, на Урале был нанесен существенный урон лесному фонду экосистемы [142]. В апреле того же неблагополучного года с точки зрения количества и подвергшихся площадей в результате пожаров в Хакасии погибли 32 человека. Пострадали порядка 1500 человек, 4694 человека лишились крыши над головой. Огонь уничтожил и повредил на своем пути 1678 жилых домов в 33 населенных пунктах [76]. Один из самых масштабных пожаров был зарегистрирован все в том же 2015 году в городе Абакан [142]. Тогда было уничтожено 980 объектов, что стало самым массовым за последние 10 лет. Множественные очаги возгорания возникли вследствие неосторожного обращения с огнем при сжигании сухой травы при сильном ветре, порывы которого достигали 30 м/сек [76, 142]. Наибольшие территории по открытым площадям, лесному фонду и сельхоз угодьям принадлежат по праву Центральной части России и Дальнему Востоку. Анализ проведенных статистических данных [93, 122] с 2021 по 2024 год показал, что наблюдается тенденция роста числа пожаров открытых пространств на указанных территориях, что, безусловно, приводит к гибели людей и материальному ущербу (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Статистика данных о пожарах с 2021 по 2024 годы [93, 122]

| Количество произошедших пожаров по годам, ед. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Федеральный округ | 2021 год | 2022 год | 2023 год | 2024 год | Всего |
| Уральский | 2079 | 1463 | 2409 | 4661 | 10612 |
| Сибирский | 4298 | 4549 | 3996 | 2807 | 15650 |
| Дальневосточный | 2331 | 5082 | 5391 | 3566 | 16370 |
| Итого по Федеральным округам | 8708 | 11094 | 11796 | 11034 | 42632 |
| Итого по Российской Федерации | 12125 | 13602 | 14812 | 15112 | 55651 |

Особенностью данных произошедших пожаров, как правило, является большая интенсивность тепловых потоков, большая пожарная нагрузка, а также достаточно высокая линейная скорость распространения горения, что существенно увеличивает вероятность перехода огня из одной системы состояния контроля пожарной безопасности «лес-поле-населенный пункт» (рисунок 1.1) в другое [88], тем самым уничтожая целые населенные пункты, поскольку на своем пути, развившийся пожар не встречает должного сопротивления.

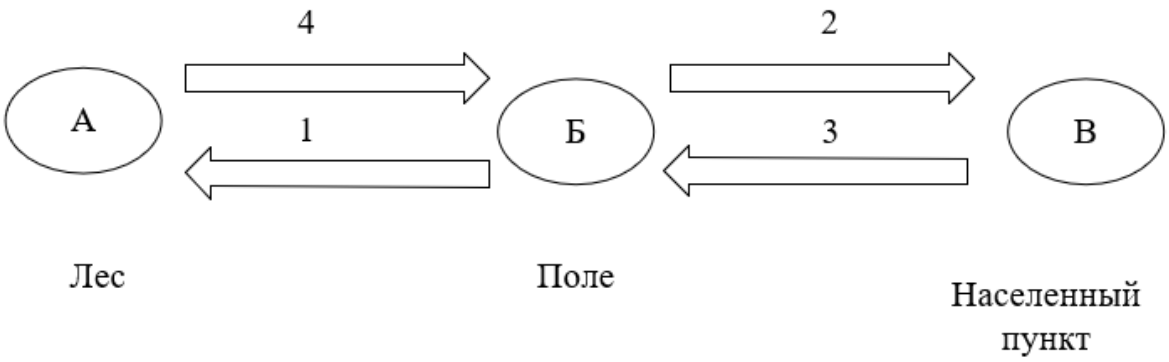



Рисунок 1.1 – Размеченный граф состояний системы «лес – поле – населенный пункт» [88]

Зачастую предысторией возникновения очагов ландшафтных пожаров являются климатические условия в виде аномальной жары и отсутствия выпадения осадков в виде дождя длительный период, но также не стоит исключать

деятельность человека [75, 87, 90, 127]. Рассмотрев ряд описанных выше условий, наиболее предпочтительным представляется использование технологии создания противопожарных преград для защиты от ландшафтных и лесных низовых пожаров [88]. Статья 37 Технического регламента [157] позволяет выделить следующие преграды:

- противопожарные стены;
- противопожарные перегородки;
- противопожарные перекрытия;
- противопожарные разрывы;
- противопожарные занавесы, шторы и экраны (экранные стены);
- противопожарные водяные завесы;
- противопожарные минерализованные полосы;
- зона, свободная от пожарной нагрузки.

В целях более углубленного изучения вопроса предлагается детально рассмотреть труды ученых, посвященные каждой из преград.

Разработками технологий создания противопожарных стен активно занимались Шухардин А.А., Акопян А.Б., Климин С.Н., Дегельзиггер В. и др. В работе [113] рассматриваются аспекты создания конструкций в виде противопожарных стен, предназначенных для предотвращения горения из помещений или пожарных отсеков в другие помещения. Противопожарная стена состоит из несущей конструкции с закрепленной на ней трехслойными панелями, а сама несущая конструкция включает в себя бетонные колонны. Одной из особенностей является конструктивное исполнение противопожарной стены по повышению огнестойкости до максимально нормируемых величин. Однако данная технология является весьма непростой и требует достаточно больших трудоемких затрат. Стоит обратить внимание на состав противопожарной стены, практически более чем на 60 % состоящий из комплектующих иностранного производства. Это фактически ограничивает возможность применения указанной технологии для защиты от ландшафтных пожаров в современных условиях [93].

Технологией создания противопожарной перегородки для защиты от пожаров угольных шахт занимались Ушаков А.Г., Ушакова Е.С., Ушаков Г.В. В своих исследованиях авторы предлагают применение огнепреградительных щитов, основой которых являются плиты, полученные из формовочной смеси, включающей гранулированный силикат натрия и жидкое натриевое стекло [154]. Как отмечают сами авторы, эффективность огневой защиты оценивали визуально по состоянию огнепреграждающей поверхности, что не дает точного ответа на вопрос об эффективности применения и дальнейшей эксплуатации перегородки. Перспективы применения данной перегородки для защиты от ландшафтных пожаров ограничены ввиду достаточно сложной технологии ее создания, а также относительно небольших размеров защищаемого пространства [93].

Изучением проблемы создания противопожарных штор занимались Страхов В.А., Заикин С.В. [45]. Ограждающей частью данных штор является огнестойкий экран, который в штатном режиме эксплуатации здания располагается в свернутом виде над проемом, а по сигналу о начале пожара разворачивается, заполняя проем. При этом требуемый предел огнестойкости экрана может составить EI150. Экран выполняется из капиллярно-пористых термостойких волокнистых материалов по швейной технологии. В его структуре при работе создается парокапельновоздушная среда из охлаждающей жидкости. В качестве охлаждающей жидкости используется вода, подаваемая в непрерывном режиме в верхнюю часть экрана и стекающая вниз по порам под действием силы тяжести. Огнестойкий экран подвергается одностороннему огневому воздействию, которое характеризуется наличием непосредственного контакта пламени с обогреваемой поверхностью. Одновременно происходит испарение воды, сопровождающееся массопереносом пара в капиллярно-пористой среде стенки в направлении к обогреваемой поверхности [45]. Как отмечалось в работе [22], противопожарные шторы имеют ряд недостатков, таких как необходимость контроля за автоматическим опусканием штор с возможностью ручного управления, поскольку не допускается их опускание при нахождении под ними людей, а также то, что при

проведении эвакуации наличия на пути движения людей преграды в виде шторы оказывает определенное психологическое воздействие, которое может привести к задержке или изменению направления движения людей [93].

Работа авторов Фряновой К.О., Гербель Д.П. посвящена изучению влияния характерных свойств лесного массива и скорости ветра на размеры противопожарного разрыва при верховых лесных пожарах. По результатам исследования авторы сходятся во мнении, что с увеличением скорости ветра необходимо увеличивать разрыв, а также чем больше влаги содержится в лесных горючих материалах (ЛГМ) и чем больше его запас, тем меньшая ширина просеки требуется для предотвращения распространения пожара [168]. Сам по себе метод создания противопожарных разрывов достаточно логичен и зачастую применяется сотрудниками лесной пожарной охраны, но тогда мы снова сталкиваемся с проблемой организации расчистки определенной ширины просеки, а именно людские ресурсы и применение специальной техники [92].

Исследования Булвы И.В. посвящены пространственному распределению опасных факторов пожара (ОФП) с учетом работы водяной завесы в качестве противопожарной преграды. В своей работе [15] автор отмечает ряд основных достоинств водяных завес, таких как, способность к снижению тепловых потоков, снижению газовоздушной смеси и защищаемого объекта в помещении, а также водяная завеса не создает препятствий для движения людей, что является весьма актуальным при обеспечении безопасности движения людских потоков. Однако необходимо заметить, что данная противопожарная преграда характерна лишь для зданий и сооружений, имеющих постоянное снабжение водой [93].

Решением задачи по повышению противопожарной устойчивости противопожарного перекрытия в случае возгораний зданий и сооружений, возводимых сборно-монолитным или монолитным способами, занимались Сумкин И.А., Маслов Д.В. [114]. Применение данных преград для защиты населенных пунктов от ландшафтных пожаров также представляется невозможным в силу сложности их исполнения [93].

Однако необходимо отметить, что согласно пункту 70 правил [124] основными средствами защиты от ландшафтных пожаров на сегодняшний день остаются очистка местности у края леса от сухой травянистой растительности, ветхих деревьев, создание минерализованной полосы (рисунок 1.2), а также создание иной противопожарной преграды (иного противопожарного барьера).

Рисунок 1.2 – Процесс создания минерализованной полосы специальной техникой

Такая технология создания противопожарной преграды в виде минерализованной полосы является относительно недорогой, не требует постоянного внимания, её главным недостатком является невозможность проведения работ при наличии препятствий (овраг, местность с неустойчивым грунтом, наличие на пути следования специальной техники молодой поросли деревьев).

Вопросами обеспечения пожарной безопасности и защиты населенных пунктов от воздействия ландшафтных (лесных) пожаров занимались С.В. Залесов, В.И. Козлачков, П.Н. Гоман, В.В. Абразумов, А.А. Кректунов, А.В. Волокитина, А.В. Подгрушный и многие др. Так, например, в работах [49, 55, 199] авторами рассматриваются вопросы обеспечения пожарной безопасности населенных пунктов путем создания эшелонированной обороны. В работе [49] предлагается

создание 150 метровой буферной зоны для борьбы с верховым пожаром, которая будет в себя включать каждые 50 метров создания минерализованной полосы шириной 1,4 м, за которой два раза в год осуществляется ее уход, а также создание лиственной опушки из березы повислой путем удаления хвойных деревьев. В то же время проведенные исследования [66, 67] показали, что точка зрения об эффективности противопожарных разрывов шириной от 20 – 50 до 300 метров для локализации верхового пожара являются неоднозначной, поскольку при подходе фронта пламени к автомобильным дорогам скорость распространения горения увеличивается в разы, в результате резкого увеличения скорости ветра противопожарные разрывы становятся подобны аэродинамическим трубам [49, 66, 169]. Искры разлетаются далеко вперед перед фронтом пламени, образуя новые очаги.

Защита населенных пунктов от пожара методом пуска встречного огня впервые была предложена А. Левизом [78] в XIX веке. Он предложил тушить верховой пожар другим верховым пожаром, который искусственно создавали. По мнению [18, 78] при встрече двух фронтов пожаров должно происходить их взаимное уничтожение. Н.П. Курбатский [68], А.В. Волокитина [17, 18], С.В. Гундар [43] заявляют, что одним из основных способов борьбы с лесными пожарами на сегодняшний день остается «встречный пал», «встречный отжиг» [18, 43, 78]. По мнению некоторых ученых [19, 43] существует мнение о том, что необходимо пересмотреть принцип тушения лесного пожара в пользу принципа пожароуправления, так как пожар в лесу, это своего рода естественный процесс, где сгорает часть верхнего слоя сухой подстилки, тем самым уменьшая пожарную нагрузку [145] и способствуя минимизации возникновения более серьезного пожара. Авторы утверждают, что отжиг остается на сегодняшний день одним из самых эффективных способов при локализации пожара, а если говорить о борьбе с верховым пожаром, то практически единственным, не задействуя при этом большого количества сил и средств. Опыт борьбы с ландшафтными пожарами зарубежных коллег во многим сопоставим с отечественным [16, 72]. По мнению

Р. Фишера и ряда других ученых [186, 193] одним из применяемых способов для создания мозаики отжигов раннего сезона и создания тем самым противопожарных полос в Австралии на сегодняшний день остается процедура сбрасывания с вертолетов воздушных поджигателей (зажигалок). Однако сам автор отмечает, что данный способ является не совсем эффективным вследствие достаточно хаотичного разлета зажигалок, тем самым, не производя должного эффекта.

Д. Кохен отмечает [183] подход в США превращать здания в неуязвимые объекты для природных пожаров, повышая их огнестойкость. Было замечено, что противопожарные службы по прибытию на место вызова не вмешивались в процесс борьбы с огнем, а давали возможность огню самостоятельно проходить между домами населенного пункта, принимая пассивный метод защиты. Подобный подход совершенно противоположен для России, поскольку в сельской населенной местности дома в основном возводят в деревянном исполнении.

В целях поиска информации о способах и методах, а также трудногорючих и негорючих материалах для защиты населенных пунктов от воздействия ландшафтных пожаров, установления действующих на территории Российской Федерации патентов, под действие которых попадает исследуемый объект, проведены патентные исследования в соответствии с государственным стандартом [31, 74]. Патентные исследования были проведены на патентную чистоту объекта по описаниям к свидетельствам, патентам и заявкам [103-107, 109, 111-112, 115-120,121,146]. Также проводился обзор иностранных патентных исследований [195-197]. Поиск проводился глубиною более 20 лет.

Наиболее близким техническим решением к предполагаемой противопожарной преграде [108] является изобретение [120], состоящее из металлического каркаса, с установленной через шайбы одинарной панелью.

Недостатком данного изобретения является его не высокая эффективность из-за применения металлической панели, способной разогреться до температуры воспламенения сухой травы за небольшой промежуток времени, тем самым привести к возгоранию с обратной стороны

панели. Изобретение авторов [120] целесообразно применять на горизонтально-ровных поверхностях, из-за отсутствия эластичности и невозможности изменения геометрической формы его невозможно использовать на склонах и на местности, где уровень поверхности земли имеет разные перепады высот. В особенности стоить отметить, что при использовании нескольких модулей, составленных способом «внахлест» возможно установить заграждение только по прямой линии, что полностью исключает возможность данного изобретения осуществить круговое ограждение защищаемого объекта.

Задачей полезной модели является расширение области применения быстровозводимой противопожарной преграды из композита для защиты от ландшафтных пожаров.

Технический результат полезной модели заключается в повышении эффективности быстрого возведения противопожарной преграды на основе композита и предотвращение распространения открытого горения по поверхности сухой подстилки путем своевременного перекрытия указанной преградой защищаемой территории, а также в повышенном удобстве использования, возможности ограждения больших территорий открытой местности, не доступных для проведения опашки, воспрепятствованием активному произрастанию травы в пространстве под защитным полотном вследствие затенения.

## 1.2 Трудногорючие материалы для ограничения распространения огня

В настоящее время существует довольно большое количество способов по ограничению распространения пожара (рисунок 1.4).

Рисунок 1.4 – Способы ограничения распространения пожара

В целях успешной и эффективной борьбы с огнем в настоящее время активно применяются и используются трудногорючие материалы [11, 25, 36, 80, 102, 174, 187].

Трудногорючие (трудносгораемые) – вещества и материалы, способные гореть в воздухе при воздействии источника зажигания, но не способные самостоятельно гореть после его удаления [25]. Повышение теплостойкости полимерных композиционных материалов показано в работе М.С. Лобановой [80]. Автор утверждает, что при сравнительно невысоких температурах (более 100°С) связующее начинает терять свои упругие свойства. Для того, чтобы добиться значительного повышения огнетеплозащитных свойств конструкций из стеклопластика, необходимо применение огнетеплозащитных покрытий.

В работе Е.А. Бондаревой [11] предлагается принципиально новая технология отличная от пенополиуретанов на основе латексов и стеклосфер, которые в свою очередь обладают высокими теплофизическими и физико-механическими характеристиками, а также обладают меньшей горючестью. В качестве выбора связующего автором были проведены исследования ряда полимерных латексов, из которых был выбран карбоксилированный латекс А-6000 и бутадиен–стирольный карбоксилированный латекс SB–278. В качестве наполнителя для данной технологии предполагались к исследованию стеклянные микрошарики. В качестве антипирена исследованию подлежала

карбамидоформальдегидная смола, которая в дополнение являлась усиливающей добавкой для латексов. Применение новых технологий на основе латексов, возможно, имеет потенциал в целях борьбы с ландшафтными пожарами. Однако для окончательной оценки их эффективности необходимо провести дополнительные огневые испытания. Важно учитывать экономические и экологические аспекты, чтобы обеспечить доступность и масштабируемость новых решений.

Формированию трудногорючих столярных плит посвящена работа В.М. Щербакова [175]. Автором решается проблема, связанная с заменой трудногорючей фанерной плиты, применяемой в вагоностроении и строительстве, поскольку ее существенным недостатком является высокая плотность (до 800-900 кг/м$^3$). Одним из путей решения нависшей проблемы является создание трудногорючей столярной плиты, обладающей меньшей плотностью и уменьшенной массы за счет снижения количества антипирена во внутреннем слое плиты. Использование трудногрючих столярных плит в качестве огнезащитного полотна для противопожарной преграды с целью защиты от ландшафтных пожаров является нецелесообразной из-за определенных габаритов таких плит, их особенностей поддерживать непродолжительное горение после удаления источника зажигания, что может способствовать распространению и переходу пламени за противопожарную преграду.

В трудах В.Ю. Чухланова [171] особое внимание уделяется строительным полимерным материалам, обладающих множеством полезных свойств, направленных на взаимную компенсацию неблагоприятных факторов. По мнению автора, таким связующим материалом является кремнийорганическое соединение вследствие устойчивости к перепадам температур, выпадающим осадкам, стойкости к воздействию радиации и так далее. Растущая потребность в таких материалах обусловлена прежде всего тем, что наблюдается тенденция увеличения темпов строительства зданий. Как следствие для строительной отрасли это имеет прямой интерес в создании защитных покрытий с целью дальней надеждой

эксплуатации и исключения преждевременного разрушения, а также повышению эффективности огнезащитных покрытий строительных материалов. Автором рассматривается кремнийорганическое соединение, как покрытие для повышения огнестойкости строительных материалов, используемых при строительстве зданий. Использование такого покрытия представляет перспективу для создания огнезащитного полотна противопожарной преграды, но только в комбинации с эластичным, легким и обладающим другими преимуществами материалом, способным сопротивляться открытому пламенному горению.

Обеспечение пожарной безопасности нефтегазового комплекса с помощью огнезащитного экрана представлено в работе [148]. В частности авторы В.Л. Страхов и С.В. Заикин предлагают новый способ, при котором существенно снижается воздействие теплового потока на объект защиты, а также повышение пределов огнестойкости защищаемого оборудования. Предлагаемый способ основан на создании ограждения по периметру защищаемого объекта или частичного ограждения на пути распространения огня в виде огнезащитного экрана, состоящего из пористых термостойких материалов и металлического каркаса в виде нержавеющих труб. При помощи пожарного рукава происходит подача воды в нижнее основание металлического каркаса через нижнюю соединительную полугайку, тем самым, как заявляют авторы, возможно повысить предел огнестойкости до шести часов. Предлагаемый авторами экран требует вовлечения в процесс монтажа и установки достаточно большого количества людей. Применение нержавеющих труб в каркасе способствует увеличению стоимости конструкции, а процесс подачи воды в нижнее основание каркаса технологически сложен и подразумевает под собой использование водопроводной сети или пожарного автомобиля.

О. Фридэй, С. Крамер предлагают применять в качестве противопожарных барьеров гипсокартон для обеспечения пожарной безопасности жилых зданий [187]. Для подтверждения своей гипотезы авторами проводились исследования в небольшой печи для измерения усадки, потери массы, прочности на изгиб, а также

модуля упругости. Испытание показало, что полное прокаливание образца гипсокартона происходило спустя 60 минут при температуре 400° С. После того, как наступало полное прокаливание, и вся влага испарялась, прочностной изгиб становился равен нулю. Остальные показатели демонстрировали аналогичную тенденцию.

В условиях лесных низовых пожаров с возрастающей скоростью распространения горения особую актуальность получили огнезащитные экраны на основе базальтоволоконной ткани [8]. При проектировании таких экранов необходимо было учитывать ряд технических требований: сравнительно малый вес, повышенная огнестойкость, возможность многократного применения, либо оперативная замена поврежденного участка, простота в использовании. Применение противопожарных преград в условиях развившихся лесных пожаров, на наш взгляд, является нецелесообразным. Верховые пожары имеют большую линейную скорость распространения горения, что ускоряет переход пламени на большие расстояния за небольшой промежуток времени. Установка преграды при лесных пожарах не несет в себе ценности по причине того, что пожар распространяется по кронам деревьев, а разлет искр при воздействии ветра осуществляется на расстояние до 300 метров. В условиях борьбы с ландшафтными пожарами при больших температурах во главу угла встает вопрос об обеспечении безопасности для личного состава подразделений пожарной охраны. Применение переносных огнезащитных экранов создают определенные затруднения [93], поэтому с целью защиты пожарных от открытого огня в экстремальных условиях были разработаны специальные накидки «пожарные одеяла» для коллективного и индивидуального использования в виде несгораемых укрытий [1]. На основании обзора существующих способов защиты было разработано пожарное одеяло «Fire Blanket», выполненное в виде плащ-палатки из керамоволокна с высокой отражательной способностью [1, 102]. Разработанные одеяла прежде всего направлены на увеличении времени работы пожарных в условиях воздействия

высоких температур при горении лесов за счет отражательной способности материала, что не является инновационным.

Труды ученых [16] посвящены созданию трудногорючего вибродемпфирующего материала на основе невысыхающего герметика. Данная разработка новой полимерной композиции основана на использовании нетоксичных антипиренов. Объектом исследования является бутилкаучук, полиэтилен и полиизобутилен, представляющие собой горючие вещества и имеющие общую углеводородную природу. В целях получения более термостойкого герметика авторами осуществлялась замена бутилкаучука на хлорбутилкаучук. Исходя из термогравиметрического и дифференциально-термического анализов бутилкаучука и хлорбутилкаучука наблюдался эффект при замене основного эластомера.

Исследование теплопроводности полимерных композиционных материалов сферопластика, как термоизолирующего материала приведено в работе [176]. Сам сферопластик представляет собой композиционный материал на основе полимерных связующих. Предлагаемые композиты достаточно успешно сочетают в себе низкую теплопроводность и плотность с большими механическими характеристиками, что нашло свое отражение в разных отраслях производства [176]. В настоящее время сферопластики активно рассматриваются в качестве перспективного материала для теплоизоляции технологического оборудования. Важным фактором является возможность данного материала работать в диапазоне температур от -196 … + 800-900°С (верхний предел соответствует стандартному температурному режиму развившегося пожара) [176].

Для проведения исследования были подготовлены образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с квадратными лицевыми гранями размером 100 х 100 мм. Толщина образцов варьировалась от 7 до 18 мм. Расчет коэффициента теплопроводности ($\lambda$) проводился вычислительным устройством по формуле (1) [176]

$$\lambda = \frac{H \cdot q}{T_{\text{н}} - T_x}, \qquad (1.1)$$

где $H$ – толщина измеряемого образца, мм;

$q$ – плотность стационарного теплового потока, проходящего через измеряемый образец, Вт/м$^2$;

$T_{\text{н}}$ – температура горячей грани измеряемого образца, К;

$T_x$ – температура холодной грани измеряемого образца, К.

Следовало ожидать, что рост концентрации микросфер приводит к снижению коэффициента теплопроводности [176].

Сравнительный экспериментальный анализ огнестойкости сэндвич – панелей с армированной стекловолоконной тканью проводили в работе [192] М. Мурило и других [71]. Данные панели представляют собой высокоэффективные системы, состоящие из двух граней, образованные высокопрочными листами. Облицовка панелей в основном изготавливается из стали, а в качестве сердцевины могут быть использованы такие материалы как полиуретан, минеральная вата, пенополистирол, полиизоцианурат. Авторы отмечают, что с точки зрения восприятия высокой температуры, полициизоцианурат имеет превосходство над полиуретаном. Другими материалами, применяемыми в качестве сердцевины, является один из старейших материалов - гипс, а также керамическая плита. Применение трудногорючих материалов в условиях пожара частично возможно, поскольку материал сохраняет свою целостную структуру. Однако нужно учитывать тот фактор, что при высокотемпературном воздействии происходит выгорание связующего материала, наступает его деструкция. Дальнейшее многократное тепловое воздействие и влияние влаги будут способствовать разрушению целостности структуры материалов, тем самым приводя их в негодность.

В настоящее время для снижения пожарной опасности применяемых материалов в области пожарной безопасности применяются различные виды и типы огнезащитных обработок. Согласно техническому регламенту [157] группы горючести материалов распределяются от слабогорючих (Г1) до сильногорючих (Г4) в зависимости от температуры дымовых газов и продолжительности

самостоятельного горения материала. По классификации Европейского союза [184] можно отметить различие в подходах градации к параметрам классификации и проведению испытаний [35, 151, 184]. При относительно небольшом источнике горения трудногорючие материалы не способны к самовоспламенению. Однако не стоит пренебрегать обработкой трудногорючих материалов специальными гелькоутами, поскольку при воздействии на материал различной плотности теплового потока от развившегося пожара до момента его локализации может наступить самовоспламенение материала.

Приведенные классификации трудногорючих материалов позволяют применять их в качестве барьера для ограничения распространения огня.

## 1.3 Обзор методов испытания трудногорючих материалов

Требования по пожарной безопасности строительных материалов и конструкций содержаться в [157]. В соответствии с указанными нормами в случаях применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) для них, как и для горючих материалов регламентируются требования к воспламеняемости, группе горючести, дымообразующей способности и так далее. К конструкциям, состоящих из трудногорючих материалов предъявляются дополнительные требования по огнестойкости и классу конструктивной пожарной опасности [20, 21].

Определение предела огнестойкости осуществляется в муфельных печах по государственному стандарту [95] и [96]. Исследования в области огневых испытаний для материалов из стали и железобетона проводились и проводятся довольно в большом количестве [20, 21]. Стальные материалы, как правило, испытываются без силового нагружения, но проводится контроль и учитывается температура защищаемых элементов, что допустимо в соответствии с техническим регламентом [157].

Методы испытания трудногорючих материалов исследовали Карлос Виегас, Дэвид Дж.С. Перейра, Мигель Р.О. Панао [198]. В качестве трудногорючего

материала для теплового барьера применялось стекловолокно, покрытое тонким слоем алюминия. В работе [202] говорится, что достаточно одного тонкого слоя алюминиевого покрытия для надежной защиты противопожарного барьера от высокого лучистого теплового потока пламени. С целью проверки работоспособности тепловой модели, предложенной авторами в работе [198], необходимо было провести натурные испытания стекловолокна покрытого тонким слоем алюминия с целью воспрепятствовать лучистому тепловому потоку, создаваемым тепловой пушкой. Для этого была собрана экспериментальная установка испытания материала стекловолокна, состоящая из тепловой пушки, создающая необходимый источник тепла, термопар типа К, которые в свою очередь устанавливаются и крепятся к лицевой и тыльным частям образца для фиксации тепловых характеристик поверхности стекловолокна. Дополнительно измерялась температура падающего горячего воздуха при помощи термопары в виде шарика диаметром 1 мм, расположенного на небольшом расстоянии от полотна. Алюминиевая конструкция, удерживающая тепловую пушку, устроена таким образом, что перед началом проведения испытания при помощи шарнира позволяет вывести ее из зоны действия теплового потока на полотно до момента, пока на выходе из тепловой пушки не будет создаваться нужная температура. Как только горячий воздух, выходящий из пушки, достигнет необходимой температуры, ее тут же опускают и направляют в зону полотна с постоянным воздействием теплового потока (рисунок 1.5) [198]. Авторами не раскрывается процесс соединения основы материала и алюминиевого покрытия, что является технологически сложным. Не рассмотрены вопросы адгезионных свойств покрытия и основы.

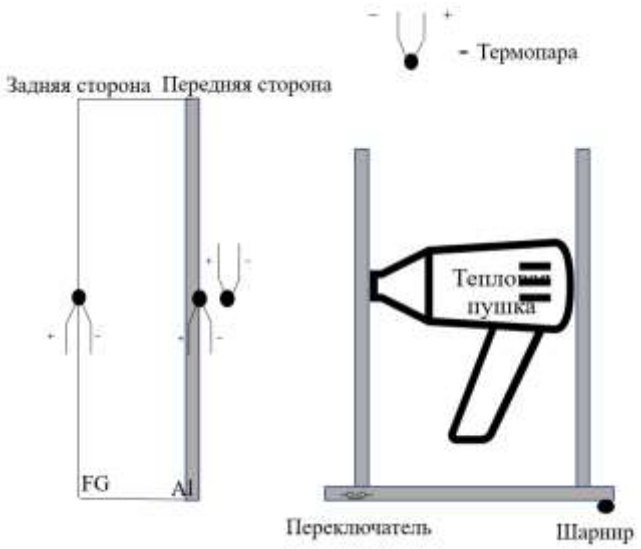



Рисунок 1.5 – Иллюстрация экспериментальной установки для испытания материала стекловолокна [198]

Испытаниям на огнестойкость стен из легкой стальной рамы (далее – LSF) посвящено исследование [200] австралийских ученых Ю. Тао и М. Махедрана из Квинслендского технологического университета. Стены из LSF играют большую роль в конструктивных элементах несущих стен из холодноформованной стали (далее – SHS). В последнее время растет потребность в улучшении теплоизоляционных качеств [56] и нередко изоляционные материалы, не отвечающие современным требованиям по пожарной безопасности, используются в стенах, что существенно снижает способность стен противостоять температурному нагреву со стороны открытого или скрытого горения [200]. Между тем, пожарная безопасность остается главным приоритетом при проектировании таких стен. Ранее проводимые исследования [181, 189, 190, 191] показали, что при использовании изолирующих материалов в полости стен снижается их огнестойкость.

В работе [181] было отмечено, что материалы для изоляции стен, такие как каменная вата, стекловата и другие снижают огнестойкость стен. Также сообщалось, что изоляция действует как тепловой барьер, повышая тем самым температуру стен [200]. Для решения данной задачи было проведено испытание

стен LSF с изолирующим материалом на основе аэрогеля, стеклопластика и силикагеля (таблица 1.2) [200].

Таблица 1.2 – Испытания на огнестойкость стен из LSF с изолирующим материалом [200]

| № испытания | Размеры стен | Стальной стержень | Изоляция | Количество слоев плиты |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,2 м x 1,2 м | 90 x 2,0 SHS (C 450) | Аэрогелевое покрытие | Один |
| 2 | 1,2 м x 1,2 м | 90 x 2,0 SHS (C 450) | Аэрогелевое покрытие | Два |
| 3 | 3,0 м x 3,0 м | 90 x 2,0 SHS (C 450) | Аэрогелевое покрытие | Один |

При испытании на огнестойкость было подготовлено три образца, 2 из которых размером 1,2 x 1,2 м и один размером 3,0 x 3,3 м. Во всех трех образцах применялись металлические шпильки с квадратным сечением из стали SHS. Ширина стальных стержневых стенок составила 90 мм при толщине 2 мм. Минимальный предел текучести составлял 450 МПа (класс C450). Элементы стержней изготавливались с использованием контактной электросварки. В качестве изоляции было выбрано стеклопластиковое покрытие из кремнеземного аэрогеля толщиной 10 мм. Образцы стен были облицованы одинарным или двойным слоем огнестойкого гипсокартона толщиной 16 мм, такие применяются, например, в Австралии для защиты от огня. По результатам проведенных испытаний авторы пришли к выводу, что стены, обработанные стеклопластиковым покрытием из кремнеземного аэрогеля, обладали хорошей термостойкостью. Применение данного покрытия между стальными опорами и облицовочной стороной гипсокартона долгое время удерживало повышение температуры [200].

В совместной работе [179] Египетских и ученых из Саудовской Аравии решается проблема повышения огнестойкости материалов полипропиленовых

блоков путем их облицовки. Сам по себе блок является пустотным с размерами 0,2 х 0,6 х 0,05 м. В качестве облицовочного материала применяется гипсокартон размером 3,0 х1,2 х 0,95 м, плита из каменной ваты 1,2 х 0,6 х 0,05 м, а также п – образный профиль, являющийся скелетом собираемой установки. Для заполняющей изоляции применяется слой из керамического волокна плотностью 128 кг/м$^3$.

Эксперимент по определению огнестойкости испытательной установки (с размерами 1,2 м-ширина, 1,8 м-высота) с тестируемым облицовочным покрытием проходил в соответствие с [194]. Испытуемая стеновая сборная конструкция с данными размерами является типичной, что подтверждается ранее опубликованным исследованием [182]. Испытуемый образец подвергался воздействию открытого пламенного горения, создаваемый шестью дизельными горелками, которые располагались на стенах вертикальной печи (рисунок 1.6) [179].

а б

Рисунок 1.6 – Фотографии испытательной печи [179]

а – горелки с левой стороны стены; б – горелки с правой стороны стены

Температура воздействия открытого пламенного горения во время эксперимента контролировалась в соответствии со стандартным соотношением температуры и времени, соответствующих горению целлюлозных материалов при пожаре в помещениях (таблица 1.3) [179].

Таблица 1.3 – Стандартное соотношение температуры и времени [179, 194]

| Время (мин.) | 5 | 10 | 30 | 60 | 120 | 240 | 480 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Температура печи (℃) | 538 | 704 | 843 | 927 | 1010 | 1093 | 1260 |

Оценка теплоизоляционных свойств проводилась по показаниям термопар для неэкспонированной поверхности согласно критериям [194], максимальное повышение температуры должно быть не менее или равное 181℃ для каждой термопары или 139℃ в среднем для обеих термопар, в зависимости, что наступит раньше. Проведенные исследования зарубежных авторов с огнестойкими материалами в основном находят свое применение в возможности повышения способности зданий сопротивляться высокотемпературному воздействию продолжительное время, тем самым обеспечивая ограничение распространение пожара до приезда пожарных подразделений и способствуя эвакуации людей. Однако применение рассматриваемых материалов в контексте обеспечения пожарной безопасности населенных пунктов от воздействия ландшафтных пожаров на открытой местности нецелесообразно, а в ряде случаев невозможно по причине того, что, как правило, предлагаемые материалы имеют высокую теплопроводность, что будет провоцировать распространение огня за пределы преграды. Фиксированные геометрические параметры исключают возможность применения таких материалов на различных рельефах местности, поскольку огонь может проникнуть в местах неплотного прилегания огнезащитного материала к поверхности земли.

Богданова В.В. и другие авторы в работе [9] проводили исследования влияния системы заглушителей горения, в частности полимерных пен (пенополиуретан) (далее – ППУ) для ограничения распространения и тушения пожаров в кабельных шахтах гражданских зданий. Для оценки огнетушащей и изолирующей эффективности ППУ было проведено исследование при тушении лабораторного очага пожара классов А и В. Испытания проводили по разработанной методике на основании Системы стандартов пожарной безопасности [139] с соблюдением практически идентичных условий: образцы

брусков уменьшали в 2 раза по сравнению с брусками, описанными в [139], но при сохранении их количества. Также был уменьшен размер противня с сохранением соотношения воды и горючей жидкости. По результатам испытания фиксировались данные о количестве израсходованного ППУ. Целесообразность использования полимерных пен возникает в замкнутых пространствах, где существует возможность объемного воздействия на источник горения за счет его обволакивания и исключения поступления кислорода. Со временем пена начинает разрушаться, что повлечет за собой необходимость повторного и неоднократного ее дальнейшего применения. Себестоимость материала и затраты на проведение работ авторами не рассматриваются, что не дает провести сравнительную оценку по отношению к средствам предотвращения распространения ландшафтного пожара.

Изучение микромеханических влажностных деформаций, возникающих в ПКМ, рассмотрено в [44]. Для изготовления образца применялась биаксильная стеклоткань. Как отмечают авторы, в результате экспериментов зафиксированы деформации набухания в разных слоях образцов. Влияние влаги негативно отражается на огнезащитных качествах стеклоткани, а также способствует увеличению теплопроводности материала. Воздействие диоксида углерода ускоряет рост дефектов в зонах механического воздействия на полотно и его крепления к опорным рамам в условиях ограничения распространения ландшафтного пожара.

Подводя итог стоит, отметить, что основным достоинством трудногорючего материала стеклопластика является его способность противостоять открытому горению стандартного ландшафтного пожара, однако при высоких температурах трудногорючий стеклопластик способен воспламеняться и поддерживать горение, что может способствовать переходу огня за противопожарную преграду и последующее развитие пожара.

## 1.4 Обзор математических методов расчета теплопроводности противопожарной преграды

Теоретические основы моделирования процесса интенсивного теплового воздействия на материалы отражены в теории теплопереноса, которая в свою очередь совмещает в себе взаимосвязь технических характеристик изделия и высокотемпературного источника [74]. Больших достижений в изучении данной области достигли А.В. Лыков, С.В. Федосов, Ю.А. Михайлов, В.А. Зайцев, А.А. Лазарев и другим ученым [74, 81-86]. Многообразие разных факторов и протекающих процессов свидетельствуют о необходимости прибегать к упрощенным моделям [53, 97]. На сегодняшний день все теплофизические характеристики определяются при помощи большого количества методов. В свою очередь все методы можно разделить на две группы: стационарные и нестационарные методы [53, 81-86]. Постоянство в течение времени температурных полей представляет основу стационарных методов, и как следствие их можно отнести к наиболее простым [46].

Идея определения теплофизических характеристик в условиях изменения температуры во временных интервалах лежит в основании следующей группы методов. Численные моделирования пожаров и последствия от них нашли свое отражение в трудах Н.Н. Брушлинского, Н.П. Копылова, Ю.А. Кошмарова, В.Л. Страхова, А.Н. Баратова, С.В. Пузач, Б. Сполдинг, Г. Эльбе, Д. Перейра и другие [2, 46, 60-61, 126, 147, 177-178, 198].

Рассмотрим несколько методов при помощи которых можно решить задачи теплопереноса в твердом теле (композиционный материал):

- метод интегрального теплового баланса;
- метод моментов;
- методы Ритца, Био;
- метод алгебраических (интегральных) подстановок, метод последовательных приближений (линеаризации), метод возмущений и другие [74].

Метод Фурье (методы распределения переменных), метод Грина (метод источников функций), методы Лапласа, Фурье, Ханкеля (методы интегральных преобразований) [4, 53, 74, 97].

У всех представленных методов есть ряд своих достоинств и недостатков. Так, например, при помощи метода Фурье можно описать неравномерное начальное распределение температур и линейные условия. Данное решение представляет собой собственные функции бесконечного ряда [74].

С.В. Федосов, А.Б. Иванов, А. Тамир и другие отмечают основные подходы в решении неоднородных уравнений теплопроводности при изменении плотности распределения источника тепловой энергии по определяющей координате в течение времени и предпочтительность моделей ячеек, которые в свою очередь базируются на основе теории цепей Маркова и связаны матрицами переходных вероятностей [46, 50, 55, 74, 88, 163, 165].

Модель процесса теплопередачи огнезащитного барьера из стекловолокна рассматривал Д. Перейра и другие авторы в работе [198]. В качестве материала, принимающего тепловой поток, использовалось стекловолокно, покрытое тонким слоем алюминия с лицевой стороны с целью отражения большей части теплового потока от фронта пламени.

В данном случае при всех упрощениях уравнение теплопроводности выглядит следующим образом (1.2) [198]:

$$\frac{\partial T_{ƒ\,g}(z,t)}{\partial t} = a_{ƒ\,g}\frac{\partial^2 T_{ƒ\,g}(z,t)}{\partial z^2}, \qquad (1.2)$$

где $a_{ƒ\,g}$ – коэффициент температуропроводности, м$^2$/с.,

$\frac{\partial T_{ƒ\,g}(z,t)}{\partial t}$ – первая производная функции $T_{ƒ\,g}$ по переменной $t$.,

$\frac{\partial^2 T_{ƒ\,g}(z,t)}{\partial z^2}$ – вторая производная функции $T_{ƒ\,g}$ по переменной $z$.

Предполагается, что противопожарный барьер изначально находится в состояние температурного режима окружающей среды при $z = 0$ и $z = \delta_{ғ\,g}$.

Начальное состояние [198]:

$$T_{ғ\,g}(z,t) \;=\; T_{\infty} \tag{1.3}$$

Граничное условие [198]:

$$z = \;0{:}\, K_{ғ\,g}\frac{\partial T_{ғ\,g}(z,t)}{\partial z}\,|z = 0 = h\,(T_{ғ\,g}(0,t) \;-\; T_{\infty} \tag{1.4}$$

Граничное условие [198]:

$$z = \;\delta_{ғ\,g}{:}\, T_{ғ\,g}(\delta_{ғ\,g},t) \;=\; T_{Al} \tag{1.5}$$

Нанесенный алюминиевый слой достаточно тонкий и обладает сам по себе высокой теплопроводностью [198], поэтому предполагается, что алюминиевый слой не способен длительное время подвергаться изменению температурного режима, описываемый как $T_p(\delta_{ғ\,g} \le z \le \delta_{ғ\,g} + \delta_{Al,t}) \;=\; T_{Al(t)}$.

Для того чтобы общий тепловой поток был связан с излучением пламени и конвекцией применяется формула (1.6) [198]:

$$\delta_{Al}\mathrm{c}_{Al}\rho_{Al}\frac{\partial T_{Al}(z,t)}{\partial t} = q_{a,(r+c)}(t) \;-\; K_{ғ\,g}\;\frac{\partial T_{ғ\,g}(z,t)}{\partial z}\;\big|z = \delta_{ғ\,g} \tag{1.6}$$

Используя условие (1.5) и подставив в формулу (1.6), получаем уравнение (1.7), так как после изменения условий, граничное условие на лицевой стороне огнезащитного барьера становится равным $z = \delta_{ғ\,g}$[198]:

$$K_{ғ\,g}\;\frac{\partial T_{ғ\,g}(z,t)}{\partial z}\;\Big|z = \delta_{ғ\,g}\; = q_{a,(r+c)}(t) \;-\; \delta_{Al}\mathrm{c}_{Al}\rho_{Al}\frac{\partial T_{ғ\,g}(z,t)}{\partial z}\;\big|z = \delta_{ғ\,g} \tag{1.7}$$

Процесс нанесения тонкого слоя алюминия требует определенных физических и экономических затрат, а сама модель теплопередачи не учитывает свойства материала и отсутствия возможности провести расчет по слоям материала.

В работах [39-40] рассматриваются математические модели переходов и развития лесного пожара из низового в верховой. Попытки математического моделирования также предпринимались в работах [13, 37]. В источнике [13] для описания процесса перехода применяется уравнение теории струй и на основе этого рассчитывается время и условия, при которых происходит загорание крон деревьев. Недостаток данного процесса заключается в неверном предположение о моментальном формировании струи над очагом низового пожара [40]. В работе [37] указанный недостаток был частично устранен, но в то же время было высказано предположение об изобарности процесса [40].

В источнике [41] подробно описана конструкция для проведения эксперимента, с помощью которой определяется тепловой поток. В процессе проведения каждого эксперимента [40-41] на осциллографе фиксировалась величина $q_{\Sigma}$.

Модель тепломассопереноса трансформируемой противопожарной преграды повышенной эффективности рассматривалась С.В. Заикиным [47]. Математическая модель строится на основе теории массопереноса. Как отмечено автором, отличительной особенностью является введение некоторых допущений, существенно не влияющих и не затрагивающих огнестойкость физических процессов [47]. Согласно упомянутым допущениям в работе, краевая задача тепломассопереноса сводится к двум совместно решаемым задачам в координатах $\xi$ - $\eta$. Дифференциальное уравнение, описывающие тепломассоперенос в толщине сухого слоя огнестойкого полотна принимает вид:

$$\frac{d}{d\xi}\left(\lambda_{\Sigma}\ \frac{dT}{d\xi}\right) \dot{m}_v c_p \frac{dT}{d\xi} = 0 \qquad (1.8)$$

где: $\dot{m}_v$ – массовая скорость испарения воды;

$\xi_d$ – координата фронта испарения;

$c_p$ – теплоемкость пара;

$T$ – температура.

В.Ю. Шимко в работе [173] рассматривал механизм теплопереноса в противопожарной преграде теплозащитного сетчатого экрана для защиты объектов нефтегазового комплекса. Для расчета прогрева строительной конструкции от теплового излучения применяется уравнение лучистого теплообмена [173]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] \psi_{21} \quad (1.9)$$

где: $q$ – плотность лучистого теплового потока, падающего на поверхность конструкции, Вт/м$^2$;

$T_{\text{н}}$ – температура излучающей поверхности, К;

$T_{\text{пов}}$ – температура на облучаемой поверхности конструкции, К;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы;

$c_0$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,7 Вт (м$^2$ К$^4$);

$\psi_{21}$ – коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями.

В работе [23] приводится методика расчета пространственно - временных параметров противопожарного барьера лесных низовых пожаров. В частности автор поднимает проблему о недостаточной эффективности применяемых противопожарных барьеров в виде минерализованных полос, которые в свою очередь имеют ширину 1,4-2,8 метра, поскольку это определяется в основном техническими характеристиками специальной техники при их создании, а не научно обоснованным подходом [23]. В случае неэффективности минерализованной полосы происходит переход огня на отдельных участках, что приводит к увеличению площадей горения сухой травы.

Как правило, в весеннее и летнее время года в особо засушливый период на отдельных участках территории концентрируется большое количество пожарной нагрузки в виде сухой травянистой растительности, что способствует образованию

достаточно большого теплового потока [23]. В сложившихся условиях противопожарная преграда в виде минерализованной полосы становится не совсем эффективна и требуется найти иной подход к решению существующей проблемы.

В основу разработки методики расчета ширины минерализованных полос легли результаты исследования распределения теплового потока от источников выделения тепла и экспериментальные исследования [23, 143, 144].

Для установления зависимости между влажностью материала и критической плотностью лучистого теплового потока записывается уравнение (1.10) [23, 54]:

$$q = \frac{-C_1}{1 + e^{0,1w-2}} + C_2, \ (10 \leq w \leq 300), \qquad (1.10)$$

где $C_1$ и $C_2$ – коэффициенты равные 34 кВт/м$^2$ и 45 кВт/м$^2$;

$w$ – влажность материала, %;

$q$ – плотность теплового потока, кВт/м$^2$;

$e$ – экспонента (число Эйлера).

Отмечено, что с увеличением влажности материала с 10 до 50 %, необходимая для воспламенения материала тепловая нагрузка растет. Минимальный тепловой поток для материала с высоким содержанием влажности составляет 45 кВт/м$^2$. Однако также отмечено, что чем выше влажность материала, тем больше требуется времени на его воспламенение [23].

В случае установления закономерности распределения плотности теплового потока от расстояния фронта пламени позволила прийти к зависимости (1.11), определенной по пункту 1.1 методики [144]:

$$L = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{q-B_1}{B_2}}} + A_2, \ q \leq 40 \text{ кВт/м2} \qquad (1.11)$$

где $A_1, A_2, B_1, B_2$, - коэффициенты, зависящие от высоты факела пламени (h, м) приведенной в (таблице 1.4);

$q$ – плотность теплового потока, кВт/м$^2$;

$e$ – экспонента (число Эйлера).

Таблица 1.4 – Коэффициенты, для выражения (1.11) [23]

| h, м | $A_1$, м | $A_2$, м | $B_1$, м | $B_2$, м |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 51,06 | 0,58 | -16,03 | 9,14 |
| 1,5 | 88,02 | - 0,09 | - 33,77 | 14,96 |
| 2 | 40,79 | - 1,27 | - 26,41 | 21,10 |
| 2,5 | 46,81 | - 4,37 | - 39,99 | 35,04 |
| 3 | 32,05 | - 13,72 | - 6,03 | 56,91 |

Согласно публикации [54] для выявления зависимости времени воспламенения $t$, с, от влажности материала $w$, % записывается выражение (1.12) [23]:

$$t = A_0 \frac{w^2}{q^4}, \quad (1.12)$$

где $A_0$ – коэффициент равный 1,2 * $10^7$с / ( кВт/м$^2$)$^4$;

$w$ – влажность материала, %;

$q$ – плотность теплового потока, кВт/м$^2$.

## 1.5 Выводы по 1 главе

На основании проведенного литературного обзора можно сделать выводы:

1. Одним из актуальных путей решения проблемы создания минерализованных полос в труднодоступных участках (территориях) для защиты от низовых ландшафтных пожаров можно считать разработку новых устройств (конструкций), содержащих в себе огнестойкий композиционный материал. Предлагаемая конструкция должна совместить в себе несколько важных качеств, таких как: (уникальность, простота исполнения и мобильность, экономическая выгода).

2. Проблема создания минерализованных полос в труднодоступных территориях (участках местности) при защите населенных пунктов от низовых ландшафтных пожаров не теряет своей актуальности. Разработка новых устройств

(противопожарных преград) с использованием композиционных материалов, обладающих высокими показателями эксплуатационных качеств и защитных свойств, является приоритетной задачей в области обеспечения пожарной безопасности.

## 1.6 Постановка задач

В настоящее время вопрос совершенствования обеспечения пожарной безопасности в целях борьбы с ландшафтными пожарами требует повышенного внимания. Существующие способы и методы защиты от ландшафтных пожаров при обеспечении пожарной безопасности, как правило, не предполагают под собой создания определенных конструкций.

В качестве защиты населенного пункта или лесного массива служит минерализованная полоса [124], создаваемая специальной техникой. Не достаточная эффективность и в ряде случаев невозможность ее создания, вызывает необходимость поиска новых способов для ограничения распространения ландшафтного пожара путем создания противопожарной преграды из негорючих или трудногорючих материалов.

В настоящее время методы испытаний трудногорючих и негорючих материалов, которые могли бы быть использованы и применены для создания противопожарной преграды и защиты от ландшафтного пожара отсутствуют. В связи с чем существенно возникает потребность в разработке новых методов испытаний данного материала. Проведенный литературный поиск показал отсутствие в научном сообществе однозначного представления о противопожарной преграде с целью защиты от низовых ландшафтных пожаров, что указывает на необходимость проведения более углубленного и детального изучения данного вопроса.

Таким образом, эксплуатационные характеристики применяемого трудногорючего и негорючего материала при создании противопожарной преграды

с одной стороны определяются способностью противостоять воздействию на них окружающей среды в виде дождя, снега, солнечных лучей, перепада температур, а с другой – способностью противостоять открытому пламенному горению сухой растительности.

С учетом изложенного выше, основными задачами диссертационной работы являются:

1. Разработать методы стендовых и огневых испытаний устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара.

2. Разработать технические средства для предотвращения распространения ландшафтного пожара, использование которых составляет основу предложенного способа защиты.

3. Создать новый композиционный материал на основе стеклоткани с кремнийорганическим соединением.

4. Разработать математическую модель процесса теплопереноса при тепловом воздействии на устройство для предотвращения распространения ландшафтного пожара, учитывающую температуру распространения в слоях предложенного материала.

5. Провести оценку защитной способности разработанного устройства по сдерживанию огневого воздействия ландшафтного пожара.

6. Оценить эффективность затрат на установку устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара в сравнении традиционными методами (выжигание сухой травы, очистка от ветровала).

# ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 2.1 Используемые материалы и изделия

Стеклопластик. Для изготовления противопожарной преграды в качестве огнезащитного полотна применяется трудногорючий стеклопластик марки РСТ – 250 производства ООО «ЕЗИМ» (Екатеринбургский завод изоляционных материалов), Свердловская область, г. Екатеринбург [131].

Стеклопластик рулонный представляет собой упругий материал, основой которого является стеклоткань, выполненная в виде переплетенных между собой тонких нитей. В роли связующего выступают различные фенол - формальдегидные смолы. Технические характеристики стеклопластика соответствуют техническим условиям (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Технические характеристики стеклопластика РСТ – 250

| Марка | Ширина, см | Номинальная плотность, г/м$^2$ | Пропиточный состав | Цвет / колор материала |
|---|---|---|---|---|
| РСТ – 250 | 100 | 250 | Ф | оттенки желтого |

Физико-механические свойства стеклопластика марки РСТ – 250 определены в таблице 2.2 [125].

Таблица 2.2 – Физико-механические свойства РСТ – 250

| Физико-механические свойства | Показатели |
|---|---|
| Номинальная плотность, г/м$^2$ | 250 |
| Разрушающее напряжение при растяжении, МН/ м$^2$ | 410-1180 |
| Модуль упругости при растяжении, ГПа | 21-41 |
| Предел прочности при изгибе, МН/ м$^2$ | 690-1240 |
| Коэффициент линейного расширения, 10 – 6 °С $^{-1}$ | 5-14 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/ м$^2$·К | 0,3-0,35 |

Труба профильная стальная. Для изготовления конструкции стальной опоры используется углеродистая сталь Ст3 по ГОСТ 380 – 2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки» [29, 74]. Результаты химического анализа стали представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Анализ химического состава примесей в стали [29]

| Результаты химического анализа, % | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe | C | Ni | Cu | Cr | Mn | Si | As | S | P |
| 97 | 0,14-0,22 | не более 0,3 | не более 0,3 | не более 0,3 | 0,4-0, 65 | 0,05-0,17 | менее 0,08 | не более 0,05 | менее 0,04 |

Основные характеристики трубы профильной показаны в таблице 2.4 [28].

Таблица 2.4 – Размеры и основные характеристики 1 м трубы [28, стр. 25]

| Размеры трубы, м | | | Радиус скругливания углов, R | Площадь поперечного сечения F, м$^2$ | Масса 1 м трубы, кг |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| 0,02 | 0,01 | 0,0015 | 0,0023 | 0,0077 | 0,606 |

Сено. Для создания тестового очага пожара применялась зеленая масса травы, выкошенная с 1 м$^2$ площади и высушенная при температуре 27°С с влажностью не более 17% по [101].

Хомут (металлическая стяжка). С целью фиксации огнезащитного полотна со стойками стальных опор, применяется одновинтовый, одноэлементный хомут из нержавеющей стали марки А2 / AISI 304 производства КНР.

Тепловизор. Для определения температуры тыльной стороны огнезащитного полотна при проведении огневых испытаний применяется тепловизор testo 875 – 2i, страна производитель Германия. Основные характеристики прибора представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные характеристики тепловизора

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Температурный диапазон | - 20°С до +650°С |
| Погрешность | ± 2 °С (от – 20 до + 100 °С)<br>± 2 % (свыше 100 до 350 °С)<br>± 3 % (свыше 350 до 650 °С) |
| Спектральный диапазон | от 8 до 14 мкм |
| Угол поля зрения | 32° × 23° 9° × 7°<br>(телеобъектив) |
| Температурная чувствительность при 30 °С, не более | 0,05°С |
| Электропитание | Аккумуляторная батарея 5 В |
| Габаритные размеры Д×Ш×В, мм | 152 × 108 × 262 |
| Масса с аккумулятором | 0,9 кг |
| Температура эксплуатации | от – 15 до + 40 °С |
| Температура хранения | от – 30 до + 60 °С |
| Относительная влажность | от 20 до 80 % |

Анемометр. Для измерения скорости воздуха при проведении огневых испытаний на открытом пространстве использовался анемометр портативный акустический АПА – 1/3, произведенный в России. Основные технические характеристики прибора представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные технические характеристики АПА – 1/3

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Измерение мгновенного и усредненного значения скорости воздушного потока, м/с | от 0,05 до 30,0 |
| Информация о наличии движения воздушного потока в диапазоне, м/с | от 0,00 до 0,04 |
| Расчет мгновенного и усредненного значения скорости воздушного потока, мин | от 0,017 до 15 |
| Индикация скорости воздушного потока, м/с | от 0,00 до 0,04 |

| | |
|---|---|
| Погрешность измерения в диапазоне скоростей от 0,05 до 30 м/с | не более ± 0,05 |
| Питание от 4 аккумуляторов типоразмера AAA, напряжение, В | от 3,7 до 5,9 |
| Масса, г | 900 ± 50 |

Генератор ветра. В целях создания условий близких к реальным при горении сохой травянистой растительности в условиях воздействия постоянных воздушных потоков применялась установка STAGE 4 PASSAT 120 DMX, производства КНР. Характеристики генератора ветра представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Основные технические характеристики

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Мощность, Вт | 120 |
| Производительность, $м^3$/мин | 30 |
| Регулировка угла воздушного потока | 0-360 |
| Габариты, мм | 350x422x131 |
| Вес, г | 8500 |

Установка для испытаний на воспламеняемость. Для исследования воздействия теплового потока на материал была проведена серия стендовых испытаний.

Установка состоит из следующих основных частей:

- подвижная платформа;

- опорная станина;

- система зажигания (вспомогательная стационарная горелка, подвижная горелка с механизированной и ручной системой перемещения);

- источник лучистого теплового потока (радиационная панель) [27].

В состав вспомогательного оборудования входят: экранирующая пластина, держатель образца, держатель с образцом-имитатором, система регулирования расхода газовоздушной смеси, измеритель теплового потока, регулирующий и

регистрирующие приборы, регистратор времени [27]. Общий вид установки представлен на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 – Испытательная установка для определения воспламеняемости строительных материалов [27]

Измеритель – регулятор микропроцессорный двухканальный. Для определения температуры термочувствительного элемента тыльной стороны испытуемого материала использовался двухканальный измеритель – регулятор 2 ТРМ 1. Основные характеристики измерителя – регулятора приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Основные характеристики измерителя – регулятора 2 ТРМ 1

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Диапазон переменного напряжения питания:<br>напряжение, В<br>частота, Гц | <br>90…245<br>47…63 |
| Потребляемая мощность, ВА, не более | 7 |
| Максимально допустимый ток встроенного источника питания, мА | 80 |

| | |
|---|---|
| Количество каналов | 2 |
| Время опроса входа:<br>термометры сопротивления, мин;<br>термоэлектрические преобразователи и унифицированные сигналы постоянного напряжения тока, мин;<br>унифицированные сигналы постоянного напряжения и тока в приборах с конструктивным исполнением Щ 11, мин | не более 0,013<br>не более 0,0067<br>не более 0,0017 |

Измеритель плотности теплового потока. Для измерения величины плотности теплового потока тыльной стороны огнезащитного полотна применялся измеритель плотности теплового потока (далее – ИПП – 2). Характеристики данного прибора представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Основные характеристики прибора ИПП – 2

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Проверка: | прибор не поверяется |
| Диапазон измерений: | от 10 до 9999 Вт/м2 (плотность теплового потока), от -60 до +1200°С (температура) |
| Единицы измерения: | Вт/м2, °С |
| Выходные сигналы: | RS-232 (для связи с ПК) |
| Индикация: | цифровая, световая, звуковая |
| Температура: | от -20 до 50°С |
| Объем памяти: | 10000 измерений |
| Питание: | от 2-х батарей типа ААА, напряжением 2,2-2,8 В |
| Габаритные размеры: | 130х70х25 мм |
| Масса: | 0,2 кг |

Огнеупорная пена. Для восстановления поврежденных участков огнезащитного полотна из трудногорючего стеклопластика в результате огневого

воздействия применялась огнеупорная пена Penosil Premium, произведенная в России. Основные параметры и характеристики приведены в таблице 2.10 [137].

Таблица 2.10 – Основные параметры и характеристики пены [137]

| Наименование параметров и характеристик | Значение параметров и характеристик |
|---|---|
| Внешний вид | непрозрачное однородное эластичное окрашенное вещество без механических включений |
| Цвет | розовый |
| Запах | характерный запах отсутствует |
| Относительная плотность, кг/м$^3$ при 20 °С | 25-30 |
| Адгезия, тест на разрыв Н/см$^2$ | 11 |
| Время полного затвердевания, ч при 23 °С | 18 |
| Относительное увеличение объема при затвердевании, % | 200-250 |
| Температуростойкость, °С | от – 50 до + 110 |
| Растворимость в воде | нет |
| Растворимость в ацетоне | высокая |

В таблице 2.11 указан химический состав огнеупорной пены Penosil Premium [137].

Таблица 2.11 – Основные параметры и характеристики пены [137]

| Наименование материала | Расход материала, г на 1 кг герметика | Процентное содержание материала, % |
|---|---|---|
| Дифенилметандиизоцианат | 250-375 | 35-50 |
| Пропан | 15-45 | 2-6 |
| Изобутан | 35-90 | 5-12 |

| | | |
|---|---|---|
| Диметилэфир | 15-45 | 2-6 |
| 1,1,1,2 – тетрафторэтан | 0-45 | 0-6 |
| 1,1 - дифотрэтан | 0-45 | 0-6 |
| Полиэтокси – пропокси – ди – и триолы | 75-225 | 10-30 |
| Трихлоризопропил фосфат | 0-75 | 0-10 |
| Хлорированные парафины | 0-190 | 0-25 |

Для равномерного нанесения огнеупорной пены на поверхность поврежденных образцов использовался металлический строительный шпатель.

Алюминиевая фольга. Для восстановления поврежденных участков образцов также применялась алюминиевая фольга, соответствующая требованиям ГОСТа [30].

Микрометр МК 0-25 мм. Для определения толщины композиционного материала применялся микрометр. При проведении стендовых испытаний огнеупорная пена равномерно наносилась на поврежденные поверхности образцов. Толщина защитного слоя измерялась при помощи микрометра. Основные характеристики данного прибора приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.12 – Основные технические характеристики микрометра

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Верхний предел измерений, мм | 25 |
| Цена деления, мм | 0,01 |

## 2.2 Краткое описание применяемых экспериментальных методов

С целью изучения свойств трудногорючего стеклопластика (РСТ – 250) необходимо провести экспериментальные исследования физических свойств данного материала в различных условиях, в том числе при проведении огневых испытаний в условиях с различными тестовыми очагами и в условиях ветровой нагрузки. С помощью тепловизора произвести измерение температуры на тыльной

стороне трудногорючего стеклопластика на разных временных отрезках, а также определить значения плотности теплового потока. В условиях стендовых испытаний произвести измерение температуры на тыльной стороне образцов при различной плотности теплового потока, при восстановлении поврежденных участков посредством модификации поверхности образцов огнеупорной пеной и алюминиевой фольгой, а также нанесением на поверхность стеклоткани кремнийорганического соединения.

Также с целью исследования образца огнестойкого полотна из композиционного материала от воздействия теплового потока проведены стендовые и огневые испытания по установлению коэффициента защиты в случае применения огнезащитного полотна. Более подробно процесс исследования описан в (приложении 3).

### 2.2.1 Определение горючих веществ и материалов для создания тестового очага пожара

Стандартный ландшафтный пожар включает в себя горение разнообразных горючих материалов, находящихся как на поверхности земли, так и под ней. Важным фактором при таком пожаре является его локация, поскольку в каждой определенной местности сосредоточен горючий материал с менее или более пожароопасными свойствами и температурой самовоспламенения. Так, например, для центральной части России характерны практически все виды растительных трав, а для регионов тундры растительность практически отсутствует. Помимо травы горению подвергаются упавшие ветки деревьев, мох, камыш и иные материалы, встречающиеся на пути огня. В связи с проработкой данного вопроса нами предусматриваются тестовые очаги пожара в различных своих исполнениях.

### 2.2.2 Стендовые испытания материалов

Для определения температуры на тыльной стороне образцов в результате воздействия тепловых потоков различной плотности необходимо провести серии стендовых испытаний с целью установления зависимости изменения температуры в образцах материалов от продолжительности времени нагрева и потери массы. Воздействие теплового потока определенной плотности осуществляется в течение 10 минут. Указанный временной интервал принят в соответствии с [76]. При этом условия исследования должны отличаться в зависимости от создаваемой испытательной установкой плотности теплового потока и способа восстановления поврежденных участков образцов посредством их модификации. Измерение осуществляется двухканальным измерителем – регулятором 2 ТРМ 1 (далее – ИР) с тыльной стороны образцов через технологическое отверстие испытательной установки. Более подробно методика проведения стендовых испытаний будет описана в 4.1.

### 2.2.3 Метод огневых испытаний материалов

При проведении испытаний используются разные варианты тестовых очагов пожара. В целях создания условий близких к реальным в условиях воздействия постоянных воздушных потоков применяется установка STAGE 4 PASSAT 120 DMX. Для измерения скорости воздуха при проведении огневых испытаний на открытом пространстве используется анемометр портативный акустический АПА – 1/3. Для условий 1-3 тестовый очаг (далее – ТОП – 1) разрабатывается на основе ГОСТа Р 53325 – 2012 [32]. В условиях 4-8 применяется тестовый очаг в виде распространяющегося фронта пламени (далее – ТОП – 2) со средней величиной тепловыделения 8 кВт/м$^2$ (приложение 4), данный вид тестового очага нашел свое отражение в работах [57-59, 89, 180, 188, 201]. В условии 7 огневому испытанию подлежит огнезащитное полотно, выполненное из стеклоткани и нанесенной на ее поверхность

кремнийорганического соединения. В условии 8 исследуется огнезащитное двухскатное полотно, выполненное из стеклоткани и нанесенной на ее поверхность кремнийорганического соединения. С целью определения температурного значения на тыльной стороне 1-го ската огнезащитного двухскатного полотна предполагается нанесение термоиндикаторного покрытия в виде краски LA-CO Tempilaq Advaced в результате быстрого высокотемпературного нагрева. Для определения значения температуры применяется цифровой фотоаппарат в соответствии со стандартами Color Hexa, предусматривающий использование шестизначного кода, предоставляющего информацию о цветах, полученного изображения [162].

Для создания ТОП – 1 используется решетчатое основание размерами 0,5×0,5×0,005 м (рисунок 2.2.).

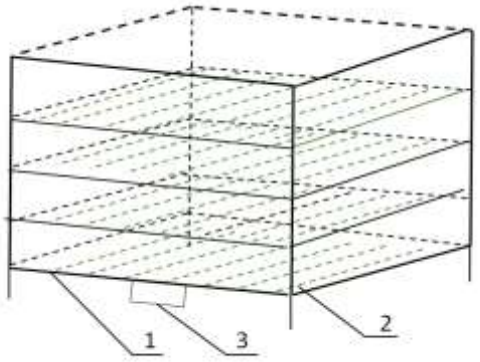



Рисунок 2.2 – Общий вид ТОП – 1:
1 – стальное решетчатое основание; 2 – горючий материал; 3 – емкость [76]

В целях имитации ландшафтного пожара на указанное основание равномерно раскладывается горючая нагрузка в 7 слоев, влажность которой составляет W = 17 % по ОСТ 10243-2000 [76, 101].

В качестве источника воспламенения горючего материала служат 5 мл бензина АИ – 92, налитого в емкость диаметром 0,05 м, которая устанавливается в центре основания ТОП – 1 [76].

Цель данного исследования заключается в определении способности огнезащитного полотна трудногорючего стеклопластика и композиционного материала в течение 8 минут противостоять открытому пламенному горению сухой травянистой растительности ландшафтного пожара, а также в определении максимальной температуры на тыльной стороне полотна, создаваемой открытым пламенным горением и плотностью теплового потока. В рамках проведения огневых испытаний планируется установить динамику изменения температуры от открытого огня [74]. При помощи открытого источника зажигания осуществляется поджигание горючего материала ТОП – 1. В этот момент включается секундомер и начинается проведение эксперимента.

Перед началом проведения испытаний трудногорючий стеклопластик на люверсах при помощи хомутов закрепляется под углом 30° к ТОП – 1 на стальной подставке [108].

Во время испытаний температура с тыльной стороны материала контролируется тепловизором каждые 30 с. (рисунок 2.3) [76]. Более подробно методика проведения огневых испытаний с разными тестовыми очагами будет описана в 4.2.

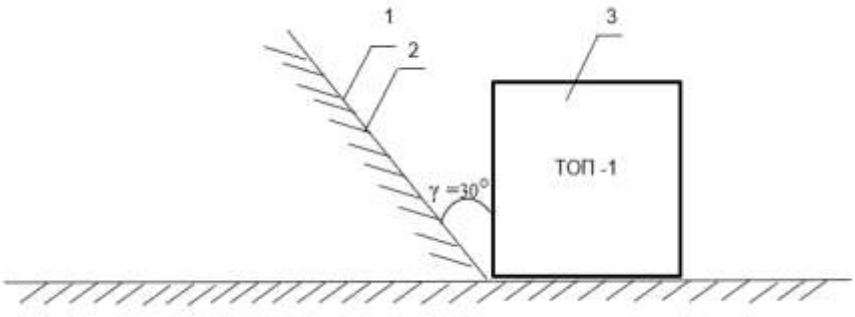



Рисунок 2.3 – Установка для проведения огневых испытаний [76]:
1 – испытуемые образцы; 2 – стальная подставка; 3 – ТОП – 1

## 2.3 Выводы по 2 главе

1. На основании поставленных задач были подобраны методы для осуществления и проведения экспериментальных исследований трудногорючего

стеклопластика и композиционного материала, а также изучены физические и химические характеристики данного материала и элементов, входящих в его состав.

2. Определены необходимые для проведения экспериментов контрольно-измерительные приборы и оборудование, описаны и приведены их технические характеристики.

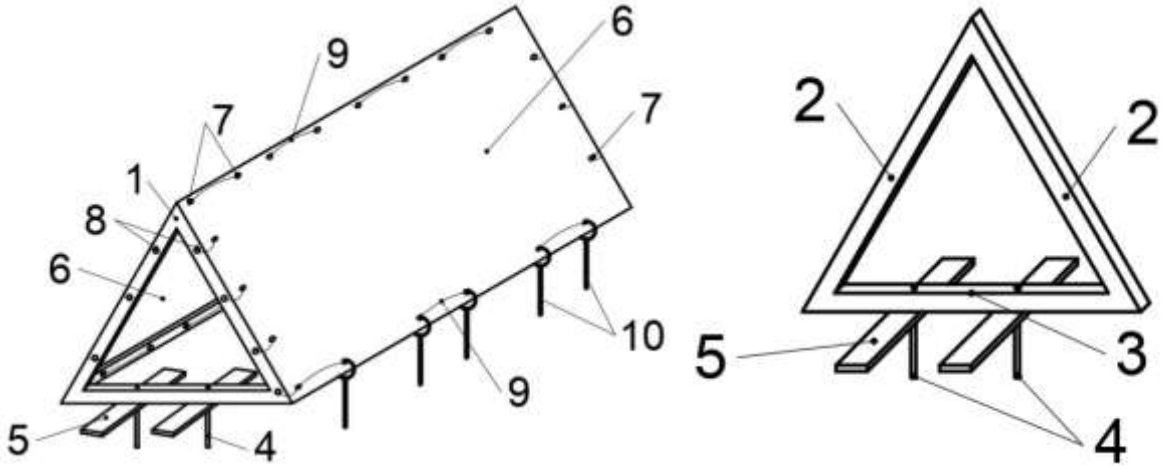
3. Составлен план проведения эксперимента, определены эксплуатационные параметры, подлежащие исследованию, установлены критические значения данных параметров.

# ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРОТИВОПОЖАРНУЮ ПРЕГРАДУ

## 3.1 Разработка конструкции быстровозводимой противопожарной преграды для защиты от ландшафтных пожаров

В настоящее время широкую известность получили противопожарные преграды различного исполнения в помещениях внутри зданий и сооружений. Наиболее встречающимися примерами в качестве таких преград являются стены помещений, огнепреградительные щиты и иные передвижные перегородки [196]. Самыми распространенными факторами пожара являются высокая температура пламени, искры, тепловой поток [157].

Учитывая опасные факторы пожара, которым подвергаются преграды, предоставляется возможность высказать предположение о целесообразности применения противопожарных преград в условиях открытых пространств для борьбы с ландшафтными пожарами. Наиболее приемлемая и применимая конструкция должна быть быстровозводимой, иметь сравнительно небольшой вес и простоту использования, а учитывая высокую температуру сгораемых веществ, основой преграды должен быть материал с низкой теплопроводностью (рисунок 3.1).




а) б)

Рисунок 3.1 – Противопожарная преграда: а) общий вид предлагаемой конструкции, б) общий вид торцевой части конструкции. Обозначения: 1 – опорная рама, 2 – боковые стороны опорной рамы, 3 – основание опорной рамы, 4 – почвозацепы, 5 – опоры, 6 – огнестойкий элемент (композит), 7 – крепления (люверсы), 8 – соединительные элементы (хомут), 9 – стальной трос, 10 – дополнительные почвозацепы [108, 110].

Противопожарная преграда [108, 110] устанавливается в местах, где отсутствует возможность подъезда специальной техники для создания минерализованной полосы по направлению встречного движения фронта пламенного горения сухой травянистой растительности. Для установки предполагаемого устройства достаточно одного-двух человек. При обнаружении пожара на начальных стадиях его развития, его локализуют методом «охвата», устанавливая при этом заградительную систему используя устройства как модули по периметру пожара. Однако если время упущено – параллельно движущейся кромке пожара на безопасном для человека расстоянии. Применение огнестойкого элемента длиной до 3 м, при одновременном использовании нескольких заявляемых устройств в качестве модулей единого заграждения, позволяет быстро возводить заграждения значительной протяженности.

Предлагаемая конструкция для предотвращения распространения ландшафтного пожара позволяет оперативно создавать противопожарный разрыв, который не позволит низовому ландшафтному пожару перейти за заграждение. Наличие в конструкции опорной рамы почвозацепов и горизонтальных опор, позволяет увеличить устойчивость заграждения. Высота конструкции противопожарной преграды принималась исходя из средней высоты сухой травянистой растительности, преобладающей в лесостепной зоне и зоне широколиственных лесов преимущественно к региону, в котором выполнялась работа. Средняя высота растений составляет порядка 35-50 см [100]. При создании конструкции устройства необходимо также учитывать высоту факела пламени, возникающего при горении сухой травы, которая рассчитывается по [94].

Применение двух огнезащитных элементов и их взаимное расположение на опорных рамах под углом 30° существенно снижает воздействие ветрового усилия на конструкцию. Использование двухскатного огнезащитного полотна способствует локализации и возможности самопроизвольного гашения огня, препятствует росту травы под противопожарной преградой, а также исключает фактор размыва песка и пескосоляной смеси выпадающими осадками в виде дождя.

Предложенная конструкция противопожарной преграды позволяет решить ряд стоящих перед ней задач: возникает представление о том как должен выглядеть иной противопожарный барьер в условиях осуществления борьбы с ландшафтными пожарами; позволяет найти решение проблемы прокладки минерализованной полосы на участках местности, где отсутствуют подъездные пути для специальной техники, учитывая сравнительно небольшие габариты и малый вес; отсутствует необходимость вовлечения в процесс установки большого количества людей. Конструктивное исполнение противопожарной преграды, а также применение предложенных материалов, позволяет исключить проведение дополнительных монтажных работ по разборке конструкции в период ее не использования, тем самым нахождение преграды на защищаемой местности при необходимости может осуществляется круглогодично, однако для этого нужно будет учитывать такие факторы как: кража, порча и т.п. Положительные качества указанной преграды для предотвращения распространения ландшафтного пожара с целью

обнаружения значительного количества тепла пожара могут быть оценены в условиях проведения испытаний при проведении эксперимента по распространению температур при воздействии тепловых потоков.

Основным элементом конструкции является огнезащитное полотно из композиционного материала, выполненное из стеклоткани с нанесенным на ее поверхность кремнийорганическим соединением «Цельсит – 900». Данный материал имеет ряд положительных качеств, таких как: низкая теплопроводность, высокие прочностные характеристики и гибкость, устойчивость к химическим веществам, на сгибах не образует трещин. Композиционные материалы при воздействии влаги имеют высокие влагостойкие свойства. Кремнийорганическое покрытие не взаимодействует с водой, и даже при длительном намокании материал не размягчается, не разлагается и не теряет прочности. Применение противопожарной преграды в полевых условиях предполагает загрязнение огнезащитного полотна. Однако композиционные материалы могут проявлять фотокаталитическую активность, что позволяет им самоочищаться. При солнечном свете очистка осуществляется благодаря фотокаталитическому разложению органических загрязнителей и их удалению без разводов с поверхности [129]. В настоящее время выбор огнезащитных материалов разнообразен. Необходимо учитывать специфику и точечно подходить к выбору материала в зависимости от того какую задачу он должен решать. Так, например, базальтовая ткань менее эластична по отношению к рассматриваемому материалу, что исключает возможности ее применения в условиях открытой местности, где присутствуют территории, на которых устанавливаются противопожарные преграды, имеющие разнообразный рельеф местности (перепады высот). Второй фактор, на который необходимо обратить внимание это высокая стоимость материала базальтовой ткани за 1м$^2$, которая превышает стоимость композита в три раза. Применение в чистом виде материала стеклоткань ввиду своего строения является ненадежным и обладает рядом недостатков, в том числе разрушение структуры материала в зоне дефектов (порезы, отверстия и т.д.). Со временем материал проявляет статическую усталость волокон, обусловленную влиянием влаги и диоксида углерода, которые ускоряют рост дефектов [140]. С целью

минимизировать данный эффект, придать поверхностную прочность материалу, было принято решение обработать стеклоткань с двух сторон кремнийорганическим соединением, в результате чего огнезащитный материал рассматривается как трехслойный.

На формирование структуры и свойств стеклянных волокон большое влияние оказывает тепловое прошлое материала. Многократное воздействие открытого источника горения усиливает его разнородную структуру, что влечет за собой изменение физико-химических свойств волокон [141]. В этой связи представляется целесообразным изучение процесса теплопереноса в слоях материала. Наиболее предпочтительным является метод «микропроцессов», предложенный С.В. Федосовым. Данный метод сочетает в себе преимущества аналитических и численных методов математического анализа [63].

## 3.2 Математическая модель определения динамики распространения температуры в противопожарной преграде для защиты от низовых ландшафтных пожаров

Применение предложенного в разделе 3.1 варианта конструкции противопожарной преграды из композиционного материала предполагает исследование характеристик нестационарных температур, распространяющихся в слоях материала. В связи с чем возникает необходимость в разработке и применении достоверных математических моделей процесса теплопереноса в указанной материале.

Большинство технологических процессов изготовления материалов включают в себя термическую обработку твердых тел [12, 53, 72, 76, 85, 99, 128, 161, 163, 166, 167]. Аналогичные процессы протекают при пожарах на открытой местности. Из этого следует, что подходы к разработке математических моделей технологических процессов могут быть использованы при разработке технических средств противопожарной защиты. В рамках проводимого исследования представляется решение краевых задач нестационарного теплопереноса [72].

Анализ литературных источников показал отсутствие научных работ по многослойным материалам в условиях быстрого прогрева, что подразумевает под собой разработку математической модели, которая бы учитывала данный критерий при низовых ландшафтных пожарах.

Для получения полной картины динамики распространения температур в слоях материала применяется метод «микропроцессов», как было сказано ранее [4]. Сущность метода заключается в распределении процесса теплопереноса на несколько элементарных микропроцессов, позволяющих свести нелинейную задачу теплопереноса к нескольким линейным, но связанным между собой задачам. В этих условиях решение каждой автономной, но связанной между собой задачами может быть получено численно-аналитическим методом. Однако распределение температуры, рассчитанное для предыдущего «микропроцесса», является начальным для решения задачи теплопереноса последующего слоя [4].

Физическая картина процесса воздействия ландшафтного пожара на материал может быть представлена на рисунке 3.2. Расчет процесса теплопереноса в слоях материала проводился на примере композиционного материала стеклоткани с кремнийорганическим соединением.

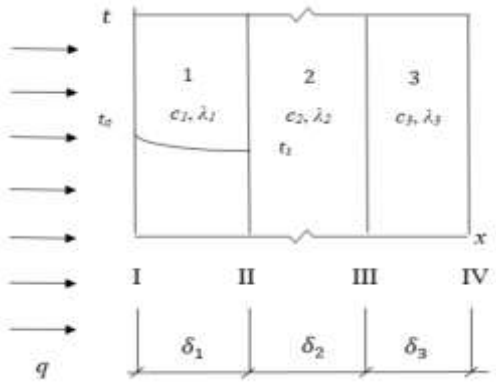



Рисунок 3.2 - Процесс воздействия пламени на материал: $q$ – плотность теплового потока (от очага), кВт/м$^2$; 1,2,3 – слои материала; I, II, III, IV – границы слоев; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщина слоя 0,06 мм; $c$, $\lambda$ – теплоемкость, Дж/(кг·°С), теплопроводность, Вт/(м·К)

Здесь трехслойное полотно композиционного материала (1,3-слой кремнийорганическое соединение; 2-слой стеклоткани) находится в стационарном положении. Распределение температур имеет следующий вид: $t_1(x_1,0) = t_2(x_2,0) = t_3(x_3,0) = t_0$.

В момент времени $\tau$=0 в результате ландшафтного пожара с левой стороны на материал воздействует плотность теплового потока q (кВт/м$^2$). Под влиянием этого потока первый слой (покрытие) начинает прогреваться. При этом второй слой (стеклоткань), а также третий (покрытие) остаются с температурой $t_0$. При достижении тепловой волной границы первого и второго слоев в месте стыка данных слоев возникает граничное условие четвертого рода. После этого момента будет происходить дальнейшее проникновение температуры в материал. Второй слой имеет температуру $t_0$ до того момента, как тепловая волна дойдет до места, где стыкуются первый и второй слой. И так далее. Слой 3 граничит с воздушной средой [72].

Общая задача делится на три автономные, но связанные между собой задачи, в каждой из которых придется определить теплоперенос между слоями материала.

Задача 1. Теплоперенос в первом слое с граничными условиями третьего рода, которые учитывают конвективный обмен на границе I, и первого рода, которые характеризуют постоянство температуры на границе II первого и второго слоев.

Задача 2. Теплоперенос в слое 2 с граничными условиями второго рода, которые характеризуют постоянство плотности теплового потока через границу II, и первого рода, характеризующие постоянство температуры на границе III.

Задача 3. Температура в слое 3 с граничными условиями второго рода на границе III и граничными условиями первого рода, которые характеризуют теплообмен между поверхностью слоя три на границе IV с окружающей средой.

Далее рассмотрим задачу 1 для внешнего слоя материала. Подходы к постановке данной задачи будут существенным образом отличаться от подходов к определению теплопереноса между остальными слоями композита.

Математическая задача теплопроводности для первого слоя может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2};\ (0 \le x \le\ \delta_1); \qquad (3.1.3)$$

Начальное условие: $$t(x,0) = t_0(x) \qquad (3.1.4)$$

Граничные условия: $$-\lambda\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x} = \alpha_{\text{эф}}[t_{\text{пож.}} - t(0,\tau)]; \qquad (3.1.5)$$

$$t(\delta,\tau) = t_{\delta;} \qquad (3.1.6)$$

Решение подобной задачи описано в монографии [163]. При этом для решения краевой задачи теплопереноса в неограниченной пластине при неравномерном начальном распределении температур получено выражение (3.1.7):

$$T(\bar{x},Fo) = \ \mathrm{T}_\delta\left(\frac{Bi\bar{x}+1}{Bi+1}\right) - 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{Bi\ sin\mu_n(\bar{x}\ -\ 1)}{Bi + cos^2\mu_n}\exp(-{\mu_n}^2 Fo)\times$$

$$\times\left[\int_0^1 \mathrm{T}_0\,(\xi)sin(\mu_n(1\ -\ \xi))d\xi\ -\ \frac{\mathrm{T}_\delta}{\mu_n}\right] \qquad (3.1.7)$$

где $Fo$ – число Фурье, $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$; $Bi$ - число Био, $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$;. $\bar{x}$ – заданная координата, $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$; $\alpha_{\text{эф.}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи за счет излучения и конвекции, Вт/(м$^2$·К), $t_{\text{пож.}}$ - температура излучающего агента пожара, К, $\mu_{\text{n}}$, $\xi$ – дополнительные переменные, $a$ – коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), $\delta$ – толщина слоя, м: $\mathrm{T}_0$, $\mathrm{T}_\delta$ – безразмерные температуры на внешней поверхности и по толщине слоя, $\tau$ – время [72, 76].

Данное выражение (3.1.7) необходимо преобразовать для внешнего слоя материала. Рассчитаем интеграл для уравнения (3.1.7):

$$J = \int_0^1 \mathrm{T}_0\,(\xi)sin(\mu_n(1\ -\ \xi))d\xi \qquad (3.1.8)$$

Определим начальное значение температуры:

$$\mathrm{T}_0(\xi) = \mathrm{T}_0 \tag{3.1.9}$$

Проинтегрировав уравнение (3.1.8), получим:

$$J = \int_0^1 \mathrm{T}_0\,(\xi) sin\,\frac{(\mu_n(1\,-\,\xi)d\xi}{\mu_n} \;\; = \;\frac{1}{\mu_n}\int_0^1 \mathrm{T}_0\, sin\;(\mu_n - \mu_n\xi)d(\mu_n\xi\,) \tag{3.1.10}$$

$$sin\;(\mu_n - \mu_n\xi) = sin\,\mu_n\,.\;cos\,(\mu_n\xi)\;-\;cos\,(\mu_n.sin\,(\mu_n\xi) \tag{3.1.11}$$

$$\frac{\mathrm{T}_0}{\mu_n}|[sin\,\mu_n\,.\;sin\,\mu_n\;-\;cos\mu_n.cos\mu_n + cos(\mu_n)]|\;\;=$$

$$\frac{\mathrm{T}_0}{\mu_n}[sin\,\mu_n\,.\;sin\,\mu_n\;-\;cos\mu_n.cos\mu_n + cos(\mu_n)]\;\;=$$

$$=\;\;\frac{\mathrm{T}_0}{\mu_n}[sin^2\,\mu_n\;-\;cos^2\mu_n + cos\mu_n] \tag{3.1.12}$$

Проведем оценочный расчет значения Био для первого слоя [72, 163] по формуле (3.1.13):

$$\mathrm{T}_\delta(\bar{x}, Fo) = \frac{T-T_\delta}{T_\delta};\; \bar{x} = \frac{x}{\delta};\;\; Fo = \frac{a\tau}{\delta^2};\;\; Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda}. \tag{3.1.13}$$

С целью определения коэффициента теплоотдачи применим формулу для определения критерия Нуссельта для вертикальной пластины [52, 70]:

$$Nu = 0{,}55(\mathrm{Ar}\cdot\mathrm{Pr})^{0{,}25}, \tag{3.1.14}$$

где Ar, Pr– соответственно критерии Архимеда и Прандтля.

$$Ar = \frac{g\,L^3\Delta\rho}{\rho_\mathrm{c}\nu^2}. \tag{3.1.15}$$

где $g$- ускорение свободного падения, 9,81 м/с$^2$, $L$ –характерный размер, м, Δρ – разность плотности среды ($\rho_\mathrm{c}$) и тела, кг/м$^3$, ν – кинематическая вязкость среды, м$^2$/с.

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \tag{3.1.16}$$

где $\nu$ – кинематическая вязкость среды, м$^2$/с, $a$ – коэффициент температуропроводности, $\frac{м^2}{с}$; для воздуха: $Pr \approx 0{,}72$.

По формулам (3.1.15) и (3.1.16) рассчитаем критерий Архимеда для внешнего слоя с характерным размером $L_1$:

$$Ar = \frac{9{,}81 \cdot 1^{\,3}(1800 - 0{,}946)}{0{,}946(1{,}93 * 10^{-5})^2} = 5 \cdot 10^{13} \qquad (3.1.17)$$

С учетом [70] при отклонении поверхности от вертикали на 30° [76] рассчитаем эффективное число Архимеда для внешнего слоя, а также критерий Нуссельта:

$$Ar_{1,эфф} = 5 \cdot 10^{13} \cdot \cos 30° = \ 4{,}33 \cdot 10^{13} \qquad (3.1.18)$$

$$Nu_1 = 0{,}55(4{,}33 \cdot 10^{13} \cdot 0{,}72)^{0{,}25} = 1300{,}2 \qquad (3.1.19)$$

Критерий Нуссельта также рассчитывается по формуле [70]:

$$Nu = \frac{\alpha\, l}{\lambda_c}\,, \qquad (3.1.20)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м·К), $l$ – характерный размер, $\lambda_c$ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К), определяем по справочным данным [70, 72].

Отсюда получим:

$$\alpha = \frac{Nu\ \lambda_c}{l} \qquad (3.1.21)$$

С учетом (3.1.18) рассчитываем $\alpha_1$ для первого слоя с характерным размером $L_1$:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_c}{L_1} \ = \ \frac{1300{,}2 \cdot 0{,}024}{1} = 31{,}2\ Вт/(м \cdot К) \qquad (3.1.22)$$

Теперь по формуле (3.1.13) определяем значение Био для 1-го слоя $Bi_1$:

$$Bi_1 = \ \frac{31{,}2 \cdot 0{,}00006}{0{,}024} = 0{,}078 \qquad (3.1.23)$$

Для удобства с учетом преобразований (3.1.12), оценочных расчетов (3.1.13) - (3.1.20) запишем полученное выражение:

$$T(\bar{x}, Fo) = \mathrm{T}_\delta\left(\frac{Bi\bar{x}+1}{Bi+1}\right) - 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{Bi\, sin\mu_n(\bar{x}\ -\ 1)}{Bi + cos^2\mu_n}\exp(-{\mu_n}^2 Fo)\times \\ \times\left[\frac{\mathrm{T}_0}{\mu_n}[sin^2\,\mu_n\ -\ cos^2\mu_n + cos\mu_n]\ -\ \frac{\mathrm{T}_\delta}{\mu_n}\right] \quad (3.1.24)$$

Оценим значение числа Фурье для 1-го слоя (покрытие толщиной 0,06 мм) [3], [52]:

$$Fo = \frac{\alpha_1\tau}{\delta_1^2} = \frac{\frac{\lambda_1}{c_1\rho_1}\tau}{(0{,}06\cdot 10^{-3})^2} = \frac{1{,}499\cdot 10^{-7}\cdot\tau}{(0{,}06\cdot 10^{-3})^2} = 41{,}6\cdot\tau \quad (3.1.25)$$

Проведем расчет безразмерной температуры при числе Фурье *Fo* = 0,05 в 1-м слое для того, чтобы определить достигает ли тепловой профиль 2-й слой.

Значение числа $Fo$ выбирается методом последовательных приближений (итерации).

Для значения числа Фурье определим число членов ряда на основании условия 3.1.26 [14]:

$$\pi^2 n^2 Fo \geq 8 \Rightarrow n \geq \sqrt{\frac{8}{\pi^2\cdot Fo}} = \sqrt{\frac{8}{3{,}14^2\cdot 0{,}05}}\ \approx 5 \quad (3.1.26)$$

Для вычисления второго слагаемого в выражении (3.1.24), с учетом большого числа членов ряда, воспользуемся приложением для математических вычислений SMath Studio.

Результаты расчета представлены в таблице 3.1. Аппроксимацию температуры по толщине проводили в программе MS Excel путем построения графика распределения температуры в толщине материала с построением линии тренда. Распределение температуры в 1-м слое показано на рисунке 3.3.

Таблица 3.1 – Результаты расчета безразмерной и размерной температуры при числе Фурье $Fo$ = 0,05

| $\bar{x}$ | $T_\delta(\bar{x}, Fo)$ | T, °C | Уравнение аппроксимации $T$(x) = |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,0006 | 20,24 | $0{,}011x^2 - 0{,}017x + 0{,}006$ |
| 0,25 | 0,0003 | 20,12 | |
| 0,5 | 0,0001 | 20,04 | |
| 0,75 | 0,0000 | 20,00 | |
| 1 | 0,0000 | 20,00 | |

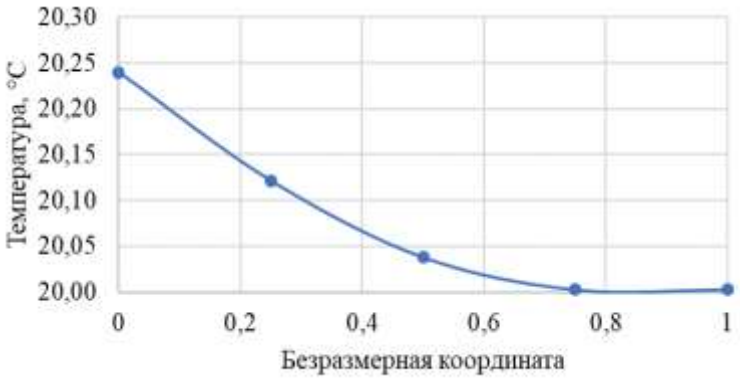



Рисунок 3.3 – Распределение температуры в 1 - м слое по безразмерной координате при $Fo$ = 0,05

Тепловой профиль температуры не доходит до границы слоя, необходимо провести дальнейшее моделирование до значения времени, когда тепловой профиль дойдет до границы следующего слоя. Для этого проведем расчет безразмерной температуры при числе Фурье $Fo$ = 0,2 с учетом уравнения, представленном в таблице 3.1. Результаты расчета сведем в таблицу 3.2. Распределение температуры в первом слое показано на рисунке 3.4.

Таблица 3.2 – Результаты расчета безразмерной и размерной температуры при числе Фурье $Fo$ = 0,2

| $\bar{x}$ | $T_\delta(\bar{x}, Fo)$ | T, °C | Уравнение аппроксимации $T$(x) = |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,0013 | 20,52 | $0{,}030x^2 - 0{,}045x + 0{,}017$ |
| 0,25 | 0,0009 | 20,36 | |
| 0,5 | 0,0005 | 20,19 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 0,75 | 0,0002 | 20,08 | |
| 1 | 0,0001 | 20,04 | |

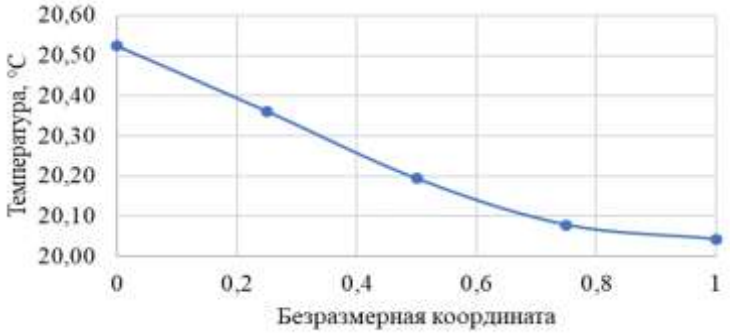



Рисунок 3.4 – Распределение температуры в 1-м слое по безразмерной координате при $Fo$ = 0,2

Температурный профиль достиг 2-го слоя (рисунок 3.4), что позволяет определить тепловой поток за счет разницы температур. Тепловой поток, направленный во второй слой материала, будет составлять $q_S$ = 1,17 Вт/м$^2$ при $Fo$ = 0,2.

В работе Федосова С.В. и др. [72] решалась задача процесса теплопереноса в первом слое (кремнийорганическом покрытии). В данной работе требуется решить задачу по определению распространения температуры в слое стеклоткани.

Процесс воздействия ландшафтного пожара на материал может быть представлен на рисунке 3.5. [77].

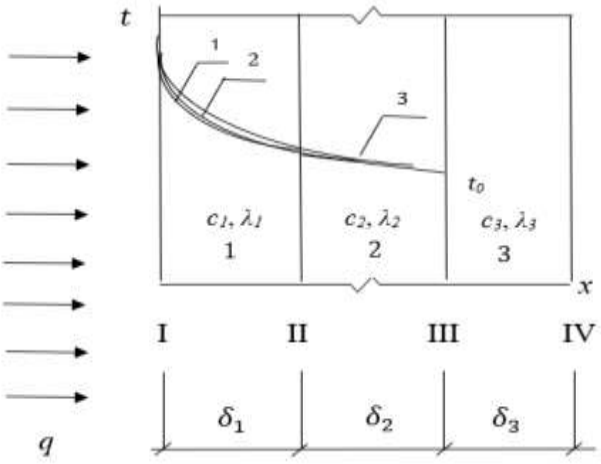



Рисунок 3.5 – Процесс распространения температур: $q$ – плотность теплового потока (от очага), кВт/м$^2$; 1,2,3 – слои материала; I, II, III, IV – границы слоев, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщина слоя 0,06 мм; $c$, – теплоемкость, Дж/(кг·°С, $\lambda$ – теплопроводность, Вт/(м·К)

Рассматриваемый второй слой (стеклоткань) и третий слой (кремнийорганическое покрытие) имеют температуру $t_0$. В момент времени $\tau_1$* (кривая 1) тепловая волна достигает границы второго и третьего слоев, и в этом месте стыка данных появляется граничное условие четвертого рода [77, 163]:

$$grad{\cdot}t\ (\delta_1, \tau_1\ *) = -\lambda \frac{\partial t_1(\delta_1, \tau_1 *)}{\partial x} \qquad (3.1.27)$$

Затем будет происходить дальнейшее распространение температуры в материал, как показывают кривые 2 и 3 [77, 163]. Температура третьего слоя остается при температуре $t_0$ до момента времени $\tau_2$* (кривая 2), как тепловая волна дойдет до места, где стыкуются второй и третий слой [77]. И так далее. Как уже упоминалось выше, общая задача состоит из трех автономных. Решение 1 задачи было рассмотрено в публикации [72].

Далее предлагается решить задачу 2.

Задача 2. Теплоперенос в слое 2 с граничными условиями второго рода, которые характеризуют постоянство плотности теплового потока через границу II, и первого рода, характеризующие постоянство температуры на границе III.

Известно, что для решения краевой задачи при неравномерном распределении температур используется выражение [74, 77, 163]:

$$T(\bar{x}, Fo) = K_i \left[ (1 - \bar{x}) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8\, cos(\mu_n \bar{x})}{\pi^2 n^2} \exp\left( -\frac{\pi^2 n^2}{4} Fo \right) \right] +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} 2\, cos(\mu_n \bar{x}) \exp\left( -\frac{\pi^2 n^2}{4} Fo \right) \int_0^1 \mathrm{T}_0(\xi) cos(\mu_n \xi) d\xi, \qquad (3.1.28)$$

где $K_i = \frac{q_S \delta_2}{\lambda_2 t}$ –Критерий Кирпичева.

Рассчитаем интеграл для уравнения (3.1.28) для внутреннего слоя стеклоткани [77, 163]:

$$J = \int_0^1 \mathrm{T}_0(\xi) cos(\mu_n \xi) d\xi \qquad (3.1.29)$$

Начальное значение температуры:

$$\mathrm{T}_0(\xi) = \mathrm{T}_0 \qquad (3.1.30)$$

Отсюда получаем [78]:

$$J = \int_0^1 \mathrm{T}_0\, cos\ (\mu_n \xi)\ \frac{1}{\mu_n}\ d(\mu_n \xi) = \frac{\mathrm{T}_0}{\mu_n} \int_0^1 cos(\mu_n \xi) d(\mu_n \xi) = \frac{\mathrm{T}_0}{\mu_n}$$

$$[sin\ (\mu_n \xi)] \quad |_0^1 = \frac{\mathrm{T}_0}{\mu_n} [sin\ (\mu_n \xi)] \quad |_{\xi=1} - sin\ (\mu_n \xi) \quad |_{\xi=0} \quad ] = 0 \qquad (3.1.31)$$

С учетом уравнений (3.1.28) и (3.1.31) начальное распределение температур для слоя стеклоткани представлено выражением [74]:

$$T(\bar{x}, Fo) = K_i \left[ (1 - \bar{x}) - \sum_{n=1}^{3} \frac{8\, cos(\mu_n \bar{x})}{\pi^2 n^2} \exp\left( -\frac{\pi^2 n^2}{4} Fo \right) \right] \qquad (3.1.32)$$

Рассчитаем значения безразмерных коэффициентов для 2-го слоя:

$$Ki = \frac{q_S \delta_2}{\lambda_2 t} = \frac{1{,}17 \cdot 0{,}00006}{0{,}21 \cdot 20} = 1{,}67 \cdot 10^{-5}; \quad (3.1.33)$$

$$Fo = \frac{\alpha_2 \tau}{\delta_2^2} = \frac{\frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}\tau}{(0{,}06 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{\frac{0{,}04}{840 \cdot 1800}\tau}{(0{,}06 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{0{,}26 \cdot 10^{-7} \cdot \tau}{3{,}6 \cdot 10^{-9}} = 7{,}22 \cdot \tau \quad (3.1.34)$$

При значении $Fo$ = 0,2 результаты расчета для 2-го слоя представлены в таблице 3.3, распределение температуры на рисунке 3.6.

Таблица 3.3 – Результаты расчета безразмерной и размерной температуры во 2-м слое при числе Фурье $Fo$ = 0,2

| $\bar{x}$ | $T_\delta(\bar{x}, Fo)$ | T, °C | Уравнение аппроксимации $T$(x) = |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,0001 | 20,04 | $0{,}002x^2 - 0{,}003x + 0{,}001$ |
| 0,25 | 0,0001 | 20,01 | |
| 0,5 | 0,0000 | 20,00 | |
| 0,75 | 0,0000 | 20,00 | |
| 1 | 0,0000 | 20,00 | |

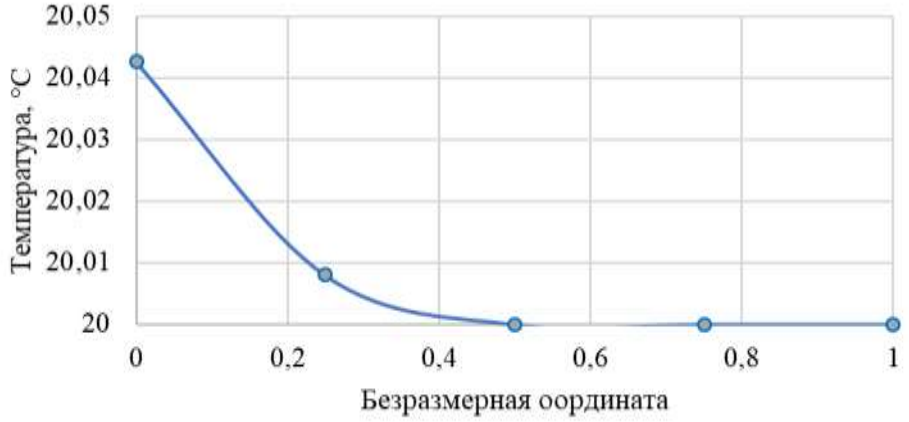



Рисунок 3.6 – Распределение температуры во 2-м слое по безразмерной координате при $Fo$ = 0,2

Полное распределение температуры в двух слоях будет выглядеть следующим образом (рисунок 3.7).

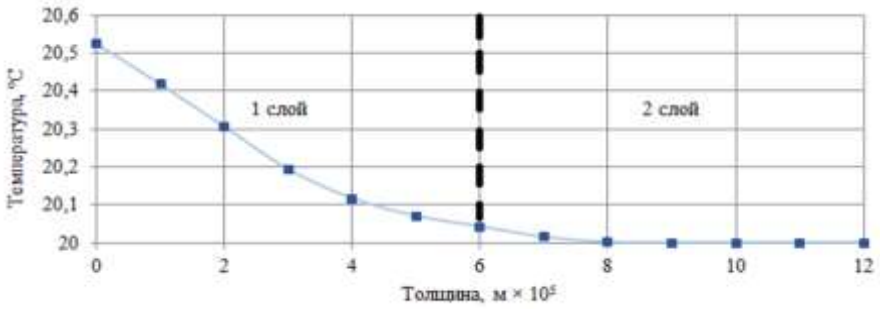



Рисунок 3.7 – Распределение температуры в 1-м и 2-м слоях по толщине при $Fo$ = 0,2

Проведем расчет безразмерной температуры в 1-м слое при числе Фурье $Fo$ =1 с учетом уравнения аппроксимации, представленном в таблице 3.2.

Результаты расчета отражены в таблице 3.4. Распределение температуры в 1-м слое представлено на рисунке 3.8.

Таблица 3.4 – Результаты расчета безразмерной и размерной температуры при числе Фурье $Fo$ =1

| $\bar{x}$ | $T_\delta(\bar{x}, Fo)$ | T, °C | Уравнение аппроксимации $T$(x) = |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,0044 | 21,73 | $0{,}049x^2 - 0{,}092x + 0{,}043$ |
| 0,25 | 0,0039 | 21,54 | |
| 0,5 | 0,0033 | 21,29 | |
| 0,75 | 0,0027 | 21,07 | |
| 1 | 0,0022 | 20,88 | |

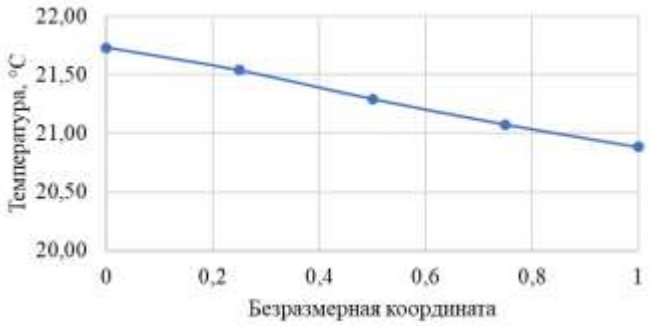



Рисунок 3.8 – Распределение температуры в 1-м слое по безразмерной координате при $Fo$ = 1

Тепловой поток, направленный во второй слой, будет составлять $q_S$ = 24,57 Вт/м$^2$ при $Fo$ =1. Рассчитаем значения безразмерных коэффициентов для 2-го слоя:

$$Ki = \frac{q_S \delta_2}{\lambda_2 t} = \frac{24{,}57 \cdot 0{,}0006}{0{,}04 \cdot 20} = 1{,}84 \cdot 10^{-3}. \qquad (3.1.35)$$

Проведем расчет безразмерной температуры во 2-м слое при числе Фурье $Fo$ = 1 с учетом уравнения аппроксимации, представленного в таблице 3.5. Результаты расчета для 2-го слоя представлены в таблице 3.5, распределение температуры на рисунке 3.9.

Таблица 3.5 – Результаты расчета безразмерной и размерной температуры во 2-м слое при числе Фурье $Fo$ = 1

| $\bar{x}$ | $T_\delta(\bar{x}, Fo)$ | T, °C | Уравнение аппроксимации $T$(x) = |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,0022 | 20,88 | $0{,}002x^2 - 0{,}003x + 0{,}001$ |
| 0,25 | 0,0012 | 20,49 | |
| 0,5 | 0,0005 | 20,21 | |
| 0,75 | 0,0002 | 20,07 | |
| 1 | 0,0001 | 20,04 | |

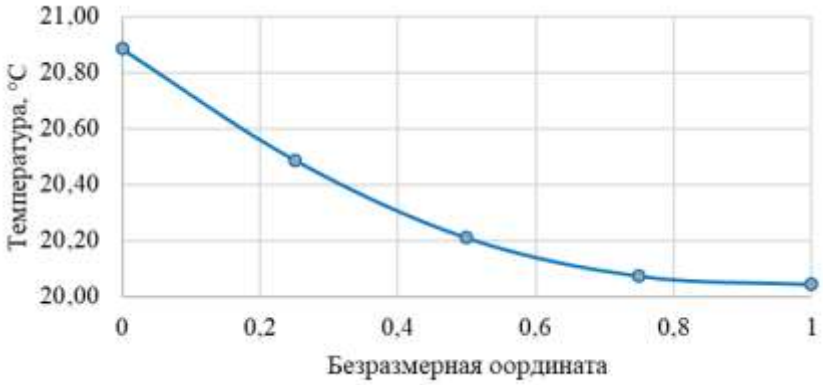



Рисунок 3.9 – Распределение температуры во 2-м слое по безразмерной координате при $Fo$ = 1

Температурный профиль достигает 3-го слоя, что позволяет определить тепловой поток за счет разницы температур. Тепловой поток, направленный в третий слой, будет составлять $q_S$ = 1,17 Вт/м$^2$ при $Fo$ = 1.

Постановка задачи для третьего слоя огнезащитного полотна может быть записана следующим образом.

Задача 3. Температура в слое 3 с граничными условиями второго рода на границе III и граничными условиями первого рода, которые характеризуют теплообмен между поверхностью слоя три на границе IV с окружающей средой.

Для решения краевой задачи при неравномерном распределении температур используется выражение (3.1.37), описанное в работах [74, 163]:

$$T(\bar{x}, Fo) = -K_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\,Bi\,cos(\mu_n \bar{x})}{{\mu_n}^2 (Bi + sin^2 \mu_n)} - \exp(-{\mu_n}^2 Fo) + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\,Bi\,cos(\mu_n \bar{x})}{{\mu_n}^2 (Bi + sin^2 \mu_n)} \exp(-{\mu_n}^2 Fo) \int_0^1 \mathrm{T}_0(\xi) cos(\mu_n \xi) d\xi, \quad (3.1.36)$$

где Fo – число Фурье, рассчитанное по формуле (3.1.25); $Bi$ – число Био, определенное по формуле (3.1.23); $K_i$ – критерий Кирпичева, рассчитанный по формуле (3.1.33).

Определим величину температурного градиента, продифференцировав выражение (3.1.36) по $\bar{x}$:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} = +K_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\,Bi\,\mu_n sin(\mu_n \bar{x})}{{\mu_n}^2 (Bi + sin^2 \mu_n)} - \exp(-{\mu_n}^2 Fo) - \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\,Bi\,sin(\mu_n \bar{x})}{{\mu_n}^2 (Bi + sin^2 \mu_n)} \exp(-{\mu_n}^2 Fo) \int_0^1 \mathrm{T}_0(\xi) cos(\mu_n \xi) d\xi, \quad (3.1.37)$$

Рассчитаем значения безразмерных коэффициентов для 3-го слоя:

$$Ki = \frac{q_S \delta_3}{\lambda_3 t} = \frac{1.17 \cdot 0{,}00006}{0{,}2 \cdot 20} = 1{,}76 \cdot 10^{-5} \quad (3.1.38)$$

$$Fo = \frac{\alpha_3 \tau}{\delta_3^2} = \frac{\frac{\lambda_3}{c_3 \rho_3}\tau}{(0{,}06 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{1{,}499 \cdot 10^{-7} \cdot \tau}{(0{,}06 \cdot 10^{-3})^2} = 41{,}6 \cdot \tau \qquad (3.1.39)$$

При значении $Fo$ =1 результаты расчета для 3-го слоя представлены в таблице 3.6, распределение температуры на рисунке 3.10.

Таблица 3.6 – Результаты расчета безразмерной и размерной температуры в 3-м слое при числе Фурье $Fo$ = 1

| $\bar{x}$ | $T_\delta(\bar{x}, Fo)$ | T, °C | Уравнение аппроксимации $T$(x) = |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,0001 | 20,04 | $0{,}001x^2 - 0{,}002x + 0{,}006$ |
| 0,25 | 0,0001 | 20,02 | |
| 0,5 | 0,0000 | 20,01 | |
| 0,75 | 0,0000 | 20,00 | |
| 1 | 0,0000 | 20,00 | |

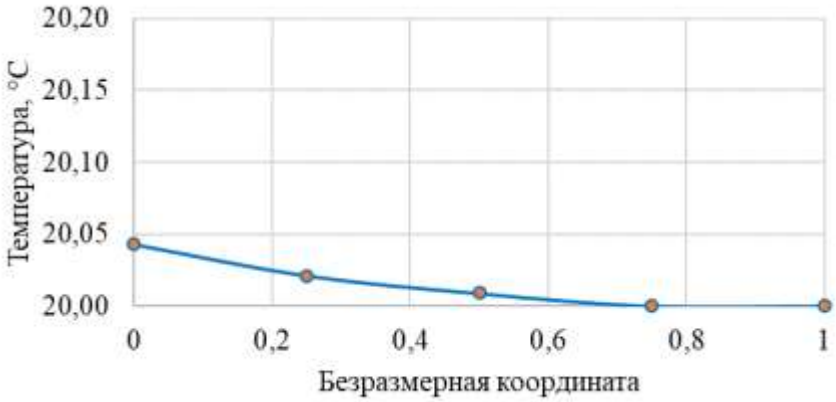



Рисунок 3.10 – Распределение температуры в 3-ем слое по безразмерной координате при $Fo$ = 1

Полное распределение температуры в трех слоях будет выглядеть следующим образом (рисунок 3.11).

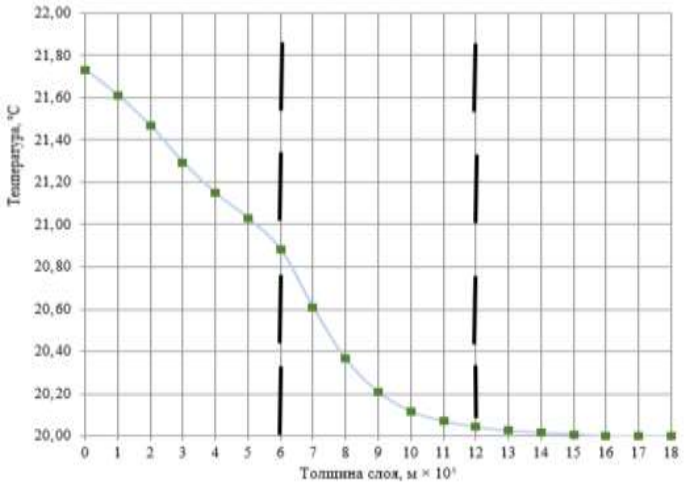



Рисунок 3.11 – Распределение температуры в 1-м, 2-м и 3-м слоях по толщине при $Fo = 1$

Аналогично проводим расчет для последующих значений до достижения стационарного режима. Распределения температур при различных значениях Фурье представлено на рисунке 3.12.

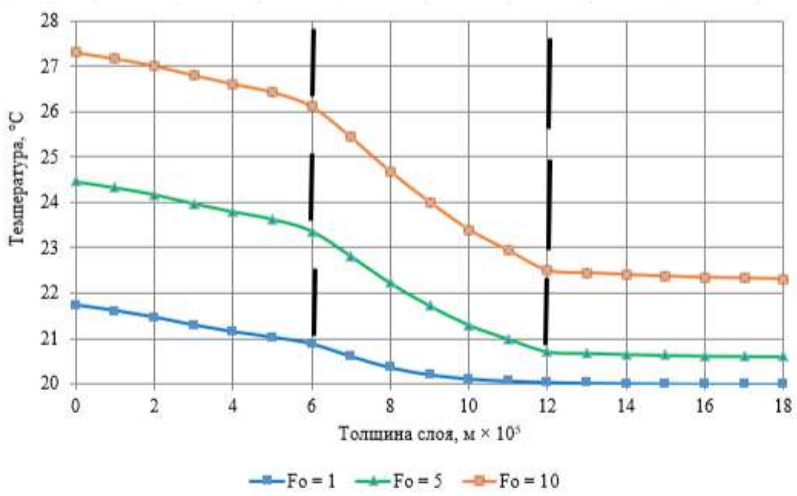



Рисунок 3.12 – Распределение температуры в слоях при значении $Fo = 1$, $Fo = 5$ и $Fo = 10$

Более «полная картина» распределения в трех слоях представлена на рисунке 3.13. При более высоких значениях Фурье происходит повышение температуры до выхода на стационарный режим.

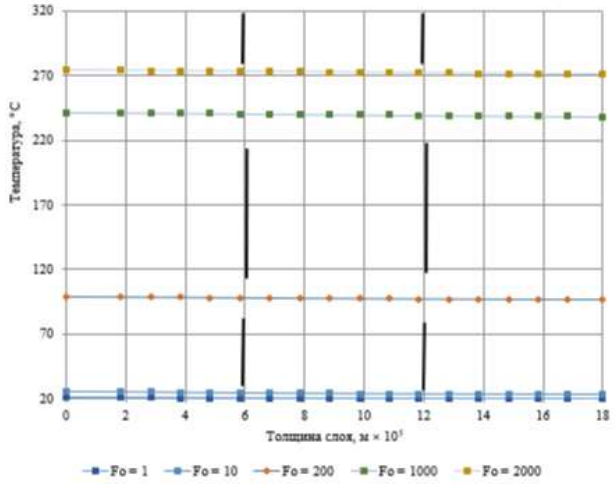



Рисунок 3.13 – Распределение температуры в слоях
при значении *Fo* от 1 до 2000

Помимо решения задачи теплопереноса в слоях данного материала, рассматривается задача замкнутой системы участка (2) в границах скатов огнезащитного полотна (1) и (2) на основе одностороннего термического воздействия теплового потока на огнезащитные полотна из композита в течение сравнительно небольшого времени. На рисунке 3.15 представлена принципиальная схема ослабления теплового потока противопожарной преградой, проходящего между скатами (1) и (2) огнезащитного полотна.

Основой для расчета нагрева скатов материала от теплового потока является уравнение лучистого теплообмена [173]:

$$q = c_{1-2}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\varphi_{1-2} \qquad (3.1.40)$$

где $q$ – плотность теплового потока, Вт/м$^2$; $T_1$, $T_2$ – абсолютные температуры факела и воспринимаемой поверхности материала, К; $c_{1\text{-}2}$ – приведенный коэффициент излучения в системе «плотно (1) – полотно (2)», равный 5,7 Вт/(м$^2$*К$^4$); $\varphi_{1\text{-}2}$ – угловой коэффициент излучения.

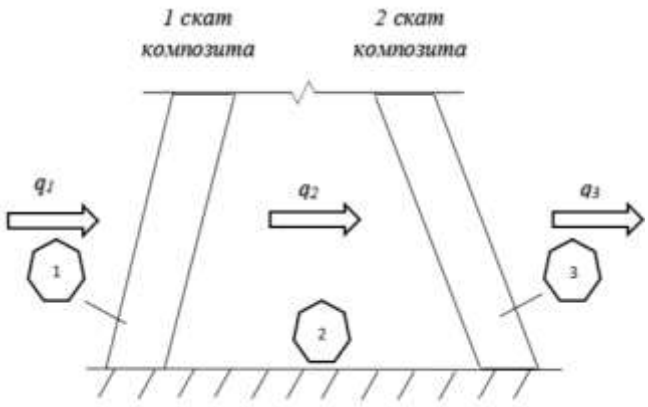



Рисунок 3.15 – Принципиальная схема ослабления теплового потока противопожарной преградой: 1,2,3 – участки рассматриваемой системы; $q_1$, $q_2$, $q_3$ – тепловой поток, кВт/м$^2$; 1 скат, 2 скат – огнезащитный материал

Для уравнения (3.1.40) два граничных условия: третьего и первого рода. Начальная температура стала постоянна и равна $t_0$. На поверхность изделия воздействует высокая температура пожара $t_{пож}$. Между высокотемпературной газовой средой и внешним слоем первого ската огнезащитного полотна происходит сложный теплообмен в результате конвекции и излучения:

$$q_\Sigma = q_и + q_к = \alpha_{эф}[t_{пож.} - t_{пов.}] \qquad (3.1.41)$$

Здесь $q_\Sigma$ – суммарная плотность теплового потока (идет для нагрева внутрь) при пожаре излучением $q_и$ и конвекцией $q_к$, Вт/м$^2$, $\alpha_{эф.}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи за счет излучения и конвекции, Вт/ (м$^2$·К), $t_{пож.}$ - температура излучающего агента пожара, К, $t_{пов.}$ - температура воспринимающей тепло поверхности изделия, К [74, 98]. Опираясь на труды [10, 79], следует уточнить, что при температуре пламени свыше 400°С в 95% происходит доминирование лучистого теплообмена над конвективным, а это, в свою очередь, именно тот случай, поскольку температура факела пламени находится в пределах 500-560°С [77].

На диаграмме (рисунок 3.16) представлена зависимость плотности теплового потока, направленного во второй скат огнезащитного полотна от продолжительности времени воздействия. Из рисунка 3.16 видно, что пик роста

плотности ($q$ = 244,6 Вт/м$^2$) теплового потока, направленного во второй скат полотна приходится на 4 минуту проведения эксперимента, что в свою очередь объяснимо тем, что именно к этому времени огонь вплотную подходит к противопожарной преграде, выполненной из композиционного материала. Подробный расчет представлен в приложении 6. Аналогичные расчеты влияния лучистого теплообмена на противопожарные преграды решались в работах [64, 173].

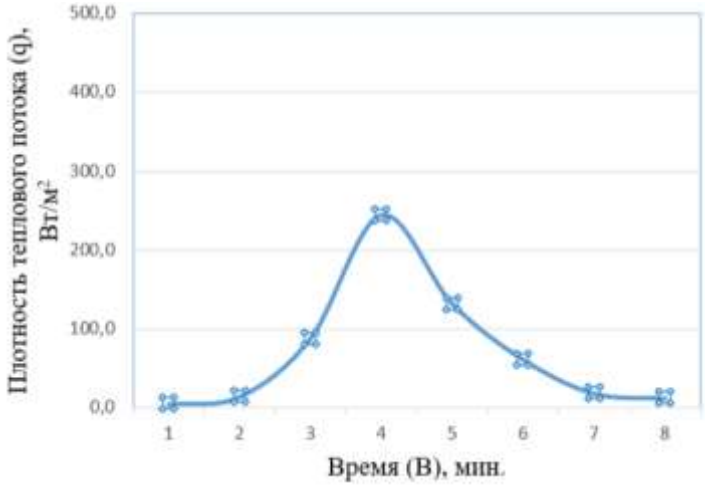



Рисунок 3.16 – Зависимость значений плотности теплового потока от продолжительности времени воздействия

## 3.3 Выводы по 3 главе

1. Разработана конструкция быстровозводимой противопожарной преграды, включающая в себя огнезащитный материал из композиционного материала. Использование устройств с данной конструкцией составляет основу предложенного способа защиты территорий и позволяет оперативно ограничивать распространение низового ландшафтного пожара в соответствии с описанием, представленном в разделе 3.1.

2. На основе теории теплопереноса и результатов проведенных исследований предложена методика расчета, позволяющая определить динамику

распространения температуры в слоях материала в зависимости от величины плотности теплового потока и времени продолжительности огневого воздействия.

3. Разработана математическая модель теплопереноса, позволяющая рассчитать изменение температуры в слоях данного материала. Проведен численный эксперимент замкнутой системы участка (2) в границах скатов огнезащитного полотна (1) и (2) на основе одностороннего термического воздействия лучистого теплообмена на огнезащитные полотна в течение непродолжительного времени.

# ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ПРЕГРАДЫ

## 4.1 Результаты экспериментального исследования эксплуатационных и конструктивных характеристик противопожарной преграды

Для исследования воздействия теплового потока на рассматриваемые материалы и определения оптимального варианта их выбора и защиты, была проведена серия стендовых испытаний. С этой целью были изготовлены группы образцов трудногорючего стеклопластика и композиционного материала на основе стеклоткани с кремнийорганическим соединением, соответствующие Государственному стандарту [27], имеющие форму квадрата со стороной 165 мм и отклонением ± 5 мм. Толщина образцов составляет не более 0,18 мм. Воздействие теплового потока на образцы осуществлялось в течение 10 минут [76, 185] в зависимости от условий, соответствующих плотности теплового потока: условиям 1, 4, 7, 10, 13 соответствует тепловой поток 13 кВт/м$^2$; для условий 2, 5, 8, 11, 14 – 36 кВт/м$^2$; условиям 3, 6, 9, 12, 15 – 39 кВт/м$^2$. Для условий 1-3 испытанию подвергались исходные образцы трудногорючего стеклопластика. В условиях 4-6 восстановление поврежденных участков образцов стеклопластика происходило посредством нанесения на внешнюю поверхность слоя огнеупорной пены «Penosil Premium», а при условиях 7-9 огнеупорная пена наносилась на внешнюю и внутреннюю поверхности поврежденных образцов. Также с целью восстановления поврежденных участков применялась алюминиевая фольга (условия 10-12) с толщиной слоя в 0,2 мм. В условиях 13-15 испытанию подлежали образцы композита, выполненные из стеклоткани и нанесенной на ее поверхность кремнийорганического соединения. Исходные данные для проведения эксперимента приведены в таблице 4.1.1.

Таблица – 4.1.1 Исходные данные (условия) для проведения эксперимента

| Вид условия | Значение плотности теплового потока, кВт/м$^2$ | Вид покрытия | Тип материала |
|---|---|---|---|
| Условие 1 | 13 | - | РСТ-250 |
| Условие 2 | 36 | - | РСТ-250 |
| Условие 3 | 39 | - | РСТ-250 |
| Условие 4 | 13 | 1 слой огнеупорной пены | РСТ-250 |
| Условие 5 | 36 | 1 слой огнеупорной пены | РСТ-250 |
| Условие 6 | 39 | 1 слой огнеупорной пены | РСТ-250 |
| Условие 7 | 13 | 2 слоя огнеупорной пены | РСТ-250 |
| Условие 8 | 36 | 2 слоя огнеупорной пены | РСТ-250 |
| Условие 9 | 39 | 2 слоя огнеупорной пены | РСТ-250 |
| Условие 10 | 13 | Алюминиевая фольга | РСТ-250 |
| Условие 11 | 36 | Алюминиевая фольга | РСТ-250 |
| Условие 12 | 39 | Алюминиевая фольга | РСТ-250 |
| Условие 13 | 13 | Кремнийорганическое соединение | Стеклоткань |
| Условие 14 | 36 | Кремнийорганическое соединение | Стеклоткань |
| Условие 15 | 39 | Кремнийорганическое соединение | Стеклоткань |

В соответствие с п. 6.1 ГОСТа [27] при каждом измерении величины плотности теплового потока для испытания отбирались три образца. Измерение температуры осуществлялось измерителем-регулятором 2 ТРМ-1 с тыльной стороны рассматриваемого материала, через технологическое отверстие установки [185]. Исследование проводилось в помещение лаборатории на испытательной установке для определения воспламеняемости строительных материалов (рисунок 4.1). Перед началом проведения испытаний испытательная установка подвергалась калибровке в соответствии с п. 8.1.4 ГОСТа [27]. Температура воздуха помещения

составляла 27,1°С [185]. После завершения калибровки группы испытуемых образов подлежали взвешиванию и помещению каждого из них по одному на защитную плиту испытательной установки. Запускался секундомер и начинался эксперимент. Первая группа образцов подлежала испытанию в течение 1 минуты, затем образец извлекали и повторно взвешивали, тем самым определялась потеря массы в результате воздействия источника излучения, а также присутствия следов деструкции материала. Каждый последующий эксперимента с группой рассматриваемых материалов проводился на 1 минуту дольше, чем предшествующий и так до достижения 10 минут воздействия плотности теплового потока на крайнюю группу образцов. Достоверность полученных результатов определялась коэффициентом детерминации при наибольшем значении плотности теплового потока.

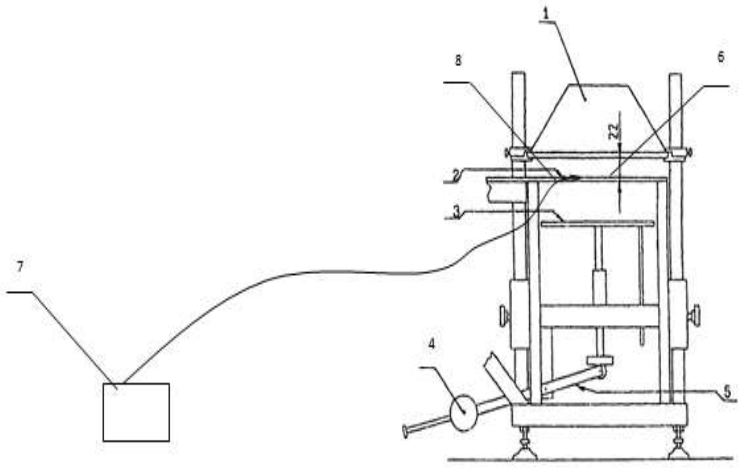



Рисунок 4.1 – Испытательная установка для определения воспламеняемости строительных материалов: 1 – радиационная панель, 2 – защитная плита, 3 – подвижная платформа для образца, 4 – противовес, 5 – рычаг, 6 – испытуемый образец, 7 – измеритель – регулятор микропроцессорный двухканальный 2 ТРМ 1, 8 – термопара [27]

Результаты измерения температуры измерителем-регулятором образцов в условии 1 представлены в таблице 4.1.2. Плотность теплового потока составляла 13 кВт/м$^2$, что соответствовало температуре в 480°С.

Таблица – 4.1.2 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 1)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г |
| 1. | 60 | 123,8±3 | 0,31±0,01 | 124,1±3 | 0,29±0,01 | 124,3±3 | 0,30±0,01 |
| 2. | 120 | 152,4±3 | 0,62±0,03 | 150,3±3 | 0,60±0,03 | 151,9±3 | 0,61±0,03 |
| 3. | 180 | 166,5±3 | 0,92±0,04 | 162,5±3 | 0,91±0,04 | 164,2±3 | 0,93±0,04 |
| 4. | 240 | 169,1±3 | 1,23±0,06 | 167,2±3 | 1,24±0,06 | 168,1±3 | 1,26±0,06 |
| 5. | 300 | 180,4±3 | 1,64±0,06 | 181,5±3 | 1,58±0,06 | 181,7±3 | 1,64±0,06 |
| 6. | 360 | 187,9±3 | 2,06±0,07 | 188,1±3 | 1,98±0,06 | 188,4±3 | 2,05±0,06 |
| 7. | 420 | 188,5±3 | 2,49±0,07 | 190,2±3 | 2,39±0,07 | 188,8±3 | 2,46±0,07 |
| 8. | 480 | 191,4±3 | 2,92±0,08 | 192,7±3 | 2,82±0,08 | 192,4±3 | 2,88±0,08 |
| 9. | 540 | 194,0±3 | 3,34±0,09 | 195,2±3 | 3,26±0,09 | 193,1±3 | 3,31±0,09 |
| 10. | 600 | 193,1±3 | 3,75±0,10 | 194,8±3 | 3,68±0,10 | 192,9±3 | 3,72±0,10 |

Полученный результат указывает на то, что спустя 38 секунд с момента начала испытания наблюдалось выделение паровоздушной смеси с поверхности всех трех образцов, состоящей из продуктов разложения. Температура на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика не превышала 200°С. Дальнейшее наблюдение показало отсутствие признаков самовоспламенения на

протяжение всего периода проведения эксперимента. Вместе с тем максимальная потеря массы наблюдается у образца № 2 на 9 минуте.

Условие 2 отличное от условия 1 тем, что плотность теплового потока увеличена до 36 кВт/м$^2$, поскольку при меньших значениях тепловой поток не оказывает существенного влияния на трудногорючий стеклопластик. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.1.3.

Таблица – 4.1.3 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 2)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 264,1±3 | 1,01±0,05 | 263,2±3 | 0,99±0,05 | 263,8±3 | 1,00±0,05 |
| 2. | 120 | 290,7±3 | 2,03±0,07 | 289,8±3 | 1,99±0,07 | 291,3±3 | 2,01±0,07 |
| 3. | 180 | 295,1±3 | 3,00±0,10 | 293,3±3 | 2,97±0,10 | 294,6±3 | 2,98±0,10 |
| 4. | 240 | 301,2±3 | 3,96±0,13 | 302,2±3 | 3,94±0,13 | 300,4±3 | 3,93±0,13 |
| 5. | 300 | 306,8±3 | 4,97±0,16 | 307,4±3 | 4,95±0,16 | 307,1±3 | 4,94±0,16 |
| 6. | 360 | 301,5±3 | 5,97±0,23 | 302,6±3 | 5,93±0,23 | 301,9±3 | 5,95±0,23 |
| 7. | 420 | 303,4±3 | 6,95±0,27 | 305,7±3 | 6,90±0,27 | 304,7±3 | 6,94±0,27 |
| 8. | 480 | 308,8±3 | 7,98±0,29 | 309,3±3 | 7,95±0,29 | 308,8±3 | 7,98±0,29 |
| 9. | 540 | 304,1±3 | 8,97±0,30 | 307,4±3 | 8,97±0,30 | 305,3±3 | 8,96±0,30 |
| 10. | 600 | 303,1±3 | 9,95±0,32 | 304,8±3 | 9,96±0,32 | 302,9±3 | 9,93±0,32 |

В таблице 4.1.3 показаны данные, полученные в ходе проведения эксперимента. Температура нагревательного элемента установки соответствовала 704°С. В интервале времени с 1 по 2 минуты с момента наблюдения происходило

интенсивное выделение паровоздушной смеси с поверхности образцов. Максимальная температура на поверхности образцов зафиксирована на 8 минуте наблюдения и совпала с максимальной потерей массы образца № 2 в 1,06 грамма. По истечении 10 минут эксперимента самовоспламенения материала не произошло.

Таблица – 4.1.4 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 3)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 265,2±3 | 0,79±0,04 | 263,1±3 | 0,89±0,04 | 264,1±3 | 0,95±0,05 |
| 2. | 120 | 291,8±3 | 1,61±0,07 | 290,7±3 | 1,72±0,07 | 289,8±3 | 1,96±0,07 |
| 3. | 180 | 296,3±3 | 2,56±0,10 | 295,5±3 | 2,70±0,10 | 298,1±3 | 2,95±0,11 |
| 4. | 240 | 301,8±3 | 3,52±0,13 | 302,7±3 | 3,67±0,13 | 302,4±3 | 3,93±0,14 |
| 5. | 300 | 307,2±3 | 4,57±0,16 | 308,1±3 | 4,69±0,16 | 309,3±3 | 4,94±0,17 |
| 6. | 360 | 301,9±3 | 5,63±0,23 | 302,0±3 | 5,68±0,23 | 303,9±3 | 5,94±0,24 |
| 7. | 420 | 304,2±3 | 6,68±0,27 | 303,8±3 | 6,70±0,27 | 304,3±3 | 6,98±0,28 |
| 8. | 480 | 310,4±3 | 7,76±0,29 | 309,9±3 | 7,76±0,29 | 310,1±3 | 8,05±0,30 |
| 9. | 540 | 305,3±3 | 8,77±0,30 | 304,2±3 | 8,78±0,30 | 304,3±3 | 9,07±0,31 |
| 10. | 600 | 304,4±3 | 9,77±0,32 | 303,5±3 | 9,77±0,31 | 303,6±3 | 10,05±0,33 |

Для условия 3 плотность теплового потока составляла 39 кВт/м$^2$. Результаты испытаний представлены в таблице 4.1.4.

Для описания динамики температурных изменений в материале от продолжительности времени нагрева и потери массы образцов трудногорючего

стеклопластика проведена обработка полученных данных рис 4.2 и 4.3 [77]. Полученные данные по результатам эксперимента обрабатывались с помощью программного пакета Statistica [51, 62, 69, 77, 172].

Указанные зависимости имеют вид:

$$T_1(\tau) = 0{,}196\ \tau^3 - 4{,}270\ \tau^2 + 29{,}406\ \tau + 241{,}92 \qquad (4.1.1)$$

где $T_1(\tau)$ – температура на тыльной стороне исходных образцов трудногорючего стеклопластика, °С; $\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин.

Зависимость 4.1.1 справедлива для значения 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин. Погрешность аппроксимации зависимости 4.1.1 составляет 7 %.

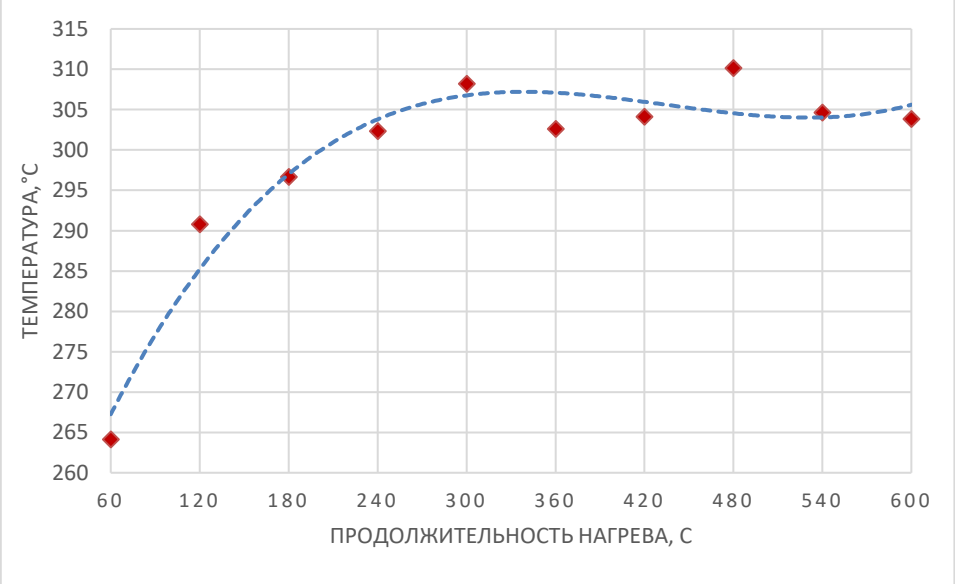



Рисунок 4.2 – Зависимость температуры на тыльной стороне исходных образцов трудногорючего стеклопластика от продолжительности времени нагрева

$$m_1(\tau) = 1{,}009\ \tau - 0{,}252 \qquad (4.1.2)$$

где $m_1(\tau)$ – потери массы образцов трудногорючего стеклопластика, г, при 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин, $\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин. Для зависимости 4.1.2 потери массы образца от продолжительности времени высокотемпературного воздействия (рисунок 4.3)

коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,999$. Погрешность аппроксимации зависимости 4.1.2 составляет не более 1 %.

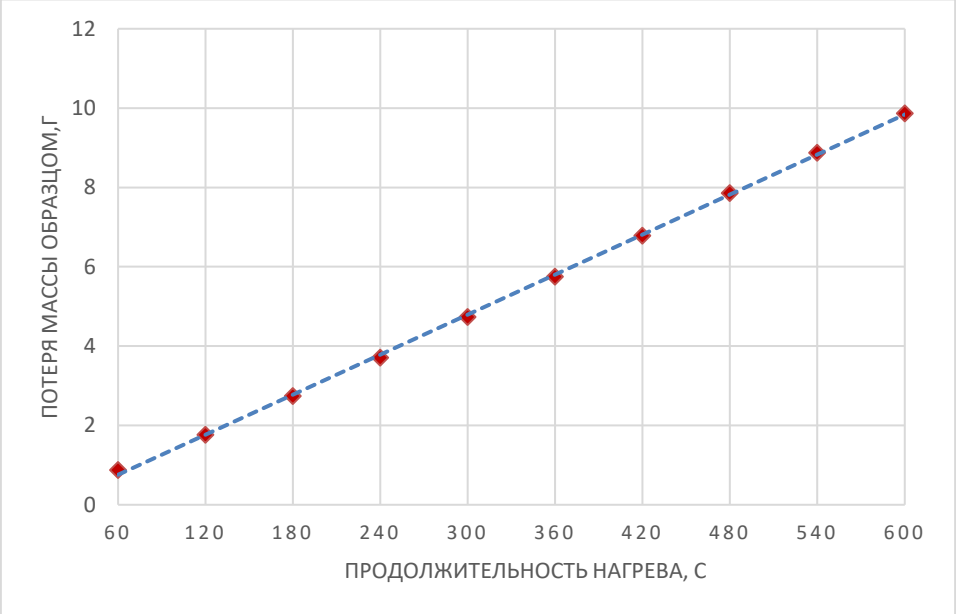



Рисунок 4.3 – Зависимость потери массы исходных образцов трудногорючего стеклопластика от продолжительности времени нагрева

Анализируя результаты измерений, отраженные в таблицах 4.1.2-4.1.4, а также рисунки 4.2-4.3 и зависимости 4.1.1-4.1.2 необходимо отметить, что, нагрев измерителя-регулятора осуществлялся во всех описанных случаях. Максимальная температура на тыльной стороне образцов зафиксирована при тепловом потоке в 39 кВт/м$^2$ и составляла на 8 минуте 310,4°С. Стоит отметить, что на исходе ±39 секунды в следствие интенсивного выделения паровоздушной смеси с поверхности каждого образца произошло их самовоспламенение. Дальнейшее проведение эксперимента при заданном условии не имело смысла, поскольку температура измерителя-регулятора в дальнейшем не превышала 311°С. Максимальная потеря массы образца наблюдалась на 8 минуте (образец стеклопластика № 1) и составляла 1,08 г.

В условии 4 испытание проводилось на испытательной установке при тепловом потоке в 13 кВт/м$^2$. Отличительной особенностью условий 4-6 от условий 1-3 является то, что образцы трудногорючего стеклопластика подлежали восстановлению при помощи огнеупорной пены «Penosil Premium» [185]. Толщина

защитного слоя составляла 1 мм. Огнестойкий состав наносился на тыльную сторону образцов при помощи разглаживающего металлического шпателя. Толщина слоя измерялась при помощи микрометра. В таблице 4.1.5 представлены основные результаты эксперимента.

Таблица – 4.1.5 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 4)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г |
| 1. | 60 | 148,1±3 | 0,54±0,02 | 152,2±3 | 0,60±0,03 | 155,0±3 | 0,72±0,03 |
| 2. | 120 | 177,8±3 | 1,22±0,06 | 171,6±3 | 1,26±0,06 | 172,2±3 | 1,39±0,06 |
| 3. | 180 | 192,6±3 | 2,01±0,07 | 190,1±3 | 2,04±0,07 | 191,3±3 | 2,15±0,07 |
| 4. | 240 | 196,3±3 | 2,78±0,13 | 195,0±3 | 2,84±0,12 | 194,4±3 | 2,94±0,13 |
| 5. | 300 | 200,4±3 | 3,42±0,16 | 199,2±3 | 3,56±0,16 | 200,3±3 | 3,72±0,17 |
| 6. | 360 | 204,1±3 | 4,12±0,16 | 204,9±3 | 4,38±0,17 | 205,3±3 | 4,53±0,19 |
| 7. | 420 | 202,9±3 | 4,73±0,23 | 203,1±3 | 5,19±0,24 | 204,1±3 | 5,33±0,24 |
| 8. | 480 | 204,9±3 | 5,46±0,25 | 203,7±3 | 5,91±0,26 | 205,6±3 | 6,19±0,27 |
| 9. | 540 | 205,3±3 | 6,22±0,28 | 206,1±3 | 6,75±0,29 | 206,3±3 | 7,09±0,30 |
| 10. | 600 | 203,4±3 | 6,95±0,29 | 202,8±3 | 7,56±0,30 | 203,4±3 | 7,91±0,31 |

Сопоставляя данные результатов из таблиц 4.1.2 и 4.1.5 необходимо сделать вывод о возможности восстановленных образцов (условие 4) при помощи огнеупорной пены препятствовать длительное время тепловому потоку 13 кВт/м$^2$, что отразилось в отсутствие признаков к самовоспламенению. Максимальная

температура на тыльной стороне образца стеклопластика № 3 на 9 минуте составила 206,3°С, при этом максимальная потеря массы составила 0,90 грамма.

Далее на испытательной установке исследовалась температура на тыльной стороне восстановленного трудногорючего стеклопластика при других условиях. Условие 5 под собой подразумевало увеличение плотности теплового потока до 36 кВт/м$^2$.

Таблица – 4.1.6 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 5)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 279,2±3 | 1,72±0,07 | 280,5±3 | 1,73±0,7 | 277,4±3 | 1,65±0,07 |
| 2. | 120 | 318,5±3 | 3,46±0,12 | 317,3±3 | 3,45±0,11 | 319,2±3 | 3,38±0,11 |
| 3. | 180 | 322,2±3 | 5,26±0,16 | 321,4±3 | 5,27±0,16 | 321,8±3 | 5,21±0,15 |
| 4. | 240 | 321,3±3 | 7,22±0,21 | 322,7±3 | 7,22±0,21 | 322,9±3 | 7,18±0,20 |
| 5. | 300 | 314,4±3 | 9,01±0,30 | 316,7±3 | 9,01±0,30 | 315,7±3 | 8,95±0,29 |
| 6. | 360 | 315,2±3 | 10,82±0,35 | 314,9±3 | 10,81±0,35 | 313,9±3 | 10,74±0,34 |
| 7. | 420 | 319,5±3 | 12,55±0,39 | 319,7±3 | 12,56±0,39 | 319,2±3 | 12,46±0,38 |
| 8. | 480 | 315,4±3 | 14,27±0,45 | 316,9±3 | 14,29±0,45 | 317,0±3 | 14,15±0,44 |
| 9. | 540 | 312,3±3 | 15,38±0,52 | 314,6±3 | 15,44±0,53 | 315,8±3 | 15,41±0,52 |
| 10. | 600 | 317,5±3 | 16,62±0,57 | 318,2±3 | 16,65±0,57 | 318,5±3 | 16,73±0,58 |

По данным таблицы 4.1.6 видно, что при 36 кВт/м$^2$ и защитном слое в 1 мм самовоспламенение обработанных образцов не наблюдается на протяжение 10 минут. Однако на 3 минуте происходит незначительное выделение паровоздушной

смеси с поверхности образцов, при этом максимальная температура в 322,9°С зафиксирована на 4 минуте (образец стеклопластика № 3). Сопоставляя данные таблицы 4.1.3 и 4.1.6 необходимо сделать вывод о том, что в условии 5 наблюдается существенное повышение температуры тыльной стороны образцов по отношению к условию 2. Такой результат можно объяснить воздействием высокой температуры на обработанную поверхность образца огнеупорной пеной, что ведет к ее выгоранию, тем самым, сопровождая потерей массы образцов.

В условии 6 на испытательной установке исследовалась температура повреждённых образцов трудногорючего стеклопластика и восстановленных при толщине слоя огнеупорной пены в 1 мм. Плотность теплового потока составляла 39 кВт/м$^2$. В таблице 4.1.7 представлены основные результаты эксперимента.

Таблица – 4.1.7 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 6)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δm, г |
| 1. | 60 | 316,1±3 | 2,53±0,08 | 317,2±3 | 2,56±0,08 | 315,4±3 | 2,54±0,08 |
| 2. | 120 | 337,1±3 | 5,15±0,16 | 333,5±3 | 5,15±0,16 | 334,6±3 | 5,14±0,16 |
| 3. | 180 | 331,0±3 | 8,15±0,26 | 330,2±3 | 8,14±0,26 | 329,9±3 | 8,02±0,26 |
| 4. | 240 | 323,2±3 | 11,14±0,35 | 326,1±3 | 11,17±0,35 | 327,1±3 | 11,01±0,35 |
| 5. | 300 | 321,9±3 | 15,05±0,47 | 324,1±3 | 15,10±0,47 | 323,3±3 | 14,90±0,46 |
| 6. | 360 | 326,1±3 | 18,59±0,58 | 324,3±3 | 18,58±0,58 | 325,4±3 | 18,42±0,58 |
| 7. | 420 | 322,1±3 | 21,12±0,65 | 321,8±3 | 20,92±0,64 | 323,6±3 | 20,99±0,64 |
| 8. | 480 | 319,3±3 | 23,54±0,73 | 317,7±3 | 23,30±0,74 | 318,2±3 | 23,38±0,74 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9. | 540 | 324,0±3 | 24,78±0,84 | 322,1±3 | 24,49±0,84 | 323,7±3 | 24,59±0,85 |
| 10. | 600 | 321,7±3 | 25,96±1,00 | 320,2±3 | 25,63±0,98 | 321,5±3 | 25,76±0,99 |

Для описания динамики температурных изменений в материале от продолжительности времени нагрева и потери массы образцов трудногорючего стеклопластика проведена обработка полученных данных рис. 4.4 и 4.5. Полученные данные по результатам эксперимента обрабатывались с помощью программного пакета Statistica [51, 62, 69, 77, 172, 185].

Указанные зависимости имеют вид:

$$T_2(\tau) = 0{,}079\tau^3 - 1{,}590\tau^2 + 9{,}994\tau + 307{,}95 \qquad (4.1.3)$$

где $T_2(\tau)$ – температура на тыльной стороне восстановленных образцов трудногорючего стеклопластика при помощи огнеупорной пены, нанесенной в один слой, °С;

$\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на восстановленный образец трудногорючего стеклопластика, мин.

Зависимость 4.1.3 справедлива для значения 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин. Погрешность аппроксимации зависимости 4.1.3 составляет не более 3 % [185].

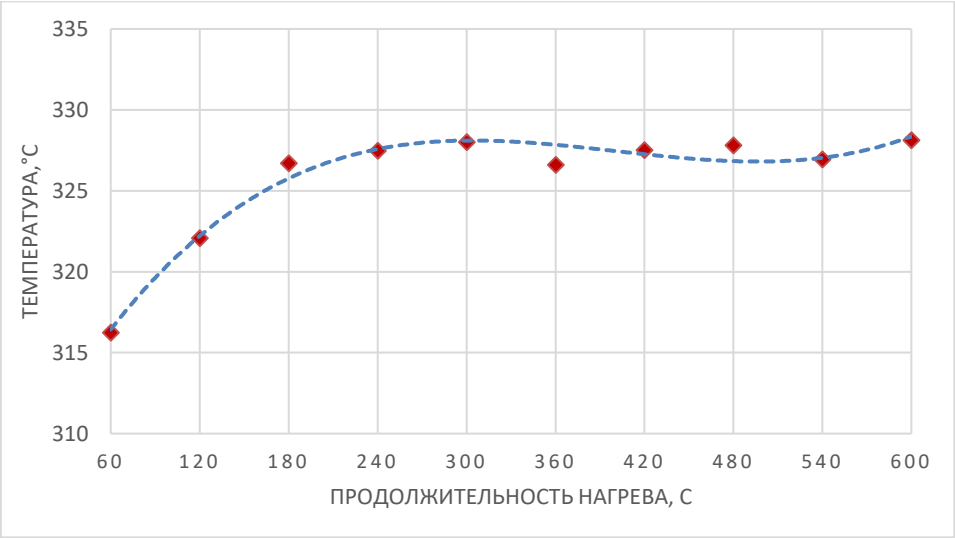



Рисунок 4.4 – Зависимость температуры на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика от продолжительности времени нагрева, восстановленных при помощи огнеупорной пены, нанесенной на тыльную сторону образцов

$$m_2(\tau) = 2{,}759\ \tau + 0{,}350 \qquad (4.1.4)$$

где $m_2(\tau)$ – потери массы восстановленного трудногорючего стеклопластика при помощи огнеупорной пены, г, при 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин, $\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин. Для зависимости потери массы образца от продолжительности времени высокотемпературного воздействия (рисунок 4.5) коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0{,}979$. Погрешность аппроксимации зависимости 4.1.4 составляет не более 3 % [185].

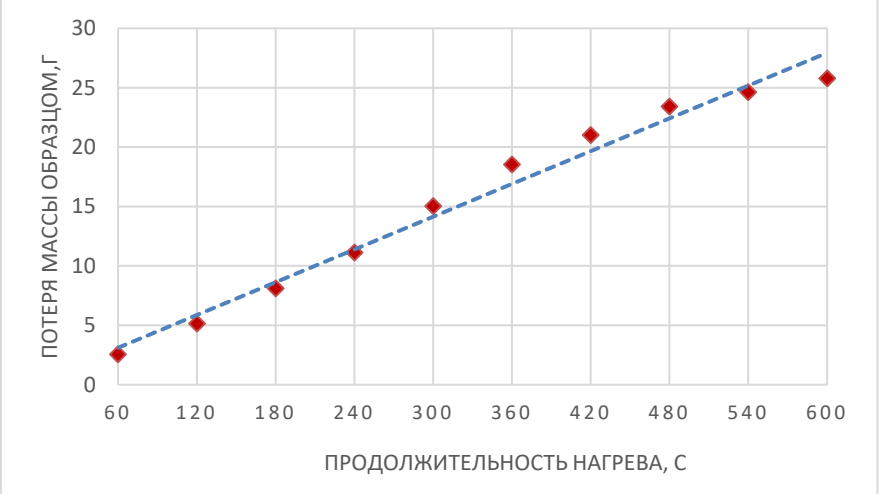



Рисунок 4.5 – Зависимость потери массы восстановленных при помощи огнеупорной пены образцов от продолжительности времени нагрева

В таблице 4.1.7 описаны данные, полученные в ходе проведения исследования. Температура нагревательного элемента испытательной установки соответствовала 725°С. Анализ зависимостей 4.1.3-4.1.4 и рисунков 4.4-4.5 показывает, что по истечении 11 секунд с момента начала эксперимента происходило интенсивное выделение паровоздушной смеси с поверхности огнеупорной пены, что в свою очередь привело к самовоспламенению образцов. Измерителем-регулятором фиксировалась температура на тыльной стороне образцов 337,1°С. Максимальная потеря массы образца стеклопластика № 1 на 5 минуте составила 3,91 грамма.

В условии 7 испытание проводилось на испытательной установке при тепловом потоке в 13 кВт/м$^2$. Толщина защитных слоев с тыльной и внешней

сторон составляли по 1 мм соответственно. Отличительной особенностью условий 7-9 от условий 4-6 являлось то, что образцы трудногорючего стеклопластика подлежали восстановлению при помощи огнеупорной пены «Penosil Premium» с двух сторон. В таблице 4.1.8 представлены основные результаты эксперимента.

Таблица – 4.1.8 Температура на тыльной стороне стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 7)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 124,0±3 | 1,04±0,05 | 125,1±3 | 1,05±0,05 | 123,2±3 | 1,02±0,05 |
| 2. | 120 | 175,3±3 | 2,11±0,09 | 176,2±3 | 2,14±0,09 | 174,9±3 | 2,06±0,09 |
| 3. | 180 | 193,1±3 | 3,26±0,12 | 192,2±3 | 3,28±0,12 | 194,2±3 | 3,23±0,12 |
| 4. | 240 | 197,9±3 | 4,36±0,14 | 196,8±3 | 4,37±0,14 | 197,8±3 | 4,33±0,14 |
| 5. | 300 | 205,8±3 | 5,45±0,19 | 207,7±3 | 5,49±0,19 | 206,4±3 | 5,44±0,19 |
| 6. | 360 | 208,1±3 | 6,56±0,23 | 209,4±3 | 6,65±0,23 | 207,6±3 | 6,54±0,23 |
| 7. | 420 | 210,0±3 | 7,74±0,27 | 211,3±3 | 7,83±0,27 | 212,5±3 | 7,74±0,27 |
| 8. | 480 | 213,9±3 | 8,80±0,31 | 212,1±3 | 8,88±0,32 | 211,3±3 | 8,78±0,33 |
| 9. | 540 | 211,8±3 | 9,78±0,35 | 211,1±3 | 9,85±0,36 | 210,7±3 | 9,74±0,35 |
| 10. | 600 | 214,3±3 | 10,74±0,37 | 213,7±3 | 10,80±0,37 | 212,9±3 | 10,69±0,36 |

Сопоставляя данные результатов из таблиц 4.1.5 и 4.1.8 необходимо отметить, что условие 7 отличается от условия 4 тем, что в нем наблюдается наибольшая потеря массы образцов. С 3 по 7 минуты зафиксирована наибольшая потеря массы образцов, так как при данных показателях измерителя-регулятора происходит постепенное выгорание восстановленных при помощи огнеупорной

пены участков образцов. Температура, определенная на тыльной стороне образца стеклопластика №1, составляла 213,9 °С на 8 минуте проведения эксперимента.

Далее на испытательной установке исследовалась температура на тыльной стороне восстановленных образцов трудногорючего стеклопластика. Условие 8 под собой подразумевало равномерное нанесение тонкого слоя огнеупорной пены «Penosil Premium» по 1 мм с двух сторон. Плотность теплового потока составляла 36 кВт/м$^2$.

Таблица – 4.1.9 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 8)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 274,1±3 | 2,85±0,09 | 275,2±3 | 2,87±0,09 | 274,8±3 | 2,85±0,09 |
| 2. | 120 | 311,4±3 | 5,79±0,20 | 305,3±3 | 5,76±0,20 | 310,8±3 | 5,76±0,20 |
| 3. | 180 | 294,3±3 | 8,32±0,26 | 299,2±3 | 8,53±0,27 | 296,6±3 | 8,44±0,26 |
| 4. | 240 | 293,2±3 | 10,83±0,35 | 290,4±3 | 11,32±0,36 | 292,9±3 | 11,04±0,35 |
| 5. | 300 | 297,7±3 | 13,56±0,44 | 290,8±3 | 14,04±0,45 | 295,4±3 | 13,77±0,44 |
| 6. | 360 | 289,9±3 | 16,25±0,51 | 289,7±3 | 16,75±0,53 | 288,2±3 | 16,43±0,52 |
| 7. | 420 | 290,0±3 | 18,94±0,62 | 289,6±3 | 19,42±0,66 | 291,1±3 | 19,13±0,63 |
| 8. | 480 | 295,1±3 | 21,54±0,68 | 294,2±3 | 22,08±0,71 | 293,7±3 | 21,80±0,69 |
| 9. | 540 | 292,4±3 | 24,33±0,81 | 291,8±3 | 24,82±0,84 | 290,8±3 | 24,64±0,83 |
| 10. | 600 | 285,6±3 | 26,99±0,87 | 288,9±3 | 27,41±0,90 | 283,3±3 | 27,35±0,89 |

По данным таблицы 4.1.9 видно, что при воздействии теплового потока в 36 кВт/м$^2$ на защитные слои огнеупорной пены по 1 мм каждый самовоспламенение обработанных образцов не наблюдалось на протяжение 10 минут. Однако на 2 минуте происходило незначительное выделение паровоздушной смеси с их поверхности, при этом максимальная температура в 311,4°С зафиксирована также в данном моменте времени.

В условиях 9 на испытательной установке исследовалась температура образцов трудногорючего стеклопластика при значении плотности теплового потока 39 кВт/м$^2$.

Таблица – 4.1.10 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 9)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 334,1±3 | 3,52±0,11 | 331,3±3 | 3,48±0,11 | 338,5±3 | 3,57±0,12 |
| 2. | 120 | 355,4±3 | 7,05±0,22 | 352,2±3 | 6,98±0,21 | 351,6±3 | 7,10±0,23 |
| 3. | 180 | 342,8±3 | 10,55±0,33 | 348,6±3 | 10,47±0,32 | 345,7±3 | 10,67±0,34 |
| 4. | 240 | 337,5±3 | 14,04±0,43 | 339,4±3 | 13,98±0,42 | 341,8±3 | 14,20±0,43 |
| 5. | 300 | 327,6±3 | 17,54±0,54 | 330,1±3 | 17,46±0,54 | 332,9±3 | 17,68±0,55 |
| 6. | 360 | 324,9±3 | 21,07±0,68 | 326,7±3 | 20,99±0,67 | 326,1±3 | 21,13±0,69 |
| 7. | 420 | 330,5±3 | 24,61±0,76 | 331,3±3 | 24,59±0,76 | 333,7±3 | 24,71±0,77 |
| 8. | 480 | 324,4±3 | 28,12±0,88 | 328,8±3 | 28,11±0,88 | 329,1±3 | 28,25±0,90 |
| 9. | 540 | 325,5±3 | 31,63±0,98 | 324,2±3 | 31,55±0,98 | 323,8±3 | 31,67±0,98 |
| 10. | 600 | 323,3±3 | 35,10±1,10 | 325,7±3 | 34,96±1,09 | 324,4±3 | 35,07±1,12 |

С целью описания динамики температурных изменений в трудногорючем стеклопластике от продолжительности времени нагрева и потери массы образцов проведена обработка полученных данных рис. 4.6 и 4.7. Полученные данные по результатам эксперимента обрабатывались с помощью программного пакета Statistica [51, 62, 69, 77, 172, 185].

Указанные зависимости имеют вид:

$$T_3(\tau) = 0{,}117\ \tau^3 - 2{,}347\ \tau^2 + 14{,}067\ \tau + 312{,}22 \qquad (4.1.5)$$

где $T_3(\tau)$ – температура на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика, восстановленных при помощи огнеупорной пены, нанесенной на обе стороны испытуемых образцов °С; $\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин.

Зависимость 4.1.5 справедлива для значения 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин. Погрешность зависимости 4.1.5 составляет 7 %.

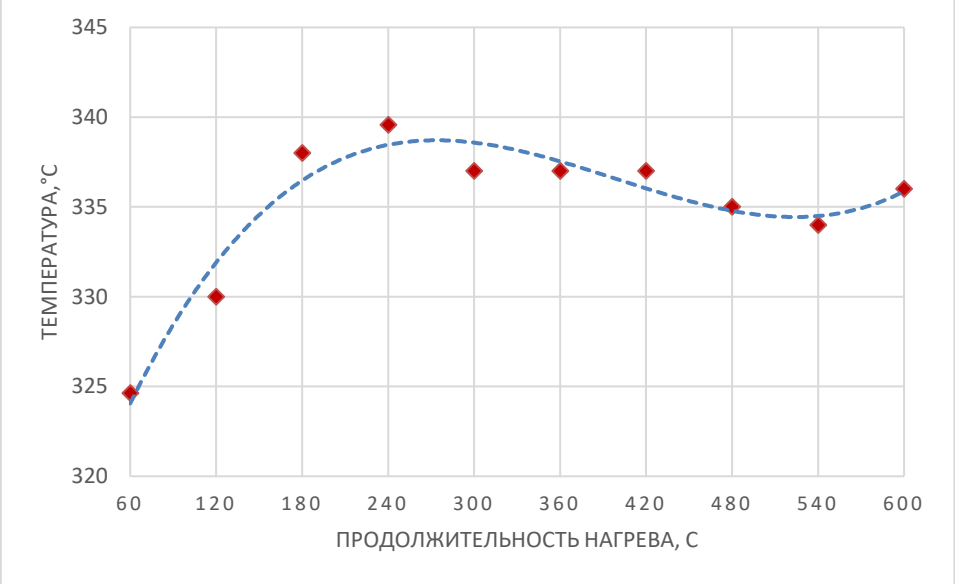



Рисунок 4.6 – Зависимость температуры на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика от продолжительности времени нагрева, восстановленных при помощи огнеупорной пены, нанесенной на обе стороны образцов

$$m_3(\tau) = 3{,}508\ \tau + 0{,}029 \qquad (4.1.6)$$

где $m_3(\tau)$ – потери массы восстановленного трудногорючего стеклопластика при помощи огнеупорной пены, нанесенной на обе стороны испытуемых образцов г.; при 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин, τ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин.

Для зависимости потери массы образца от продолжительности времени высокотемпературного воздействия (рисунок 4.7) коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0{,}979$. Погрешность зависимости 4.1.6 составляет не более 3 %.

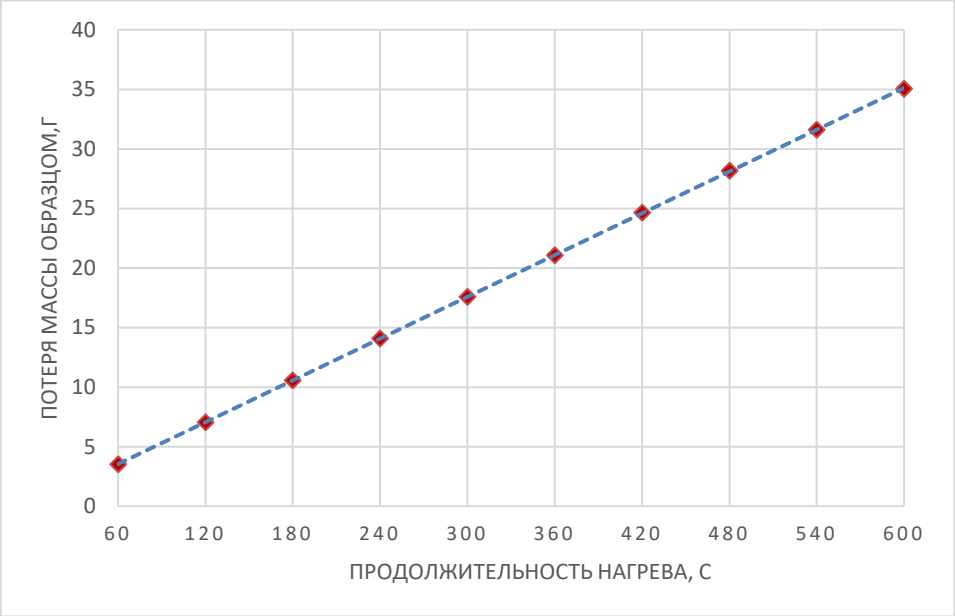



Рисунок 4.7 – Зависимость потери массы восстановленных при помощи огнеупорной пены, нанесенной на обе стороны образцов от продолжительности времени нагрева

В таблице 4.1.10 описаны данные, полученные в ходе проведения исследования. Температура нагревательного элемента испытательной установки соответствовала 725°С. Анализ рисунков 4.6-4.7 и зависимостей 4.1.5-4.1.6 показывает, что в интервале времени с 1 по 3 минуты с момента начала эксперимента происходило интенсивное выделение паровоздушной смеси с поверхности образцов, что привело к их самовоспламенению. Максимальная температура была зафиксирована на 2 минуте и составляла 355,4°С (образец

стеклопластика № 1), а наибольшая потеря массы составила 3,60 грамма (образец стеклопластика № 2) на 7 минуте.

В условии 10 на испытательной установке исследовалась температура на тыльной стороне образцов при тепловом потоке в 13 кВт/м$^2$. Толщина защитного слоя составляла 0,2 мм. Отличительной особенностью условий 10-12 от условий 4-9 является то, что образцы трудногорючего стеклопластика подлежали восстановлению при помощи алюминиевой фольги, толщина которой составляет 0,2 мм. В таблице 4.1.11 представлены основные результаты эксперимента.

Таблица – 4.1.11 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 10)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 49,4±3 | 0,05±0,01 | 50,1±3 | 0,06±0,01 | 48,8±3 | 0,05±0,01 |
| 2. | 120 | 59,2±3 | 0,09±0,01 | 57,7±3 | 0,09±0,01 | 56,4±3 | 0,07±0,01 |
| 3. | 180 | 62,9±3 | 0,14±0,01 | 61,4±3 | 0,13±0,01 | 60,6±3 | 0,12±0,01 |
| 4. | 240 | 65,8±3 | 0,17±0,01 | 62,3±3 | 0,16±0,01 | 63,2±3 | 0,16±0,01 |
| 5. | 300 | 68,4±3 | 0,23±0,01 | 67,5±3 | 0,21±0,07 | 66,6±3 | 0,22±0,01 |
| 6. | 360 | 68,9±3 | 0,29±0,01 | 64,6±3 | 0,25±0,01 | 65,1±3 | 0,27±0,01 |
| 7. | 420 | 70,1±3 | 0,34±0,02 | 69,3±3 | 0,31±0,02 | 68,9±3 | 0,33±0,02 |
| 8. | 480 | 71,1±3 | 0,40±0,02 | 70,9±3 | 0,37±0,02 | 71,2±3 | 0,40±0,02 |
| 9. | 540 | 72,2±3 | 0,47±0,02 | 73,1±3 | 0,44±0,02 | 71,9±3 | 0,47±0,02 |
| 10. | 600 | 73,6±3 | 0,54±0,02 | 72,7±3 | 0,51±0,02 | 73,7±3 | 0,55±0,02 |

В условии 10 на испытательной установке исследовалась температура материалов трудногорючего стеклопластика, восстановленного при помощи алюминиевой фольги толщиной 0,2 мм при тепловом потоке в 13 кВт/м$^2$. В течение 10 минут с момента начала эксперимента не замечено никаких признаков, которые бы характеризовали самовоспламенение образцов. Максимальная температура была зафиксирована на тыльной стороне образцов, которая составила 73,7°С на 10 минуте (образец стеклопластика № 3). Потеря массы образцов незначительна.

Исследования на испытательной установке в условии 11 были схожими с условиями 10, за исключением увеличения плотности теплового потока до 36 кВт/м$^2$. Стоит отметить, что при данных условиях продолжает сохраняться закономерность данных, приведенных в таблице 4.1.11, в соответствии с которой на каждом отрезке времени отсутствуют признаки выделения паровоздушной смеси с поверхности образцов. Потеря массы образцов незначительна.

В условиях 12 на испытательной установке исследовалась температура на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика, восстановленных при помощи алюминиевой фольги. Плотность теплового потока составляла 39 кВт/м$^2$. В таблице 4.1.12 представлены результаты исследования.

Таблица – 4.1.12 Температура на тыльной стороне трудногорючего стеклопластика в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 12)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика № 1 | | Образец стеклопластика № 2 | | Образец стеклопластика № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 139,5±3 | 0,14±0,01 | 138,4±3 | 0,13±0,01 | 137,8±3 | 0,12±0,01 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2. | 120 | 163,2±3 | 0,29±0,01 | 161,7±3 | 0,29±0,01 | 164,5±3 | 0,28±0,01 |
| 3. | 180 | 168,4±3 | 0,46±0,02 | 166,2±3 | 0,43±0,02 | 166,1±3 | 0,44±0,02 |
| 4. | 240 | 171,2±3 | 0,63±0,03 | 170,8±3 | 0,59±0,03 | 173,2±3 | 0,63±0,03 |
| 5. | 300 | 171,5±3 | 0,83±0,04 | 171,2±3 | 0,76±0,04 | 172,7±3 | 0,83±0,04 |
| 6. | 360 | 166,8±3 | 1,02±0,04 | 164,7±3 | 0,95±0,04 | 163,8±3 | 1,02±0,04 |
| 7. | 420 | 167,6±3 | 1,14±0,04 | 165,1±3 | 1,13±0,04 | 168,2±3 | 1,20±0,04 |
| 8. | 480 | 166,5±3 | 1,25±0,05 | 165,5±3 | 1,27±0,05 | 166,1±3 | 1,39±0,05 |
| 9. | 540 | 163,1±3 | 1,37±0,05 | 162,8±3 | 1,42±0,05 | 164,3±3 | 1,56±0,05 |
| 10. | 600 | 164,3±3 | 1,53±0,05 | 161,8±3 | 1,56±0,05 | 160,7±3 | 1,71±0,05 |

Для описания динамики температурных изменений в трудногорючем стеклопластике от продолжительности времени нагрева и потери массы образцов проведена обработка полученных данных рис 4.8-4.9 [185]. Полученные данные по результатам эксперимента обрабатывались с помощью программного пакета Statistica [51, 62, 69, 172, 185].

Указанные зависимости имеют вид:

$$T_4(\tau) = 0{,}243\ \tau^3 - 4{,}911\ \tau^2 + 29{,}571\ \tau + 116{,}55 \qquad (4.1.7)$$

где $T_4(\tau)$ – температура на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика, восстановленных при помощи алюминиевой фольги °С; $\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин.

Зависимость 4.1.7 справедлива для значения 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин. Погрешность зависимости 4.1.7 составляет 9 % [185].

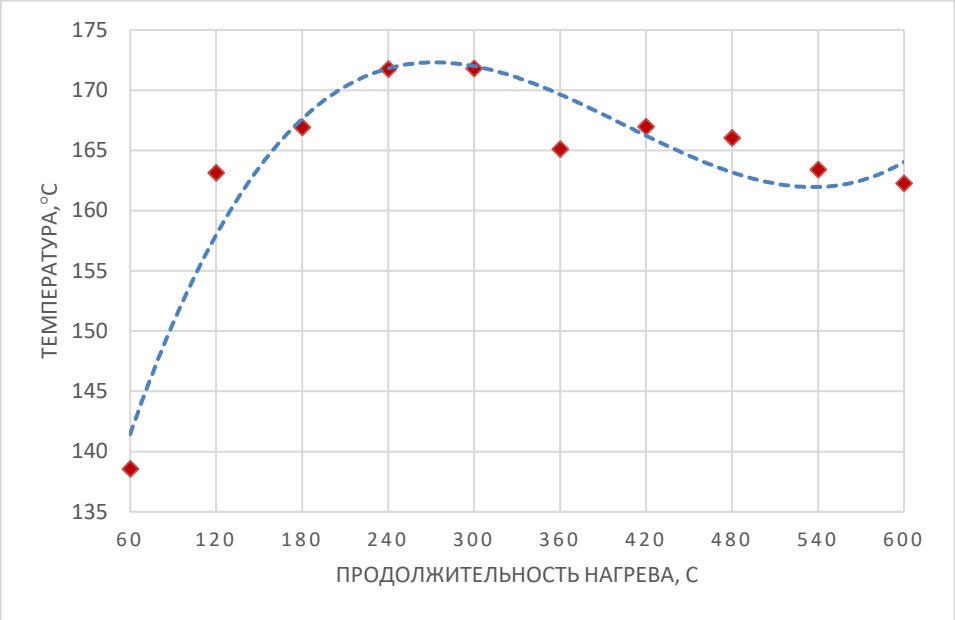



Рисунок 4.8 – Зависимость температуры на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика от продолжительности времени нагрева, восстановленных при помощи алюминиевой фольги

$$m_4(\tau) = 0{,}167\ \tau - 0{,}037 \qquad (4.1.8)$$

где $m_4(\tau)$ – потери массы восстановленного при помощи алюминиевой фольги образцов трудногорючего стеклопластика, г, при 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин, $\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин.

Для зависимости потери массы образца от продолжительности времени высокотемпературного воздействия (рисунок 4.9) коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0{,}993$. Погрешность зависимости 4.1.8 составляет не более 1 %.

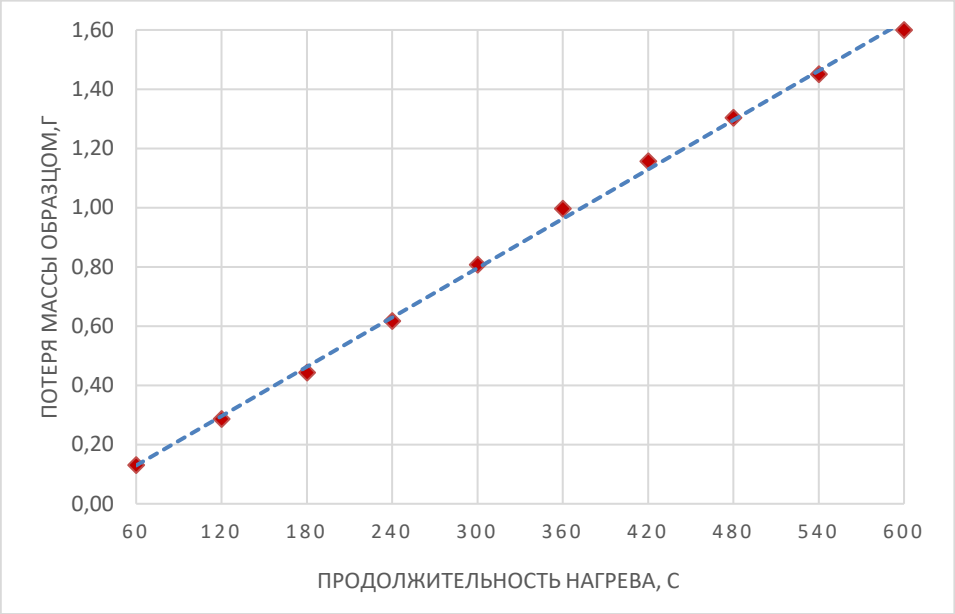



Рисунок 4.9 – Зависимость потери массы образцов, восстановленных при помощи алюминиевой фольги от продолжительности времени нагрева

Анализ рисунков 4.8-4.9 и выражений 4.1.7-4.1.8 показывает, что спустя 4 минуты с момента начала эксперимента происходило изменение защитного слоя фольги (изменение цветовой гаммы). Наибольшая температура была достигнута на 4 минуте и составила 173,2°С (образец стеклопластика № 3). Потеря массы образцов незначительна.

В условии 13 на испытательной установке исследовалась температура на тыльной стороне образцов композиционных материалов на основе кремнийорганического соединения, при тепловом потоке в 13 кВт/м$^2$. В течение 10 минут с момента начала эксперимента не замечено никаких признаков, которые бы характеризовали самовоспламенение образцов. Измерителем-регулятором на поверхности образцов фиксировалась максимальная температура, которая составила 176,7°С на 9 минуте (образец композита № 1). Наибольшая потеря массы образцов составила 0,16 грамм (образец композита № 1) на 1 минуте.

Таблица – 4.1.13 Температура на тыльной стороне композита в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 13)

| № эксперимента | Время, с | Образец композита № 1 | | Образец композита № 2 | | Образец композита № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 112,8±3 | 0,16±0,01 | 110,3±3 | 0,14±0,01 | 109,8±3 | 0,15±0,01 |
| 2. | 120 | 149,3±3 | 0,31±0,01 | 142,5±3 | 0,25±0,01 | 139,4±3 | 0,27±0,01 |
| 3. | 180 | 157,9±3 | 0,46±0,02 | 155,4±3 | 0,36±0,02 | 154,6±3 | 0,42±0,02 |
| 4. | 240 | 167,1±3 | 0,60±0,03 | 168,2±3 | 0,48±0,02 | 166,2±3 | 0,56±0,03 |
| 5. | 300 | 168,4±3 | 0,73±0,03 | 169,5±3 | 0,60±0,03 | 166,6±3 | 0,70±0,03 |
| 6. | 360 | 172,5±3 | 0,87±0,04 | 170,0±3 | 0,72±0,03 | 165,1±3 | 0,85±0,04 |
| 7. | 420 | 173,3±3 | 1,00±0,04 | 171,1±3 | 0,85±0,04 | 168,9±3 | 0,98±0,04 |
| 8. | 480 | 175,3±3 | 1,12±0,05 | 174,9±3 | 0,96±0,04 | 171,2±3 | 1,11±0,05 |
| 9. | 540 | 176,7±3 | 1,26±0,05 | 175,1±3 | 1,07±0,05 | 171,9±3 | 1,23±0,05 |
| 10. | 600 | 176,1±3 | 1,38±0,05 | 172,7±3 | 1,17±0,05 | 173,7±3 | 1,35±0,05 |

Исследования на испытательной установке в условии 14 были схожими с условиями 13, за исключением увеличения плотности теплового потока до 36 кВт/м$^2$, что соответствовало 704°С. В таблице 4.1.14 представлены результаты исследования.

Таблица – 4.1.14 Температура на тыльной стороне композита в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 14)

| № эксперимента | Время, с | Образец композита № 1 | | Образец композита № 2 | | Образец композита № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 240,0±3 | 0,28±0,01 | 241,3±3 | 0,28±0,01 | 239,8±3 | 0,27±0,01 |
| 2. | 120 | 272,9±3 | 0,56±0,02 | 270,5±3 | 0,56±0,02 | 269,4±3 | 0,53±0,02 |
| 3. | 180 | 288,4±3 | 0,84±0,03 | 282,4±3 | 0,83±0,03 | 279,6±3 | 0,79±0,03 |
| 4. | 240 | 286,2±3 | 1,11±0,04 | 285,2±3 | 1,09±0,04 | 284,2±3 | 1,04±0,04 |
| 5. | 300 | 295,2±3 | 1,40±0,05 | 293,5±3 | 1,36±0,05 | 296,6±3 | 1,30±0,05 |
| 6. | 360 | 291,1±3 | 1,68±0,06 | 292,1±3 | 1,62±0,06 | 290,1±3 | 1,58±0,06 |
| 7. | 420 | 296,4±3 | 1,96±0,07 | 295,1±3 | 1,89±0,07 | 293,9±3 | 1,85±0,07 |
| 8. | 480 | 296,3±3 | 2,23±0,08 | 296,9±3 | 2,17±0,08 | 299,8±3 | 2,12±0,08 |
| 9. | 540 | 294,2±3 | 2,49±0,09 | 292,1±3 | 2,42±0,09 | 292,9±3 | 2,38±0,09 |
| 10. | 600 | 299,7±3 | 2,74±0,10 | 298,6±3 | 2,69±0,10 | 297,7±3 | 2,63±0,10 |

В условии 14 наблюдалось отсутствие признаков самовоспламенения образцов на протяжении всего эксперимента. При этом на 8 минуте (образец композита № 3) фиксировалась максимальная температура на тыльной стороне образца равная 299,8 °С, где максимальная потеря массы образца в 0,29 грамм наблюдалась в образце композита № 1 на 5 минуте.

Условия 15 отличались от условий 14 за счет увеличения плотности теплового потока до 39 кВт/м$^2$. В таблице 4.1.15 представлены результаты исследования.

Таблица – 4.1.15 Температура на тыльной стороне композита в зависимости от значения плотности теплового потока и продолжительности времени воздействия (условие 15)

| № эксперимента | Время, с | Образец композита № 1 | | Образец композита № 2 | | Образец композита № 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г | Температура на тыльной стороне образца, °С | Потеря массы образца Δ m, г |
| 1. | 60 | 260,8±3 | 0,30±0,01 | 264,4±3 | 0,29±0,01 | 263,8±3 | 0,29±0,01 |
| 2. | 120 | 303,8±3 | 0,59±0,02 | 301,7±3 | 0,57±0,02 | 300,5±3 | 0,58±0,02 |
| 3. | 180 | 307,1±3 | 0,88±0,03 | 306,2±3 | 0,84±0,03 | 305,1±3 | 0,86±0,03 |
| 4. | 240 | 314,1±3 | 1,15±0,04 | 315,8±3 | 1,10±0,04 | 316,2±3 | 1,15±0,04 |
| 5. | 300 | 317,6±3 | 1,43±0,05 | 318,2±3 | 1,37±0,05 | 318,7±3 | 1,42±0,05 |
| 6. | 360 | 315,0±3 | 1,72±0,06 | 316,7±3 | 1,66±0,06 | 316,8±3 | 1,69±0,06 |
| 7. | 420 | 321,7±3 | 2,00±0,07 | 320,1±3 | 1,91±0,07 | 319,2±3 | 1,98±0,07 |
| 8. | 480 | 314,6±3 | 2,27±0,08 | 324,5±3 | 2,18±0,08 | 317,1±3 | 2,27±0,08 |
| 9. | 540 | 323,0±3 | 2,55±0,09 | 322,8±3 | 2,46±0,09 | 321,3±3 | 2,54±0,09 |
| 10. | 600 | 314,7±3 | 2,83±0,10 | 313,8±3 | 2,73±0,10 | 310,7±3 | 2,81±0,10 |

В условии 15 максимальная температура фиксировалась на 8 минуте (образец композита № 2) и составляла 324,5°С. Наибольшая потеря массы образцов в 0,30 грамм наблюдалась в образце композита № 1 на 1 минуте времени проведения эксперимента.

Для описания динамики изменений температуры при нагреве композиционного материала в зависимости от продолжительности времени воздействия и потери массы образцов проведена обработка полученных данных рис. 4.10-4.11 [76]. Полученные данные по результатам эксперимента обрабатывались с помощью программного пакета Statistica [51, 62, 69, 77, 172, 185].

Указанные зависимости имеют вид:

$$T_5(\tau) = 0{,}128\ \tau^3 - 3{,}172\ \tau^2 + 24{,}702\ \tau + 258{,}51 \qquad (4.1.9)$$

где $T_5(\tau)$ – температура на тыльной стороне образцов композиционного материала на основе кремнийорганического соединения °С; $\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин.

Зависимость 4.1.9 справедлива для значения 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин. Погрешность зависимости 4.1.9 составляет 7 %.

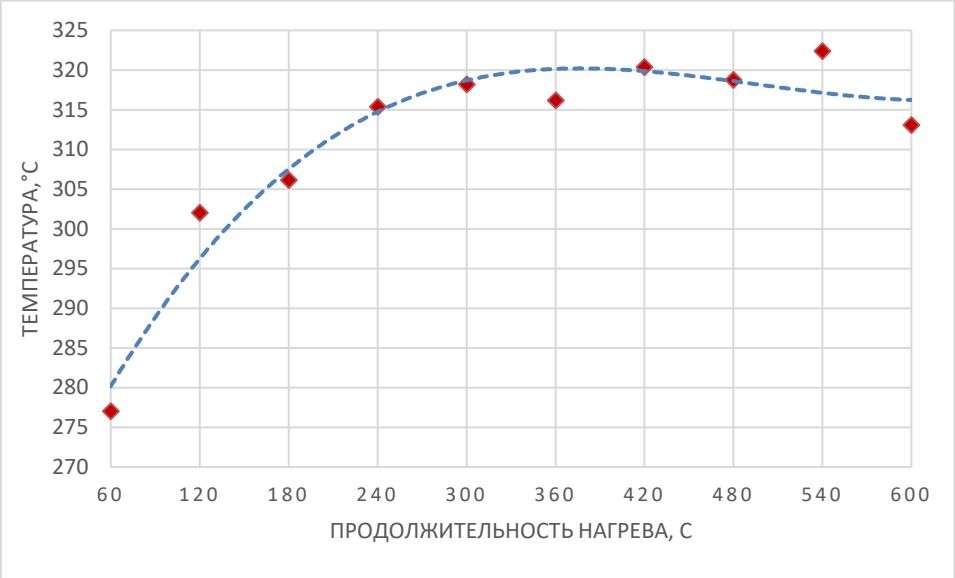



Рисунок 4.10 – Зависимость температуры на тыльной стороне образцов композиционного материала от продолжительности времени нагрева

$$m_5(\tau) = 0{,}277\ \tau + 0{,}020 \qquad (4.1.10)$$

где $m_5(\tau)$ – потери массы образцов композита, г, при 0 мин $\leq \tau \leq$ 10 мин,

$\tau$ – продолжительность времени воздействия теплового потока на этот образец, мин.

Для зависимости потери массы образца от продолжительности времени высокотемпературного воздействия (рисунок 4.11) коэффициент детерминации составляет $R^2 = 1$. Погрешность зависимости 4.1.10 составляет не более 0 %.

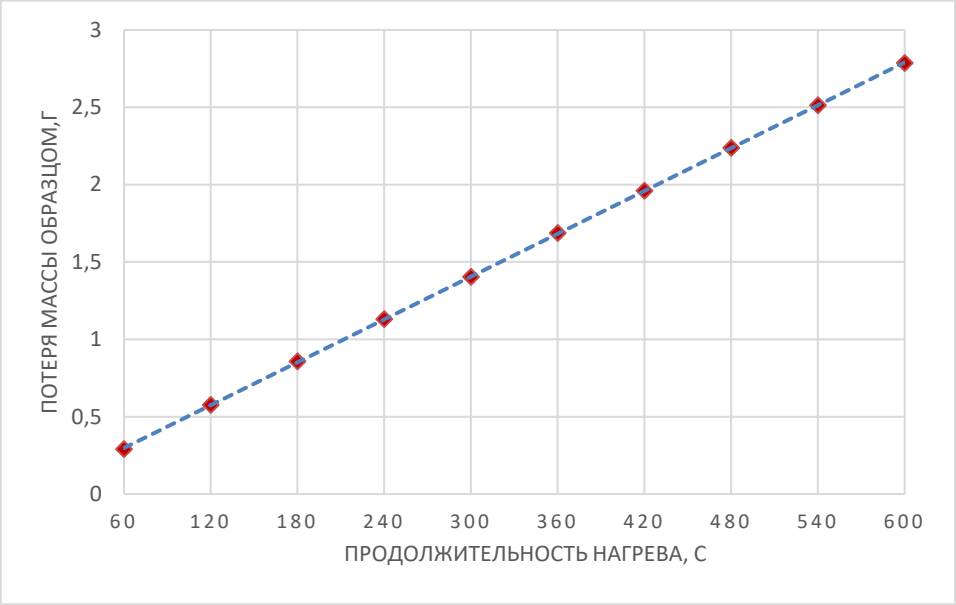



Рисунок 4.11 – Зависимость потери массы образцов композита от продолжительности времени нагрева

На рисунке 4.12 представлены зависимости температуры на тыльной стороне модифицированных (восстановленных) образцов стеклопластика и композиционного материала от продолжительности времени нагрева при различных условиях.

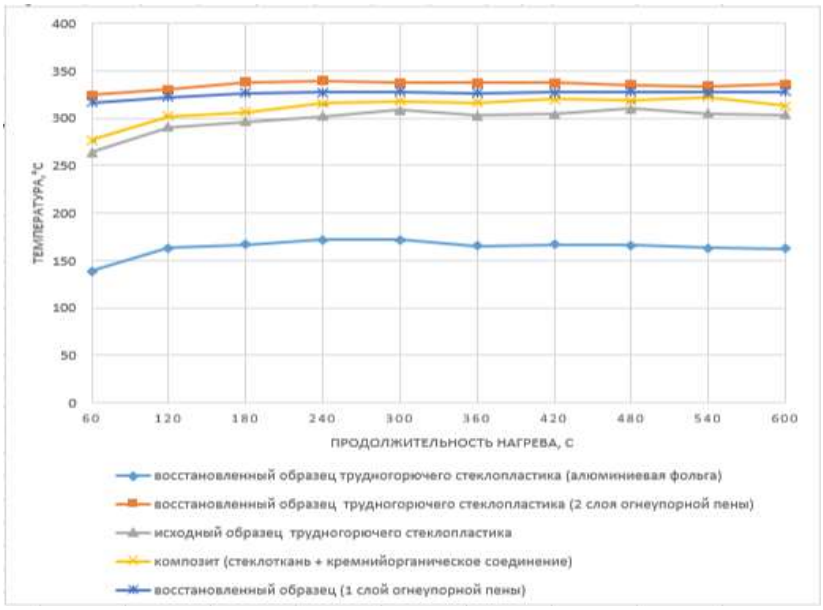



Рисунок 4.12 – Зависимости температуры на тыльной стороне образцов трудногорючего стеклопластика и композиционного материала от продолжительности времени нагрева в зависимости от способа модификации

На рисунке 4.13 представлены потери массы модифицированных (восстановленных) образцов трудногорючего стеклопластика и композиционного материала от продолжительности времени нагрева при различных условиях.

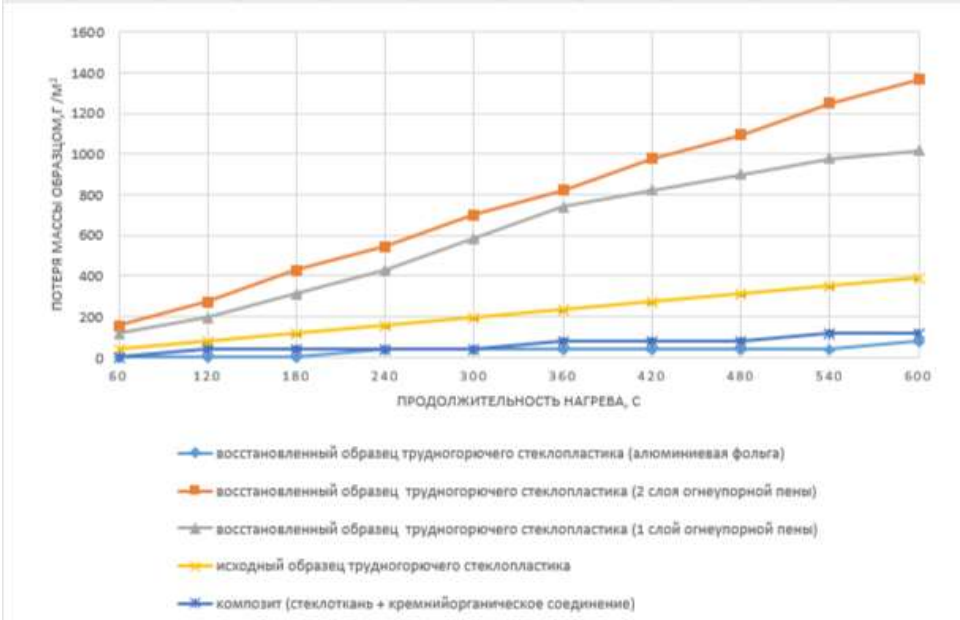



Рисунок 4.13 – Зависимости потери массы образцов трудногорючего стеклопластика и композиционного материала от продолжительности времени нагрева в зависимости от способа модификации

В таблице 4.1.16 в обобщенном виде представлены регрессионные уравнения экспериментов с соответствующими коэффициентами детерминации.

Таблица – 4.1.16 Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации для экспериментов

| Эксперимент | Уравнение регрессии | Коэффициент детерминации, $R^2$ |
|---|---|---|
| Стеклопластик | $T_1(\tau) = 0{,}196\,\tau^3 - 4{,}270\,\tau^2 + 29{,}406\,\tau + 241{,}92$ | 0,935 |
| | $m_1(\tau) = 1{,}009\,\tau - 0{,}252$ | 0,999 |
| Стеклопластик + слой огнеупорной пены | $T_2(\tau) = 0{,}079\tau^3 - 1{,}590\tau^2 + 9{,}994\tau + 307{,}95$ | 0,972 |
| | $m_2(\tau) = 2{,}759\,\tau + 0{,}350$ | 0,979 |
| | $T_3(\tau) = 0{,}117\,\tau^3 - 2{,}347\,\tau^2 + 14{,}067\,\tau + 312{,}22$ | 0,934 |

| | | |
|---|---|---|
| Стеклопластик + 2 слоя огнеупорной пены | $m_3(\tau) = 3{,}508\ \tau + 0{,}029$ | 0,979 |
| Стеклопластик + алюминиевая фольга | $T_4(\tau) = 0{,}243\ \tau^3 - 4{,}911\ \tau^2 + 29{,}571\ \tau + 116{,}55$ | 0,911 |
| | $m_4(\tau) = 0{,}167\ \tau - 0{,}037$ | 0,993 |
| Композиционный материал на основе кремнийорганического соединения | $T_5(\tau) = 0{,}128\ \tau^3 - 3{,}172\ \tau^2 + 24{,}702\ \tau + 258{,}51$ | 0,939 |
| | $m_5(\tau) = 0{,}277\ \tau + 0{,}020$ | 1 |

Таким образом, проведенные стендовые испытания с образцами трудногорючего стеклопластика показали его способность противостоять длительное время 10 минут и более высоким температурам. Однако при плотности теплового потока 39 кВт/м$^2$ наблюдалось самовоспламенение образцов при этом температура нагревательного элемента испытательной установки соответствовала 725°С.

Модификация огнезащитного полотна посредством нанесения огнеупорной пены как с одной, так и с двух сторон показала себя не достаточно надежной, поскольку при высоких температурах 337,1°С и 355,4°С при 39 кВт/м$^2$ соответственно наблюдается ее выгорание и существенная потеря массы каждого из образцов от 1 до 4 грамм при соответствующих размерах, определенных в ГОСТе [27]. Затем был предложен способ восстановления поврежденных участков при помощи алюминиевой фольги. Стоит отметить, что температура на тыльной стороне образцов снижается более чем в три раза по отношению к образцам, подлежащим модификации посредством нанесения на их поверхности огнеупорной пены и составляет 73,7°С (с нанесением одного слоя пены – 206,3°С; с нанесением двух слоев пены – 213,9°С) и в 2,5 раза в случае если образцы не подвергаются восстановлению (исходные образцы) при 13 кВт/м$^2$. В свою очередь при плотности теплового потока в 39 кВт/м$^2$ температура на тыльной стороне восстановленных образцов алюминиевой фольгой по отношению к образцам, подлежащим модификации посредством нанесения огнеупорной пены на одну и на

обе стороны снижается в два раза и составляет 173,2°С; при обработке пеной поверхности образцов в 1 слой – 337,1°С и 355,4°С при нанесении на обе стороны образцов. Таким образом, по имеющимся экспериментальным данным можно сделать вывод об эффективности алюминиевой фольги в качестве модификации образца трудногорючего стеклопластика, для сопротивления тепловому потоку. Однако применять защиту трудногорючего стеклопластика на практике при помощи алюминиевой фольги является нецелесообразным, поскольку процесс соединения фольги и основы сложен технологически, а полученное покрытие не устойчиво к внешним механическим повреждениям. Трудногорючий стеклопластик как в исходном своем состоянии, так и после модификации в ходе проведения стендовых испытаний показал, что его применение в качестве полотна для защиты от низовых ландшафтных пожаров является ненадежным и способствует дальнейшему переходу огня за противопожарную преграду с последующим возгоранием сухой травянистой растительности. В связи с чем было дополнительно проведено исследование, где в качестве огнезащитного материала было предложено использовать композиционный материал из стеклоткани с кремнийорганическим соединением. В условиях 13-15 испытаниям подвергались образцы композиционного материала на основе кремнийорганического соединения при ранее описанных значениях теплового потока. Необходимо отметить, что при каждом значении теплового потока самовоспламенения образцов не фиксировалось на протяжение всего хода эксперимента. Максимальная потеря массы образцов была отмечена в образце стеклопластика № 1, что составило 0,29 грамм. Относительная погрешность измерений, проведенных экспериментов составила не более 5 % при доверительной вероятности 0,95.

## 4.2 Определение поведения противопожарной преграды для защиты от ландшафтных пожаров в условиях огневых испытаний

Целью данного исследования являлось определение способности огнезащитного полотна трудногорючего стеклопластика и композиционного материала в течение 8 минут противостоять открытому пламенному горению сухой травянистой растительности низового ландшафтного пожара, а также в определение максимальной температуры на тыльной стороне огнезащитного полотна, создаваемой открытым пламенным горением и плотностью теплового потока. Полученные эмпирическим путем значения температуры на тыльной стороне полотна сравнивались с температурой возгорания сухой травы. Тем самым проверялась возможность использования устройства для защиты от ландшафтных пожаров. Если температура ниже критического значения 333 °С [150], то испытуемое устройство применять возможно [89]. Если это значение выше, то устройство требует доработки. Огневые испытания проводились неоднократно для определения средней температуры на тыльной стороне второго ската полотна с разными вариациями тестовых очагов, в которых применялась различная горючая нагрузка в целях создания наихудших сценариев возможного развития ландшафтного пожара. В целях создания условий близких к реальным в условиях воздействия постоянных воздушных потоков применялась установка STAGE 4 PASSAT 120 DMX, с помощью которой существенно возрастала скорость распространения и интенсивность пожара, а также изменение его направления. Для измерения скорости воздуха при проведении огневых испытаний на открытом пространстве использовался анемометр портативный акустический АПА – 1/3 [89, 136].

В условиях 1-3 использовался тестовый очаг пожара ТОП – 1. Скорость ветра по шкале Бофорта соответствовала 10-12 м/с. Для условий 4-8 был предложен очаг пожара ТОП – 2, ранее описанный в разделе 2.2.3. Сила воздействия воздушных потоков на скорость распространения горения составляла 10-12 м/с, что является сильным ветром по шкале Бофорта. В условии 7 огневому испытанию подлежало огнезащитное полотно,

выполненное из стеклоткани и нанесенной на ее поверхность кремнийорганического соединения [89].

В условии 8 исследовалось огнезащитное двухскатное полотно, выполненное из стеклоткани и нанесенной на ее поверхность кремнийорганического соединения [89]. Исходные данные для проведения эксперимента приведены в таблице 4.2.1.

Таблица – 4.2.1 Исходные данные (условия) для проведения эксперимента

| Вид условия | Вид тестового очага | Вид горючей нагрузки | Тип материала / покрытие |
|---|---|---|---|
| Условие 1 | ТОП-1 | Сухая травянистая растительность | РСТ-250 |
| Условие 2 | ТОП-1 | Сухая солома | РСТ-250 |
| Условие 3 | ТОП-1 | Комбинация (небольшие кустарники, шишки, опавшие ветки деревьев, иголки елок) | РСТ-250 |
| Условие 4 | ТОП-2 | Сухая травянистая растительность | РСТ-250 |
| Условие 5 | ТОП-2 | Сухая солома | РСТ-250 |
| Условие 6 | ТОП-2 | Комбинация (небольшие кустарники, шишки, опавшие ветки деревьев, иголки елок) | РСТ-250 |
| Условие 7 | ТОП-2 | Комбинация (сухая травянистая растительность, сухая солома, небольшие кустарники, шишки, опавшие ветки деревьев, иголки елок) | Стеклоткань / кремнийорганическое соединение |
| Условие 8 | ТОП-2 | Комбинация (сухая травянистая растительность, сухая солома, небольшие | Стеклоткань / кремнийорганическое соединение |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | кустарники, шишки, опавшие ветки деревьев, иголки елок) | |

Для создания ТОП – 1 использовалось решетчатое основание размерами 0,5×0,5×0,005 м. В целях имитации ландшафтного пожара на указанное основание равномерно раскладывалась различная горючая нагрузка в 7 слоев, влажностью W = 17 % по ОСТ 10243-2000 [101]. В качестве источника воспламенения горючего материала служили 5 мл бензина АИ – 92, налитого в емкость диаметром 0,05 м, которая устанавливалась в центре основания ТОП – 1 [74, 76]. При помощи открытого источника зажигания осуществлялось поджигание горючего материала ТОП – 1. В этот момент включался секундомер, и начиналось проведение эксперимента. Перед началом проведения испытаний огнезащитный материал на люверсах при помощи хомутов закреплялся под углом 30° к ТОП – 1 на стальной подставке [108]. Во время проведения испытаний температура с тыльной стороны огнезащитного полотна контролировалась тепловизором каждые 30 с, а также проводился замер теплового потока при помощи прибора ИПП-2. Температура воздуха 20 °С [76, 136].

Условие 1. В рамках данного исследования применялся ранее описанный тестовый очаг с горючей нагрузкой в виде сухой травянистой растительности. В качестве огнезащитного полотна применялся трудногорючий стеклопластик. Скорость ветра 10-12 м/с. Результаты изменения среднего значения температуры и плотности теплового потока в условиях 1 представлены в таблице 4.2.2.

Таблица – 4.2.2 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 1)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 450,0±15 | 892±36 |
| 3. | 60 | 550,0±19 | 987±42 |
| 4. | 90 | 475,0±16 | 763±39 |
| 5. | 120 | 350,0±8 | 546±28 |
| 6. | 150 | 364,0±12 | 465±22 |
| 7. | 180 | 304,0±7 | 498±22 |
| 8. | 210 | 346,0±8 | 432±21 |
| 9. | 240 | 312,0±7 | 398±19 |
| 10. | 270 | 300,0±7 | 356±18 |
| 11. | 300 | 223,0±5 | 347±18 |
| 12. | 330 | 199,0±4 | 288±14 |
| 13. | 360 | 237,0±5 | 276±13 |
| 14. | 390 | 244,0±5 | 232±11 |
| 15. | 420 | 178,0±4 | 201±9 |
| 16. | 450 | 175,0±4 | 198±7 |
| 17. | 480 | 163,0±3 | 99±4 |

Анализ полученных данных таблицы 4.2.2 показал, что максимальная температура на тыльной стороне огнезащитного полотна из трудногорючего стеклопластика составила 550 °С на первой минуте проведения эксперимента, что соответствовало плотности теплового потока (Q) - 987 Вт/м$^2$. На протяжении всего времени испытания отмечалось выделение паровоздушной смеси, а также изменение цветовой гаммы слоя эпоксидной смолы [162].

Следующее измерение температуры на тыльной стороне огнезащитного полотна и определение плотности теплового потока исследовалось в условии 2. Условие 2 отличное от условия 1 тем, что происходит замена горючей нагрузки на сухую солому. Скорость ветра 10-12 м/с. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.2.3.

Таблица – 4.2.3 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 2)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 138,0±3 | 142±7 |
| 3. | 60 | 315,0±7 | 415±18 |
| 4. | 90 | 414,0±14 | 578±21 |
| 5. | 120 | 370,0±13 | 456±19 |
| 6. | 150 | 239,0±5 | 231±12 |
| 7. | 180 | 282,0±6 | 287±15 |
| 8. | 210 | 254,0±6 | 243±11 |
| 9. | 240 | 198,0±4 | 187±9 |
| 10. | 270 | 191,0±4 | 173±8 |
| 11. | 300 | 179,0±4 | 168±7 |
| 12. | 330 | 141,0±3 | 129±6 |
| 13. | 360 | 130,0±3 | 118±6 |
| 14. | 390 | 119,0±2 | 109±5 |
| 15. | 420 | 104,0±2 | 89±4 |
| 16. | 450 | 93,0±2 | 81±3 |
| 17. | 480 | 91,5±2 | 76±3 |

В таблице 4.2.3 показаны данные, полученные в ходе проведения эксперимента. Максимальная температура на тыльной стороне полотна достигается в интервале времени между первой и вторыми минутами наблюдения. По истечении 8 минут эксперимента самовоспламенения материала не произошло. В целом стоит отметить, что при горении сухой соломы показатели температур и плотности теплового потока тыльной стороны полотна по отношению к условиям 1 несколько ниже. Данный факт можно объяснить за счет того, что сухая солома имеет более утолщенные стержни и плотность прорастания на поверхности земли. Для условия 3 использовалась горючая нагрузка в виде верхнего слоя лесной подстилки (небольшие кустарники, шишки, опавшие ветки деревьев, иголки елок). Скорость ветра 10-12 м/с. Данные, полученные по результатам эксперимента, отражены в таблице 4.2.4.

Анализируя результаты измерений, отраженные в таблицах 4.2.2-4.2.4 необходимо сделать вывод о том, что при каждом из условий испытаний происходило выделение паровоздушной смеси с поверхности образца, однако, самовоспламенение трудногорючего стеклопластика не произошло ни в одном из экспериментов. Максимальная температура тыльной стороны образца зафиксирована при тепловом потоке в 987 Вт/м$^2$ и составляла 550°С на 1 минуте эксперимента.

Таблица – 4.2.4 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 3)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 355,3±12 | 418±14 |
| 3. | 60 | 401,1±14 | 443±18 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 4. | 90 | 399,2±14 | 428±21 |
| 5. | 120 | 340,0±8 | 387±19 |
| 6. | 150 | 374,0±13 | 399±12 |
| 7. | 180 | 367,0±13 | 371±15 |
| 8. | 210 | 334,0±7 | 356±11 |
| 9. | 240 | 318,0±7 | 288±9 |
| 10. | 270 | 299,8±7 | 267±8 |
| 11. | 300 | 213,0±5 | 211±7 |
| 12. | 330 | 202,0±4 | 201±6 |
| 13. | 360 | 199,0±4 | 176±6 |
| 14. | 390 | 200,0±4 | 181±5 |
| 15. | 420 | 154,0±3 | 132±4 |
| 16. | 450 | 140,0±3 | 110±3 |
| 17. | 480 | 83,0±2 | 63±3 |

В условии 4 применялся ТОП – 2. Площадь очага открытого пламенного горения составляла 4 м$^2$ [89]. Скорость ветра 10-12 м/с. Результаты измерения среднего значения температуры и плотности теплового потока образцов в условии 4 представлены в таблице 4.2.5.

Таблица – 4.2.5 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 4)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 21,3±2 | 42±2 |
| 3. | 60 | 27,8±2 | 51±2 |
| 4. | 90 | 28,2±2 | 54±2 |
| 5. | 120 | 29,2±2 | 55±2 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 6. | 150 | 29,7±2 | 55±2 |
| 7. | 180 | 28,3±2 | 52±2 |
| 8. | 210 | 30,9±2 | 62±3 |
| 9. | 240 | 38,7±2 | 76±3 |
| 10. | 270 | 177,0±4 | 134±6 |
| 11. | 300 | 210,0±4 | 167±7 |
| 12. | 330 | 365,0±12 | 372±14 |
| 13. | 360 | 284,0±6 | 301±14 |
| 14. | 390 | 250,0±5 | 223±9 |
| 15. | 420 | 140,0±3 | 111±5 |
| 16. | 450 | 200,0±4 | 187±7 |
| 17. | 480 | 180,0±4 | 145±5 |

Анализируя полученные данные из таблицы 4.2.5 необходимо отметить постепенный рост температуры на тыльной стороне огнезащитного полотна. Начиная с 4 минуты отчетливо наблюдается рост температуры, где на 5 минуте 30 секундах она достигает своего максимума, но при этом наибольшая плотность теплового потока фиксируется при температурах 210 и 365°С соответственно. Отмечается самовоспламенение поверхности образца при непосредственном контакте с открытым пламенным горением, что приводит к его возгоранию и по мере затухания (удаления) источника зажигания самостоятельное горение образца прекращается.

Таблица – 4.2.6 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 5)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 20,1±2 | 42±2 |
| 3. | 60 | 26,5±2 | 51±2 |
| 4. | 90 | 27,7±2 | 54±2 |
| 5. | 120 | 31,2±2 | 55±2 |
| 6. | 150 | 43,7±2 | 55±2 |
| 7. | 180 | 50,2±2 | 52±2 |
| 8. | 210 | 49,4±2 | 62±3 |
| 9. | 240 | 100,8±2 | 76±3 |
| 10. | 270 | 192,0±4 | 154±6 |
| 11. | 300 | 215,0±5 | 177±7 |
| 12. | 330 | 289,0±6 | 297±14 |
| 13. | 360 | 314,0±7 | 321±14 |
| 14. | 390 | 345,0±8 | 364±12 |
| 15. | 420 | 305,2±7 | 312±10 |
| 16. | 450 | 198,0±4 | 167±7 |
| 17. | 480 | 190,0±4 | 165±8 |

Для условия 5 использовалась горючая нагрузка в виде сухой соломы, равномерно разложенной по поверхности земли на площади 4 м$^2$ с целью имитации природного пожара, распространяющегося по фронту. Скорость ветра 10-12 м/с. Данные, полученные по результатам эксперимента, отражены в таблице 4.2.6.

По данным таблицы 4.2.6 отмечается похожая ситуация, как и в условии 4, а именно, постепенный рост температуры тыльной стороны огнезащитного полотна. С 4 минут 30 секунд по 7 минуту фиксируется наибольшая температура на тыльной стороне образца трудногорючего стеклопластика, которой соответствует плотность теплового потока 364 Вт/м$^2$. Также как и в условии 4 отмечается самовоспламенение поверхности образца при непосредственном контакте с открытым пламенным горением, что приводит к его возгоранию.

Условию 6 соответствовала горючая нагрузка в виде верхнего слоя лесной подстилки (небольшие кустарники, шишки, опавшие ветки деревьев, иголки елок)

на площади 4 м$^2$. Скорость ветра 10-12 м/с. Результаты эксперимента отражены в таблице 4.2.7.

Таблица – 4.2.7 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 6)

| № эксперимента | Время, с | Образец стеклопластика | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 23,2±2 | 41±2 |
| 3. | 60 | 24,6±2 | 53±2 |
| 4. | 90 | 29,3±2 | 55±2 |
| 5. | 120 | 30,1±2 | 56±2 |
| 6. | 150 | 45,5±2 | 55±2 |
| 7. | 180 | 49,6±2 | 56±2 |
| 8. | 210 | 52,7±2 | 61±3 |
| 9. | 240 | 102,3±2 | 74±3 |
| 10. | 270 | 198,0±4 | 167±6 |
| 11. | 300 | 229,0±5 | 189±7 |
| 12. | 330 | 293,0±6 | 261±12 |
| 13. | 360 | 332,0±7 | 325±14 |
| 14. | 390 | 374,0±13 | 357±12 |
| 15. | 420 | 310,1±7 | 287±10 |
| 16. | 450 | 188,0±4 | 146±7 |
| 17. | 480 | 153,0±3 | 129±8 |

Анализ полученных данных из таблицы 4.2.7 показал равномерный рост температуры на тыльной стороне огнезащитного полотна. В интервале времени с 4 по 6 минуты наблюдается рост плотности теплового потока. Происходит самовоспламенение поверхности образца при непосредственном контакте с

открытым пламенным горением, что приводит к его возгоранию, что схоже с условиями 4 и 5.

Таблица – 4.2.8 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 7)

| № эксперимента | Время, с | Образец композита | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 45,0±2 | 41±2 |
| 3. | 60 | 49,1±2 | 53±2 |
| 4. | 90 | 51,9±2 | 55±2 |
| 5. | 120 | 54,4±2 | 56±2 |
| 6. | 150 | 60,1±2 | 55±2 |
| 7. | 180 | 130,0±3 | 113±6 |
| 8. | 210 | 285,0±6 | 264±10 |
| 9. | 240 | 299,4±7 | 275±12 |
| 10. | 270 | 174,0±4 | 163±6 |
| 11. | 300 | 137,0±3 | 113±5 |
| 12. | 330 | 97,5±2 | 87±4 |
| 13. | 360 | 92,2±2 | 82±4 |
| 14. | 390 | 90,8±2 | 79±4 |
| 15. | 420 | 85,4±2 | 76±3 |
| 16. | 450 | 75,2±2 | 65±3 |
| 17. | 480 | 58,9±2 | 49±2 |

В условии 7 применялся ТОП – 2, где огневому испытанию подлежало огнезащитное полотно, выполненное из стеклоткани и нанесенного на ее поверхность кремнийорганического соединения. Температура воздуха составляла 20 °С. Скорость ветра 10-12 м/с.

В таблице 4.2.8 приведены эмпирические данные по результатам испытаний. По данным таблицы 4.2.8 температура повышается быстрее, чем в условиях 5 и 6 (табл. 4.2.6 и 4.2.7). Данный факт объясняется тем, что кремнийорганическое покрытие имеет окраску черного цвета. На протяжении всего времени проведения эксперимента самовоспламенения огнезащитного полотна не происходит.

В условии 8 применялся ТОП – 2, где огневому испытанию подлежало двухскатное огнезащитное полотно, выполненное из стеклоткани и нанесенной на ее поверхность кремнийорганического соединения. Температура воздуха составляла 20 °С. Скорость ветра 10-12 м/с.

Таблица – 4.2.9 Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна и значение плотности теплового потока в зависимости от продолжительности времени воздействия открытого огня (условие 8)

| № эксперимента | Время, с | Образец композита | |
|---|---|---|---|
| | | Температура на тыльной стороне образца, °С | Плотность теплового потока Q, Вт/м$^2$ |
| 1. | 0 | 20,0±2 | 0±0 |
| 2. | 30 | 26,6±2 | 22±1 |
| 3. | 60 | 31,0±2 | 28±1 |
| 4. | 90 | 50,5±2 | 47±2 |
| 5. | 120 | 54,0±2 | 51±2 |
| 6. | 150 | 59,1±2 | 53±2 |
| 7. | 180 | 72,0±2 | 63±3 |
| 8. | 210 | 96,0±2 | 76±4 |
| 9. | 240 | 122,0±2 | 111±5 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 10. | 270 | 112,0±2 | 103±5 |
| 11. | 300 | 87,0±2 | 68±3 |
| 12. | 330 | 82,0±2 | 64±3 |
| 13. | 360 | 63,3±2 | 56±2 |
| 14. | 390 | 52,1±2 | 50±2 |
| 15. | 420 | 47,0±2 | 48±2 |
| 16. | 450 | 22,9±2 | 19±1 |
| 17. | 480 | 21,1±2 | 19±1 |

В таблице 4.2.9 представлены данные по результатам эксперимента. По данным таблицы 4.2.9 наблюдается незначительный рост температуры, чем в условиях 5, 6 и 7 (табл. 4.2.6, 4.2.7, 4.2.8). Данный факт объясняется тем, что кремнийорганическое покрытие в данном эксперименте имело окраску белого цвета и применение двухскатного полотна снижает температуру на тыльной стороне второго ската более чем в два раза. На протяжение всего времени проведения эксперимента самовоспламенения огнезащитного полотна не происходит.

Таким образом, проведенные огневые испытания с образцами трудногорючего стеклопластика показали его способность противостоять длительное время (8 минут и более) высоким температурам. Однако стоит заметить, что в условиях 1-3 применялся ТОП – 1, что существенно снижало воздействие открытого пламенного горения на экспонируемую поверхность полотна за счет конструктивного исполнения тестового очага. Применения данного очага в виде предложенной конструкции не дает в полной мере понимания воздействия пламени на огнезащитное полотно, чем ставит под вопрос адекватность выбора материала для использования его в виде ограждающей конструкции поскольку такой очаг имеет низкое тепловыделение.

Для создания наихудших условий, которые бы соответствовали реальному ландшафтному пожару, был выбран ТОП – 2 [89]. Стоит отметить, горючая нагрузка для крупных лесных пожаров по мнению автора публикации [170]

составляет 5-10 кг/м$^2$. В нашем случае горючая нагрузка была равномерно разложена на площади 4 м$^2$, где на 1 м$^2$ площади приходится 1 кг горючей нагрузки, прилегающей вплотную к устройству для ограничения распространения ландшафтного пожара [89]. Используемое огнезащитное полотно из трудногорючего стеклопластика (условия 4-6) также не является эффективным, поскольку при подходе пламени к поверхности материала последнее частично воспламеняется и поддерживает непродолжительное горение, чем поспособствует переходу огня на второй скат полотна с возможным последующим возгоранием сухой травянистой растительности.

Модификация огнезащитного полотна посредством нанесения на поверхность материала стеклоткани кремнийорганического соединения показала себя достаточно надежной, поскольку при температуре факела пламени в пределах 500-560°С самовоспламенение материала не происходит, что свидетельствует о возможности его применения для локализации ландшафтного пожара. В условии 7 на 4 минуте проведения эксперимента зафиксирована наибольшая температура тыльной стороны огнезащитного полотна 299,4 °С, что в свою очередь ниже критического значения возгорания сухой травы 333 °С, однако максимальное значение 299,4°С близко к критическому значению возгоранию сухой травы 333°С, что ставит под сомнение применение односкатного полотна противопожарной преграды при определенных условиях. Для этого был проведен дополнительный эксперимент (условие 8) с двухскатным полотном из кремнийорганического соединения по результатам которого максимальная температура тыльной стороны составила 122°С [89, 150]. Относительная погрешность измерений, проведенных экспериментов составила не более 5 % при доверительной вероятности 0,95.

**Результаты статистической обработки данных.**

Проведем проверку адекватности разработанной математической модели по критерию Фишера. Результаты экспериментальных данных представлены в таблице 4.2.10. Применяемые данные эксперимента отражены в разделе 4.2.

Таблица 4.2.10 – Экспериментальные данные для проверки адекватности математической модели

| № эксперимента | Время, с | Температура на тыльной стороне огнезащитного полотна из композиционного материала, °С |
|---|---|---|
| 1. | 0 | 20,0±2 |
| 2. | 30 | 45,0±2 |
| 3. | 60 | 49,1±2 |
| 4. | 90 | 51,9±2 |
| 5. | 120 | 54,4±2 |
| 6. | 150 | 60,1±2 |
| 7. | 180 | 130,0±3 |
| 8. | 210 | 285,0±6 |
| 9. | 240 | 299,4±7 |
| 10. | 270 | 174,0±4 |
| 11. | 300 | 137,0±3 |
| 12. | 330 | 97,5±2 |
| 13. | 360 | 92,2±2 |
| 14. | 390 | 90,8±2 |
| 15. | 420 | 85,4±2 |
| 16. | 450 | 75,2±2 |
| 17. | 480 | 58,9±2 |

Сопоставим результаты расчета среднего значения температуры, полученной экспериментальным путем и расчетным, данные сведены в таблицу 4.2.11.

Таблица 4.2.11 – Экспериментальные и расчетные данные для проверки адекватности математической модели

| Время, с | Температура на тыльной стороне образца огнезащитного полотна из композиционного материала, °С | |
|---|---|---|
| | Эксперимент | Расчет |
| 0 | 20,0±2 | 20 |
| 30 | 45,0±2 | 20 |
| 60 | 49,1±2 | 20 |
| 90 | 51,9±2 | 20 |
| 120 | 54,4±2 | 20 |
| 150 | 60,1±2 | 20 |
| 180 | 130,0±3 | 260 |
| 210 | 285,0±6 | 274 |
| 240 | 299,4±7 | 275 |
| 270 | 174,0±4 | 171,9 |
| 300 | 137,0±3 | 109,7 |
| 330 | 97,5±2 | 79,2 |
| 360 | 92,2±2 | 64,3 |
| 390 | 90,8±2 | 57,0 |
| 420 | 85,4±2 | 53,4 |
| 450 | 75,2±2 | 51,6 |
| 480 | 58,9±2 | 50,8 |

На рисунке 4.2 графически показаны значения температуры на тыльной стороне образца огнезащитного полотна из композиционного материала, полученные экспериментальным и расчетным путем.

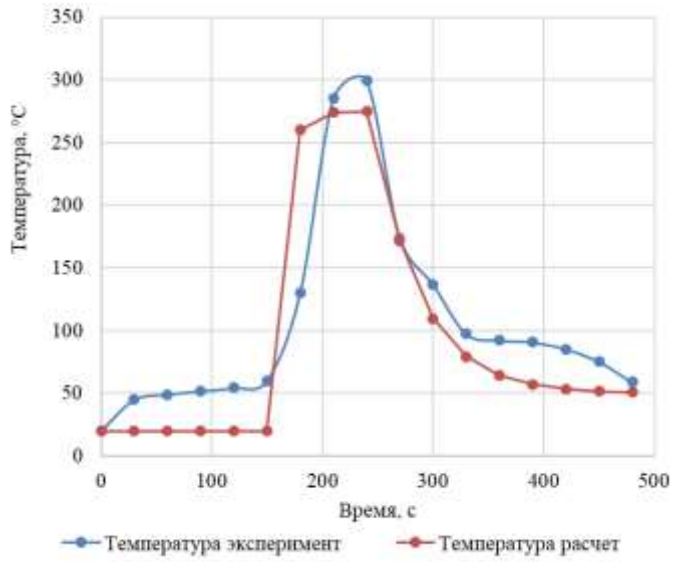



Рисунок 4.2 – Значения температуры на тыльной стороне огнезащитного полотна из композиционного материала

Из рисунка 4.2 видно, что значения близки, что подтверждает адекватность работы. Проверку адекватности математической модели проведем по критерию Фишера [138].

Значение критерия Фишера определяется отношением остаточной дисперсии к общей дисперсии опытов по формуле (4.2.1):

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \tag{4.2.1}$$

где: $\sigma_1^2$ –дисперсия экспериментальных данных;

$\sigma_2^2$ – дисперсия расчетных данных.

Определяются по формулам (4.2.2) и (4.2.3):

$$\sigma_1^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N}\left(x_{\text{эксп}.i} - \overline{x_{\text{эксп}}}\right)^2}{n-1}; \tag{4.2.2}$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N}\left(x_{\text{расч}.i} - \overline{x_{\text{расч}}}\right)^2}{n-1}, \tag{4.2.3}$$

где: n – количество опытов;

$\overline{x_{\text{эксп}}}$, $\overline{x_{\text{расч}}}$, – среднее значение функции отклика (4.2.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i. \quad (4.2.4)$$

Результаты расчета значения критерия Фишера сведены в таблицу 4.2.12.

Таблица 4.2.12 – Расчетные данные по формулам (4.2.2)-(4.2.3)

| Время, с | Температура | | $\sigma_1^2$ | $\sigma_2^2$ |
|---|---|---|---|---|
| | Эксперимент | Расчет | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0 | 20,0±2 | 20 | | |
| 30 | 45,0±2 | 20 | | |
| 60 | 49,1±2 | 20 | | |
| 90 | 51,9±2 | 20 | | |
| 120 | 54,4±2 | 20 | | |
| 150 | 60,1±2 | 20 | | |
| 180 | 130,0±3 | 260 | | |
| 210 | 285,0±6 | 274 | | |
| 240 | 299,4±7 | 275 | 8725,44 | 6358,78 |
| 270 | 174,0±4 | 171,9 | | |
| 300 | 137,0±3 | 109,7 | | |
| 330 | 97,5±2 | 79,2 | | |
| 360 | 92,2±2 | 64,3 | | |
| 390 | 90,8±2 | 57,0 | | |
| 420 | 85,4±2 | 53,4 | | |
| 450 | 75,2±2 | 51,6 | | |
| 480 | 58,9±2 | 50,8 | | |

$$F = \frac{8725{,}44}{6358{,}78} = 1{,}37$$

Значение критерия Фишера для данных, указанных в таблице 4.2.12 составляет F = 1,37, в свою очередь табличное значение (критическое) критерия Фишера составляет $F_{кр}$ = 2,33 при доверительной вероятности 0,95 и уровне

значимости 0,05. Гипотеза адекватности отклоняется в том случае, если не выполняется условие $F < F_{кр}$ [138]. Полученное значение критерия Фишера удовлетворяет условию $F < F_{кр}$, что свидетельствует об адекватности предложенной модели.

## 4.3 Выводы по 4 главе

1. Проведенные стендовые испытания на испытательной установке на воспламеняемость материала показали, что при тепловом потоке 39 кВт/м$^2$ наблюдалось самовоспламенение испытуемых образцов трудногорючего стеклопластика, что соответствовало температуре 725 °С. Дальнейшая модификация огнезащитного полотна посредством нанесения огнеупорной пены как с одной стороны, так и с двух сторон показала себя не достаточно эффективной, поскольку при температуре 337,1°С и 355,4 °С соответственно происходит ее выгорание. Рассчитана относительная потеря массы исходных образцов трудногорючего стеклопластика, которая составила 13 % от первоначальной массы. Для образцов трудногорючего стеклопластика, подлежащих модификации посредством нанесения огнеупорной пены на одну из сторон составила 34%; с нанесением на обе стороны – 29 %; потеря массы трудногорючего стеклопластика посредством восстановления при помощи фольги составила 2 %; для композиционного материала, состоящего из комбинации стеклоткани с кремнийорганическим соединением относительная потеря массы составила 4 %.

2. Получены регрессионные уравнения *T(x,y),* описывающие динамику изменения температуры на тыльной стороне в материале от продолжительности времени нагрева и потери массы.

3. Огневые испытания показали объективную возможность использования тестового очага пожара (ТОП-2) для сравнительной оценки защитных свойств материала в различном конструктивном исполнении.

4. Обосновано конструктивное исполнение устройства для ограничения распространения ландшафтного пожара на основе двух огнезащитных полотен, позволяющих значительно уменьшить вероятность самовоспламенения сухой травянистой растительности на защищаемой территории.

5. Определено максимальное значение плотности теплового потока, направленного во второй скат полотна, которое составляет $q$ = 244,6 Вт/м$^2$.

6. Проведена статистическая обработка данных, предложенной математической модели по критерию Фишера, которая соответствует условию $F < F_{кр}$ [138], что свидетельствует об ее адекватности.

7. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана база данных технических параметров процесса теплового воздействия на противопожарную преграду [135].

# ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАТРАТ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА ОТ ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА

Аспекты оценки эффективности обеспечения мер системы ПБ населенных пунктов рассматривались многими исследователями: К.Е. Правдин, А.Н. Бертенеев, Ю.С. Сербулов, Н.В. Барановский, М.В. Жарикова, В.М. Груманс, Д.Г. Округин, С.С. Сураев и другие [5, 7, 42, 123, 149]. В основном, проведенные исследования, направлены на обеспечение ПБ населенных пунктов от лесных пожаров. Так, например, Н.В. Барановским и М.В. Жариковой предложен детерминировано – вероятностный метод прогнозирования ПБ сельского населенного пункта [6]. Л.Е. Кузнецовым и другими проведен анализ лесных пожаров, перешедших в населенные пункты [65]. Исходя из статистических данных Федеральной службы государственной статистики [133] и данных Министерства финансов Российской Федерации [132] среднее число жителей, проживающих в сельских населенных пунктах РФ, составляет 172 человека. В соответствии со статьей 5 Федерального закона [155] при численности населения менее 200 человек такой населенный пункт следует относить к малому сельскому поселению. Следовательно, подобный населенный пункт необходимо рассматривать как среднестатистический по численности населения в России. На основании анализа вышеописанных трудов и статистических данных произведен расчет эффективности затрат на обеспечение ПБ зданий в целях их защиты от ландшафтных пожаров. Указанный расчет проводился с учетом функциональной пожарной опасности зданий. Данный расчет проведен для малого сельского поселения на примере деревни Остапово в Ивановской области [92].

## 5.1 Определение математического ожидания экономических потерь от ландшафтного пожара

В соответствии с приложением 4 Государственного стандарта [24] определение математического ожидания экономических потерь при свободном горении твердых горючих веществ и материалов осуществляется расчетным путем [74].

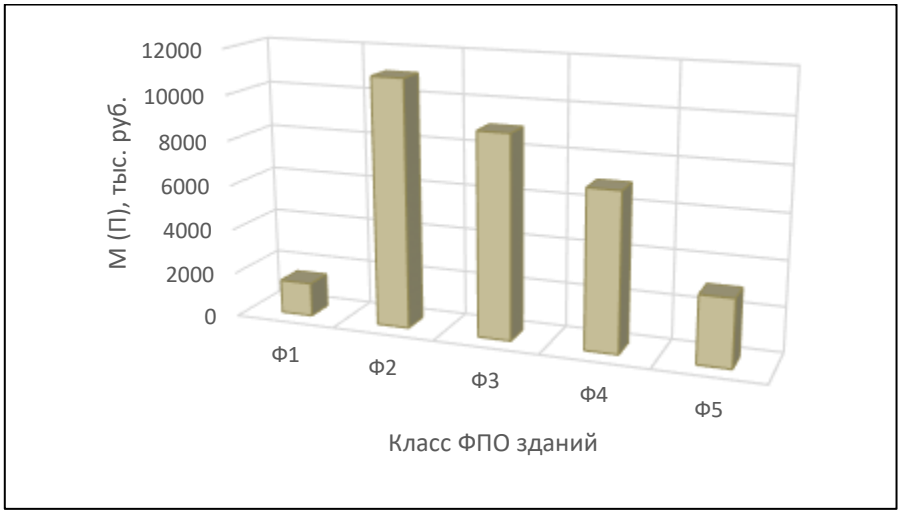



Рисунок 5.1 – Математическое ожидание экономических потерь от ландшафтного пожара в малом сельском поселении Ивановской области на основе расчетного метода

На рисунке 5.1 представлено математическое ожидание экономических потерь от ландшафтного пожара в зданиях различного класса функциональной пожарной опасности [74, 157]. Для определения данного показателя учитываются величины математического ожидания потерь: в результате отвлечения ресурсов на компенсирующие мероприятия, части национального богатства, от вынужденного простоя объекта из-за возможного пожара [24, 74].

Наибольшее математическое ожидание экономических потерь от ландшафтного пожара в малом сельском поселении наблюдается в зданиях, относящихся к классу функциональной пожарной опасности Ф2 [92].

## 5.2 Расчет экономических потерь от ландшафтного пожара

В соответствии с методикой [24] экономические потери от пожара на объекте за год определяются расчетным путем [74]. На рисунке 5.2 представлены результаты расчетов предотвращенных экономических потерь от ландшафтного пожара в зданиях малого сельского поселения в зависимости от класса функциональной пожарной опасности.

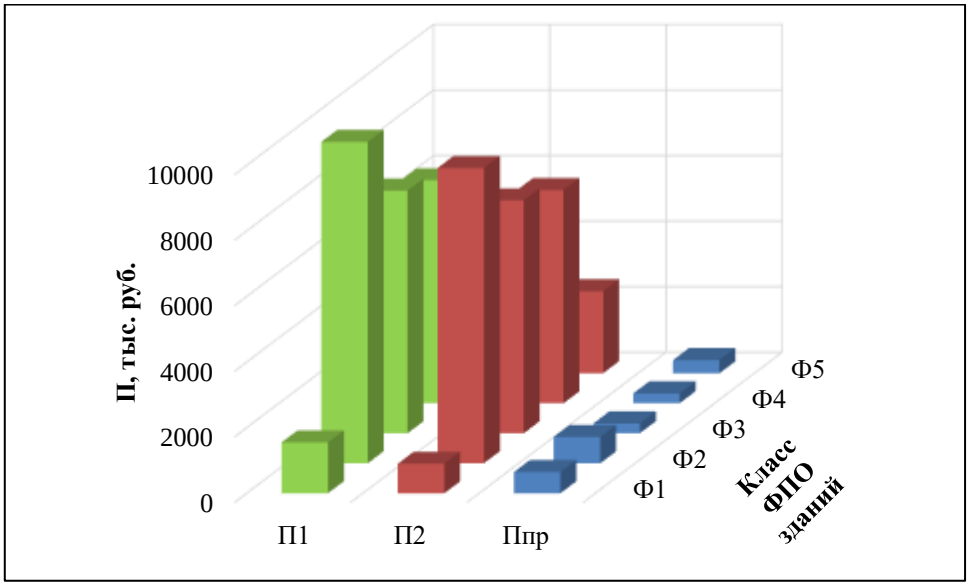



Рисунок 5.2 – Экономические и предотвращенные потери от ландшафтного пожара в зданиях малого сельского поселения в зависимости от класса функциональной пожарной опасности

По результатам проведенного расчета наблюдается снижение экономических потерь в малом сельском поселении при использовании противопожарной преграды для ограничения распространения ландшафтных пожаров [92, 108, 110].

## 5.3 Определение эффективности затрат на обеспечение пожарной безопасности для защиты населенного пункта от ландшафтного пожара

Экономический эффект, связанный с затратами на обеспечение ПБ, определяется по результатам эксплуатации объектов защиты за расчетный период. Экономический эффект за расчетный период независимо от направленности мероприятия по обеспечению ПБ (разработка, производство и использование новых, совершенствование существующих элементов систем и мероприятий по обеспечению ПБ) определяется расчетным путем по ГОСТу [24], [92].

На рисунке 5.3 показана зависимость экономической составляющей затрат на обеспечение ПБ зданий малого сельского поселения [24]. Данные значения рассчитываются исходя из предотвращенных потерь и затрат на установку ПП.

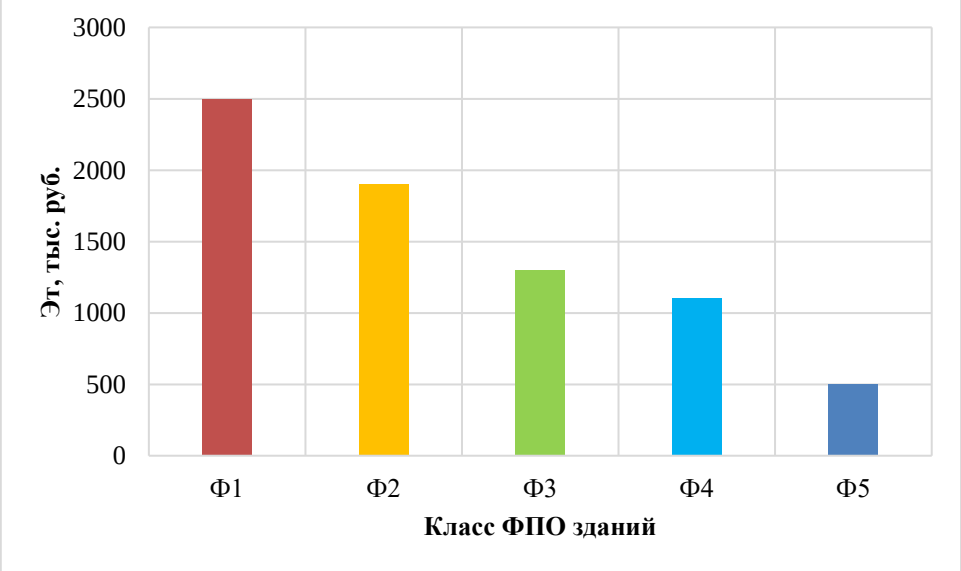



Рисунок 5.3 – Эффективность затрат на обеспечение ПБ зданий малого сельского поселения Ивановской области

Из рисунка 5.3 следует, что наибольшая эффективность предполагаемых затрат на обеспечение ПБ зданий малого сельского поселения соответствует зданиям, имеющим класс функциональной пожарной опасности Ф1. Данное обстоятельство обуславливается, как правило, тем, что постройка зданий для

массового пребывания людей планируется (Ф2 – Ф5) в населенном пункте ближе к центру из-за исторически сложившейся застройки. В свою очередь частные дома Ф1 размещаются у границ, прилегающих к лесным массивам или открытой местности [89, 92]. Однако известно, что объекты с массовым пребыванием людей, предназначенные для проведения культурно-досуговых мероприятий с населением, имеют большую кадастровую стоимость из-за большой площади здания и сосредоточенного в нем оборудования. В связи с этим необходимо рассмотреть сценарий возможного прямого ущерба при уничтожении пожаром в следствии горения сухой травянистой растительности Остаповского дома культуры, расположенного по адресу: Ивановская область, Шуйский муниципальный район, Остаповское сельское поселение, деревня Остапово, улица Зеленая, дом 72 в отсутствии применения противопожарных преград. Общая площадь здания составляет 362,5 м$^2$ с размерами в плане 25х14,5 метра. Кадастровая стоимость объекта на 2025 год составляет 3140405 рублей. Исходя из сценария развития возможного пожара от горения сухой травы распространение огня происходит с фронта. Длина, защищаемого объекта на которой размещается противопожарная преграда составляет 25 метров. Исходя из расчета, что расстояние между опорными рамами составляет 3 метра необходимо 9 металлических стоек, утапливаемых в землю. Между опорными рамами растягивается 2 ската огнезащитного полотна из композиционного материала общая длинна которого составляет 50 метров, стоимость материал составляет 200 рублей за 1$^2$. Общая стоимость опорных рам составляет порядка 4500 рублей. Итоговая стоимость противопожарной преграды составляет порядка 20000 рублей для сохранности и обеспечения безопасности объекта защиты от распространения ландшафтного пожара на него. С учетом затрат на закупку, монтаж противопожарной преграды муниципальное образование с экономит 3120405 рублей в случае ее применения от возможной угрозы в виде ландшафтного пожара.

## 5.4 Выводы по 5 главе

1. В соответствии с методикой [24], определено, что наибольшее математическое ожидание экономических потерь от ландшафтного пожара в населенном пункте, классифицируемом в соответствии с требованиями законодательства [155] как малое сельское поселение, наблюдается в зданиях, относящихся к классу функциональной пожарной опасности Ф2.

2. Получены значения экономических потерь от ландшафтного пожара в малом сельском поселении для зданий классов функциональной пожарной опасности Ф1-Ф5.

3. На основе расчетов по методике [24] исследована эффективность экономических предполагаемых затрат на обеспечение ПБ зданий малого сельского поселения при использовании противопожарной преграды из композиционного материала. Установлено, что применение противопожарной преграды для защиты сельских поселений от ландшафтных пожаров экономически эффективно и экономически целесообразно.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый композиционный материал на основе стеклоткани с нанесенным кремнийорганическим соединением. Данный композиционный материал отличается от выпускаемых в промышленности последовательностью нанесения слоев. Наружные слои материала выполняются из кремнийорганического соединения. Внутренний слой выполнен из стекловолокна.

2. По результатам исследования высокотемпературного воздействия на элементы противопожарных преград из композиционного материала разработаны конструкции технических средств и способ защиты территорий от распространения низового ландшафтного пожара.

3. Разработаны методы стендовых и огневых испытаний устройств для предотвращения распространения ландшафтного пожара, позволяющие провести сравнительную оценку защитных свойств материала в различном конструктивном исполнении. В процессе проведения огневых испытаний определено, что применение огнезащитного полотна из композиционного материала является наиболее эффективным в диапазоне температур 500-560 °С.

4. С использованием численно-аналитического моделирования разработана математическая модель теплопереноса в трехслойном материале, позволяющая определить динамику распространения температуры в слоях материала в зависимости от продолжительности времени огневого воздействия.

5. Показано, что наибольшее среднее значение температуры на тыльной стороне устройства при огневом воздействии в течение восьми минут с плотностью теплового потока 244,6 Вт/м$^2$, ниже критического значения возгорания сухой травы на 25-35%, при применении двухскатного огнезащитного полотна.

6. Проведена оценка эффективности экономических предполагаемых затрат на обеспечение пожарной безопасности зданий малого сельского поселения деревни Остапово Ивановской области при использовании противопожарной преграды из композиционного материала. Установлено, что применение

противопожарной преграды для объектов защиты сельских поселений от ландшафтных пожаров экономически эффективно и целесообразно.

7. Огневые испытания показали объективную возможность использования тестового очага пожара в виде распространяющегося фронта пламени со средней величиной тепловыделения 8 кВт/м$^2$.

8. По результатам сравнительного анализа традиционных способов борьбы с низовыми ландшафтными пожарами определено, что стоимость организации встречного пала на 60% превышает стоимость противопожарной преграды, при этом по технико-эксплуатационным характеристикам противопожарная преграда показывает себя лучше, что позволяет рассматривать ее как оптимальный вариант. При сравнении очистки территории от валежника и противопожарной преграды стоит заметить, что применение противопожарной преграды на 25% дороже, при этом по технико-эксплуатационным характеристикам противопожарная преграда в 4 раза эффективнее (приложение 8).

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразумов, В. В. Перспективы применения композиционных огнезащитных материалов в условиях лесных пожаров / В. В. Абразумов, С. В. Фролов, О. В. Токарева // Информационно – технологический вестник № 4 (30) 2021. – С. 137-147.

2. Алехин, Е. М. Проблемно-ориентированные имитационные системы для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами городов / Е. М. Алехин, Н. Н. Брушлинский, П. Вагнер, Ю. И. Коломиец, С. В. Соколов // Вестник РАЕН. – 2012. – Т. 12. № 3. – С. 27-34.

3. Алифанов, О. М. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем // О. М. Алифанов, П. Н. Вабищевич, В. В. Михайлов, А. В. Ненарокомов, С. В. Резник // М.: – Логос. – 2001. – С. 400.

4. Анисимова, Н. К. Процессы высокотемпературной отделки бетонов с фазовыми превращениями в декорирующем слое. дис. … к-та техн. наук: 05.02.13 / Анисимова Наталья Константиновна. – Иваново, 2009. – 20 с.

5. Барановский, Н. В. Геоинформационные технологии в прогнозировании пожарной безопасности сельских населенных пунктов / Н. В. Барановский, М. В. Жарикова // В сборнике: Информационные технологии, системы и приборы в АПК. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. 2012. С. 417-421.

6. Барановский, Н. В. Геоинформационные технологии в прогнозировании пожарной безопасности сельских населенных пунктов / Н. В. Барановский, М. В. Жарикова // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 11. С. 67-76.

7. Бартенев, А. Н. Управление системой обеспечения пожарной безопасности населенных пунктов субъекта РФ / А. Н. Бартенев, Ю. С. Сербулов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного

университета. Серия: Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2014. № 2 (4). С. 99-103.

8. Безлаковский, А. И. Базальтоволокнистые материалы как защитные экраны для локализации низовых пожаров / А. И Безлаковский., В. К. Дубовый., Н.В. Сысоева., А. В. Дю., В. Г. Гусев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 5 (341). С. 63-69.

9. Богданова, В. В. Быстротвердеющие полимерные пены для ограничения распространения и тушения пожаров / В. В. Богданова, М. М. Тихонов, А. М. Мамедов // Вестник Командно – инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. № 2 (24). – С. 4-7.

10. Больцман, Л. Молекулярно-кинетическая теория газов, термодинамика, статистическая механика / Л. Больцман. Избранные труды. М.: Наука, 1984. С. 9-330.

11. Бондарева, Е. А. Трудногорючий теплоизоляционный материал на основе полимерных связующих: автореф. дис. … к-та техн. наук: 05.17.06 / Бондарева Елена Алексеевна. – Санкт Петербург, 2007. – 20 с.

12. Боришанский, В. М. и др. Жидкометаллические теплоносители / В. М. Боришанский, С. С. Кутателадзе, И. И. Новиков, О. С. Федынский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1967. – 299 с.: ил. – Библиогр.: с. 288-296 (234 назв.). – 1-е изд.: Прил. к № 2 к журн. «Атомная энергия» за 1958 г.

13. Брабандер, О. П. ФГВ / О. П. Брабандер, О. А. Вдовина, А. М. Гришин - 1988, Т. 24, № 4.

14. Брушлинский, Н. Н. Инновационная технология ослабления тепловых и газовых потоков [Текст] / Н. Н. Брушлинский [и др.] // Пожаровзрывобезопасность – 2013. - № 5. - С. 71-80.

15. Булва, И. В. Пространственное распределение опасных факторов пожара с учетом работы водяной завесы в качестве противопожарной преграды / И. В. Булва // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2016. Т. 1. № 1 (7). С. 134-136.

16. Вагин, С. Ю. Трудногорючий вибродемпфирующий материал / С. Ю. Вагин, В. П. Васин, Г. А. Здорикова, Т. А. Рудакова // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. № 10. – С. 13-17.

17. Волокитина, А. В. Защита населенный пунктов от природных пожаров / А. В. Волокитина, Т. М. Сафронова // Пожаровзрывобезопасность № 3, том 20. 2011. – С. 22-30.

18. Волокитина, А. В. Защита населенных пунктов от чрезвычайных ситуаций, связанных с природными пожарами: практические рекомендации, разработанные при финансовой поддержке фонда Макартуров, индивид. грант № 01-68116-000. – Красноярск: ИЛ СО РАН, 2002. – 63 с.

19. Воробьев, Ю. Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. Л. Соловьев; Под общ. Ред. Ю. Л. Воробьева // МЧС России. – М.: ДЭКС – ПРЕСС, 2004. – 312.

20. Гаращенко, А. Н. Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева / А. Н. Гаращенко, А. В. Виноградов, И. З. Даштиев, Н. В. Кобылков, С. А. Терехов // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29. № 6. – С. 28-39.

21. Гаращенко, А. Н. Огнезащита конструкций из полимерных композитов и оценка ее эффективности / А. Н. Гаращенко, А. В. Суханов, Н. А. Гаращенко, В. П. Рудзинский, С. С. Мараховский // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т. 18. № 5. – С. 15-24.

22. Гарданова, Е. В. Способы противопожарной защиты от распространения опасных факторов пожара через проемы в междуэтажных перекрытиях при создании многосветных пространств / Е. В. Гарданова, А. В. Идрисов // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2016. № 4 (21). С. 93-94.

23. Гоман, П. Н. Методика расчета пространственно-временных параметров противопожарных барьеров лесных низовых пожаров. / П. Н. Гоман //

Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2013. № 2 (18). С. 57-61.

24. ГОСТ 12.1.004-91* «ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/9051953.

25. ГОСТ 12.1.044 – 89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.reglament.by/wp-content/uploads/docs/gost/GOST-12.1.044-89.pdf.

26. ГОСТ 17.6.1.01-83. Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения: введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам.

27. ГОСТ 30402 – 96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://internet-law.ru/gosts/gost/27731/.

28. ГОСТ 32931 - 2015 «Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200130601.

29. ГОСТ 380 - 2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки» (с Изменением № 1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200052847.

30. ГОСТ 618 – 2014 «Фольга алюминиевая для технических целей» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293764/4293764499.pdf.

31. ГОСТ Р 15.011-96 114321 U1 (RU), Российская Федерация на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/5200264.

32. ГОСТ Р 53325-2012 Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200102066.

33. ГОСТ Р ИСО 6942 – 2007 Система стандартов безопасности труда. Одежда для защиты от тепла и огня. Методы оценки материалов и пакетов материалов, подвергаемых воздействию источника теплового излучения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/b6f/4293845600.pdf.

34. ГОСТ 25380 – 82 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/10b/4294853546.pdf.

35. Гравит, М. В. Пожарно-технические характеристики строительных материалов в европейских и российских нормативных документах. Проблемы гармонизации методов исследования и классификации / М. В. Гравит, О. В. Недрышкин, А. А. Вайтицкий, А. М. Шпакова, Д. Г. Нигматуллина // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25. № 10. – С. 16-29.

36. Григоров, В. Ю. Пожарная опасность и приоритетные области пожаробезопасного применения композитных материалов на основе арамидных волокон / В. Ю. Григоров, О. В. Кривошапкина, В. Е. Мельников, Н. В. Смирнов // Безопасность труда в промышленности. - 2024. - № 5. - С. 52-55.

37. Гришин, А. М. Тепломассобмен – ММФ / А. М. Гришин, В. А. Перминов // Международный форум: Тез. докл., секц.2. – Минск, 1988. -137 С.

38. Гришин, А. М. Воздействие фронта верхового лесного пожара на стеклопластик / А. М. Гришин, С. П. Синицин // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26. № 6. С. 35-42.

39. Гришин, А. М. Математическая теория верховых лесных пожаров / А. М. Гришин, А. Д. Грузин, В. Г. Зверев // Теплофизика лесных пожаров. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР. 1984. – С. 38-75.

40. Гришин, А. М. Переход низового лесного пожара в верховой / А. М. Гришин, В. А. Перминов // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26. № 6. С. 27-34.

41. Гришин, А. М. Экспериментальное исследование механизма распространения лесных пожаров и новых способов борьбы с ними. – Деп. В ВИНИТИ 9.01.87, № 226 – В87.

42. Груманс, В. М. Экономические механизмы управления пожарной безопасностью административных территориальных образований (на примере предупреждения лесных пожаров) / В. М Груманс, Д. Г. Округин // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2010. № 1. С. 100-104.

43. Гундар, С. В. Управление лесными пожарами / С. В. Гундар, А. В. Подгрушный // Пожаровзрывобезопасноть. Том 15, № 4. – 2006. – С. 74-79.

44. Далинкевич, А. А. Исследование длительного водопоглощения конструкционных эпоксидных стеклопластиков с помощью волоконно – оптических датчиков деформаций / А. А. Далинкевич, П. В. Михеев, С. А. Гусев, Т. Н. Игонин, Л. Б. Максаева, Т. А. Ненашева // В сборнике: Север России: стратегии и перспективы развития. материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – 2016. – С. 67-71.

45. Заикин, С. В. Расчет оптимальных параметров огнестойкого экрана противопожарных штор и укрытий [Текст] / С. В. Заикин, В. Л. Страхов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. - № 3 (15). – С. 20-24.

46. Заикин, С. В. Трансформируемые огнезащитные ограждающие конструкции повышенной огнестойкости [Текст] / С. В. Заикин, В. Л. Страхов // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2009. - № 4 – С. 107-112.

47. Заикин, С. В. Трансформируемые противопожарные преграды повышенной эффективности: автореф. дис. … к-та техн. наук: 05.26.03 / Заикин Сергей Вениаминович. – М., 2012. – 24 с.

48. Залесов, С. В. Лесная пирология. Термины, понятия, определния: учеб. Справочник / С. В. Залесов, Е. С. Залесова – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. Ун-т, 2014. – 54 с.

49. Залесов, С. В. Защита населенных пунктов от природных пожаров / С. В. Залесов, Г. А. Годовалов, А. А. Кректунов, Е. Ю. Платонов // Аграрный вестник Урала № 2 (108), 2013 г. – С. 34-36.

50. Иванов, А. Б. Моделирование и расчет процессов теплопереноса при термической обработке изделий перемещающимися источниками тепловой энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Иванов Александр Борисович. – Иваново, 2006. – 17 с.

51. Иванов, И. М. Математическая модель для назначения высокоэффективного состава бетона с использованием молотого гранулированного доменного шлака / И. М. Иванов, Л. Я. Крамар // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – Т. 20. № 4. – С. 28-41.

52. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – М.: Энергия, 1975 – 488 с.

53. Карташов, Э. М. Аналитические методы теории теплопроводности и её приложений. Изд. 4-е, перераб. и сущ. доп. / Э. М. Карташов, В. А. Кудинов – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 1072 с.

54. Касперов, Г. И. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений / Г. И. Касперов, П. Н. Гоман // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 337-340.

55. Козлачков, В. И. Государственный пожарный надзор. Курс лекций: часть 1 Для начальников (заместителей начальников) отделов организации государственного пожарного надзора управлений ГПН региональных центров и главных управлений МЧС России по субъектам РФ / В. И. Козлачков, И. А. Лобаев,

А. О. Андреев, И. А. Степанова, И. А. Вотченко, А. Ю. Хохлова, Д. Г. Карпенко – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 159 с.

56. Константинова, Н. И. К вопросу о безопасном применении фиброцементных материалов в зданиях и сооружениях / Н. И. Константинова, Н. В. Смирнов, О. В. Кривошапкина, О. И. Молчадский // Безопасность труда в промышленности. - 2021. - № 7. - С. 35-41.

57. Копылов, Н. П. Крупные пожары и их моделирование / Н. П. Копылов, А. М. Рыжов, И. Р. Хасанов // Моделирование пожаров и взрывов. Под ред. Н. Н. Брушлинского и А. Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 170-187.

58. Копылов, Н. П. Лесоторфяные пожары и их влияние на окружающую среду / Н. П. Копылов, И. Р. Хасанов // Пожарная безопасность. – 2013. - № 2. - С. 95-103.

59. Копылов, Н. П. Прогнозирование параметров загрязнения атмосферы при крупных пожарах / Н. П. Копылов, И. Р. Хасанов // Стратегические риски чрезвычайных ситуаций: оценка и прогноз. Матер. 8-й Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М.: МЧС России, 2003. – С. 302-308.

60. Копылов, Н. П. Эффективность применения теплозащитных экранов для защиты от тепловых потоков при пожарах / Н. П. Копылов, И. Р. Хасанов // Безопасность Труда в Промышленности. – 2016. – № 11. – С.38-43.

61. Копылов, С. Н. Нанотехнологии и пожарная безопасность / С. Н. Копылов, А. Н. Баратов, А. В. Казаков, Д. В. Бухтояров, И. А. Щур // Пожарная безопасность. – 2011. – № 3. – С. 71-74.

62. Косых, А. В. Использование пакета прикладных программ «Statistica» для оптимизации технологии производства ячеистых бетонов с комплексной добавкой / А. В. Косых, Е. В. Лужнова // Системы. Методы. Технологии. –2013. – № 2 (18). – С. 132-136.

63. Котлов, В. Г. Процессы тепломассопереноса при напряженно-деформированном состоянии нагельных соединений: автореф. дис.… д-ра техн. наук: 05.02.13 / Котлов Виталий Геннадьевич. – Иваново, 2021. – 37 с.

64. Кошмаров, Ю. А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле: [Учеб. для вузов МВД СССР] / Ю. А. Кошмаров, М. П. Башкирцев; Высш. инж. пожар.-техн. шк. МВД СССР. - Москва: ВИПТШ, Б. г. (1987). – 443.

65. Кузнецов, Л. Е. Охрана населенных пунктов от лесных пожаров на примере Тюменского района / Л. Е. Кузнецов, С. В. Залесов, И. М. Секерин, А. А. Кректунов, Г. В. Куксин, П. В. Щеплягин. Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 12 (138).

66. Курбатский, Н. П. Заслоны взамен противопожарных разрывов / Н. П. Курбатский, Э. Н. Валендик, П. М. Матвеев // Лесное хозяйство. 1973. № 6. С. 46-48.

67. Курбатский, Н. П. Классификация лесных пожаров // Вопросы лесоведения. – Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1970. – С. 384-407.

68. Курбатский, Н. П. Локализация сильных лесных пожаров встречным низовым огнем // Лесное хозяйство. – 1959. - № 3. – С. 52-55.

69. Кургузов, К. В. Пространственно-корреляционный анализ инженерно-геологических данных на примере строительства логистического комплекса / К. В. Кургузов, И. К. Фоменко // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. № 8. – С. 976-990.

70. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие / С. С. Кутателадзе – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 367 с.

71. Лагозин, А. Ю. Контроль качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), ремонте и эксплуатации, прогнозирование срока службы тонкослойных огнезащитных покрытий / А. Ю. Лагозин, Н. В. Смирнов, В. В. Булгаков, Т. С. Зубань // Безопасность труда в промышленности. - 2024. - № 1. - С. 34-40.

72. Лазарев, А. А. О механизме теплопереноса во внешнем слое пластика изделия из стеклопластика РСТ – 250 в условиях ландшафтного пожара / А. А. Лазарев, С. В. Федосов, А. Н. Мальцев // VIII Международная научно – практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии СЭТМТ – 2023», Москва, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2023 г., с. 247-251.

73. Лазарев, А. А. Ветровые нагрузки на устройства для ограничения распространения ландшафтных пожаров на сельско-хозяйственных землях / А. А. Лазарев, А. Н. Мальцев, М. В. Торопова // Актуальные экологические проблемы современных городов: сборник материалов I Национальной научно-практической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2024. – С. 71-75.

74. Лазарев, А. А. Наружные стеновые изделия для дистанционной диагностики пожарной безопасности малоэтажных зданий: автореф. дис.… к-та техн. наук: 05.23.05, 05.26.03 / Лазарев Александр Александрович. – Иваново, 2021. – 19 с.

75. Лазарев, А. А. О проблеме пресечения правонарушений, способствующих возникновению экологонеблагоприятных ландшафтных пожаров / А. А. Лазарев, А. Н. Мальцев, М. В. Торопова // Экологические аспекты современных городов: сборник материалов IX межрегионального семинара. – Иваново: ИВГПУ, 2023 – С. 48-51.

76. Лазарев, А. А. О проблеме создания противопожарных преград для защиты от ландшафтных пожаров / А. А. Лазарев, А. Н. Мальцев // Современные проблемы гражданской защиты. – 2022. – №. 4 (45). – С. 78-85.

77. Лазарев, А. А. Теплоперенос в стеклопластике, используемом для создания устройства в целях предотвращения распространения ландшафтного пожара / А. А. Лазарев, А. Н. Мальцев, М. В. Торопова // IV Международный Косыгинский форум «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета», посвященный 120 – летию со дня рождения А. Н.

Косыгина МНТС «Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS EESTE – 2024)», посвященного 120 – летию со дня рождения П. Г. Романкова (Москва, 20 – 22 февраля, 2024 г.) – С. 138-141.

78. Левиз, А. Испытанный способ тушить пожары // Лесной журнал. – 1833. Ч. 1, кн. 2. – С. 75-84.

79. Литвинцев, К. Ю. Совершенствование методов моделирования лучистого теплообмена и оптических свойств среды применительно к высокотемпературным технологическим процессам и пожарам: автореф. дис.… к-та физико-математических. наук: 01.04.14 / Литвинцев Кирилл Юрьевич – Новосибирск, 2012. – 24 с.

80. Лобанова, М. С. Разработка огнетеплозащитных покрытий для стеклопластика на основе перхлорвиниловой смолы, модифицированной фосфорборсодержащими соединениями: автореф. дис. … к-та техн. наук: 02.00.06 / Лобанова Марина Сергеевна. – Волгоград, 2013. – 24 с.

81. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск: АН БССР, 1961. – 519 с.

82. Лыков, А. В. Теория переноса энергии и вещества / А. В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Минск: Изд. АН БССР, 1959. – 330 с.

83. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Л., 1950. – 416с.

84. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

85. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.

86. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – М.: Гос. изд. техн.-теор. лит., 1954. – 314 с.

87. Мальцев, А. Н. Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности в лесах / А. Н. Мальцев, А. А. Покровский, А. А. Ляпин, Е. А.

Бушковский // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2016. Т. 1. № 1 (7). С. – 77-79.

88. Мальцев, А. Н. Вероятностный подход к созданию модели распространения ландшафтного пожара / А. Н. Мальцев, А. А. Лазарев // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: Сборник материалов Дней науки с международным участием, г. Екатеринбург 26 – 28 октября 2022 г. – С. 121-125.

89. Мальцев, А. Н. Методика огневых испытаний устройств для ограничения распространения ландшафтных пожаров / А. Н. Мальцев // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – №. 2 (51). – С. 56-64.

90. Мальцев, А. Н. Обзор основных способов для защиты от ландшафтных пожаров / А. Н. Мальцев, А. А. Лазарев // В сборнике: Пожарная и аварийная безопасность. Сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции, посвященной 90- й годовщине образования гражданской обороны. Иваново, 2022. С. 111-114.

91. Мальцев, А. Н. Определение коэффициента эффективности защиты от воздействия лучистого теплового потока при использовании огнезащитного полотна из стеклопластика / А. Н. Мальцев, Е. А. Шварев, А. М. Мочалов // В сборнике: Пожарная и аварийная безопасность. Сборник материалов XIX Международной научно – практической конференции, Иваново, 2024. С. 687-692.

92. Мальцев, А. Н. Оценка эффективности затрат по обеспечению пожарной безопасности малого сельского поселения при защите от ландшафтного пожара / А. Н. Мальцев, А. А. Лазарев, М. В. Торопова // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2024. – С. 153-156.

93. Мальцев, А. Н. Технологии создания противопожарных преград / А. Н. Мальцев, А. А. Лазарев // Перспективные технологии и материалы: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Севастополь 21-23

сентября 2022 г. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2022. – С. - 406-410.

94. Мальчиков, К. Б. О высоте факела пламени при горении твердых горючих веществ и материалов / К. Б. Мальчиков, Д. Ф. Кожевин, Е. Г. Коробейникова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 1 (20). С. 12-19.

95. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30247.0-94 "Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования" (введен в действие постановлением Минстроя РФ от 23 марта 1995 г. N 18-26).

96. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции» (введен в действие постановлением Минстроя РФ от 23 марта 1995 г. N 18-26).

97. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А. В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

98. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / А. М. Михеев. Госэнергоиздат, 2-е издание, 1949.

99. Михеев, М. А. Теплоотдача расплавленных металлов / В. А. Баум, К. Д. Воскресенский, О. С. Федынский // Реакторостроение и теория реакторов: доклады советской делегации. – 1955. – С. 139-151.

100. Надежкин, С. Н. Полезные, вредные и ядовитые растения: монография / С. Н. Надежкин, И. Ю. Кузнецов. – Москва, 2010. – 248 с.

101. ОСТ 10243 – 2000. Стандарт отрасли сено. Технические условия. Режим доступа: https://koapp.narod.ru/pay/ty/ost/ost_10243_2000.htm.

102. Официальный сайт N+1: научные статьи, новости, открытия [Электронный ресурс]. Режим доступа: htpp://nplus1.ru/.

103. Пат. 114321 U1 (RU), Российская Федерация, МПК D03D 15/12. Ткань теплоизоляционная негорючая / В. А. Еремин; опубл. 20.03.2012, бюл. № 8.

104. Пат. 168576 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A01G 23/02. Машина для защиты линейных объектов / М. В. Ивашнев, И. Р. Шегельман; опубл. 09.02.2017, бюл. № 4.

105. Пат. 2113260 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02. Способ локализации лесного пожара / В. М. Петраков, Е. А. Коняев, Д. В. Галяев, И. Н. Казаков; заявка. 27.09.1996.

106. Пат. 2170119 C1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02. Способ сдерживания лесного пожара / А. Г. Цыкалова, С. Н. Орловский, В. А. Шмакова; опубл. 10.07.2001, бюл. № 19.

107. Пат. 2170121 C1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02. Способ предотвращения перехода лугового пожара в лесной / Г. Д. Главацкий, В. А. Шмаков; опубл. 10.07.2001, бюл. № 19.

108. Пат. 219622 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 2/06, A62C 3/02. Устройство для предотвращения распространения ландшафтного пожара / И. А. Малый, И. Ю. Шарабанова, А. Н. Мальцев, А. А. Лазарев, Д. Б. Самойлов; опубл. 28.07.2023, бюл. № 22.

109. Пат. 2210414 C1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02. Способ ограничения распространения пожара в защитных лесных насаждениях / В. В. Кравцов, А. В. Кравцов, А. М. Степанов, А. К. Кулик, А. В. Кравцова; опубл. 20.08.2003, бюл. № 23.

110. Пат. 221505 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 2/06, A62C 3/02. Устройство для предотвращения распространения ландшафтного пожара / И. А. Малый, И. Ю. Шарабанова, А. Н. Мальцев, А. А. Лазарев, В. Е. Иванов; опубл. 09.11.2023, бюл. № 31.

111. Пат. 2229909 C 1 (RU), Российская Федерация, МПК A 62 C 2/06, A 62 C 3/16. Огнезащитный вариант – чехол / В. Л. Страхов, А. М. Крутов, С. В. Заикин, А. В. Суханов, И. А. Болодьян, В. Л. Карпов, А. В. Асеев, С. А. Швырков, В. В. Рубцов; опубл. 10.06.2004, бюл. № 16.

112. Пат. 2243796 C 2 (RU), Российская Федерация, МПК A 62 C 2/10, A 63 J 1/00. Противопожарный занавес / Н. П. Копылов, А. П. Кисиль, А. И. Майоров, Е. М. Мазанов, В. М. Попов, А. М. Якунин. 10.01.2005, бюл. № 1.

113. Пат. 2260658 (RU), Российская Федерация, МПК E04B 1/94. Противопожарная стена / А. А. Шухардин, А. Б. Акопян, С. Н. Климин; опубл. 20.09.2005, бюл. № 26.

114. Пат. 2298617 (RU), Российская Федерация, МПК E04B 5/02. Перекрытие зданий и сооружений / И. А. Сумкин, Д. В. Маслов; опубл. 10.05.2007, бюл. № 13.

115. Пат. 2448749 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02, A62C 2/08. Система противопожарной защиты / Л. Е. Желобицкий; опубл. 27.04.2012, бюл. № 12.

116. Пат. 2611877 C2 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02. Способ создания противопожарных заградительных барьеров вокруг населенных пунктов от степных пожаров / Э. Н. Валендик, Е. К. Кисиляхов, И. В. Косов, А. И. Лобанов, А. А. Онучин; опубл. 01.03.2017, бюл. № 7.

117. Пат. 2632642 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02. Способ защиты населённых пунктов от лесных пожаров / М. А. Шешуков, В. В. Позднякова, А. М. Орлов, О. А. Гончар; опубл. 06.10.2017, бюл. № 28.

118. Пат. 2695139 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 3/02. Мобильный комплекс для тушения лесных пожаров с помощью рулонных огнезащитных экранов / В. Г. Гусев, В. С. Никитин; опубл. 22.07.2019, бюл. № 21.

119. Пат. 2751466 C1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 2/10, E04B 1/94. Способ изготовления противопожарного барьера / А. В. Тихвинский, Д. Н. Нетесин; опубл.14.07.2021, бюл. № 20.

120. Пат. 2768353 C 1 (RU), Российская Федерация, МПК A 62 C 3/02, A 62 2/06. Способ локализации и тушения низовых лесных и степных пожаров и устройство для его реализации / С. А. Юдин, С. Я. Семененко, А. С. Овчинников,

Н. Н. Дубенок, С. С. Марченко, Д. В. Беломутенко, М. В. Источкина, Д. А. Голатов, В. Н. Медведев; опубл. 23.03.2022, бюл. № 9.

121. Пат. 2643595 C 1 (RU), Российская Федерация, МПК A 62 C 3/02. Способ предотвращения распространения низового лесного или степного пожара и устройство для его осуществления / Ю. Ф. Сосновчик; опубл. 02.02.2018, бюл. № 4.

122. Пожары и пожарная безопасность в 2024 году: информ. – аналитич. сб. П 46 Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с.

123. Правдин, К. Е. Оценка эффективности применяемых систем и технологий для обеспечения пожарной безопасности и средств мониторинга населенных пунктов / К. Е. Правдин // Студенческий форум. 2023. № 9-1 (232). С. 26-29.

124. Правила противопожарного режима в Российской Федерации, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 (ред. от 03.02.2025) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://base.garant.ru/74680206/.

125. Преображенский, А. И. Стеклопластики – свойства, применение, технологии / А. И. Преображенский // Главный механик. – 2010. – № 5. – С. 27-36.

126. Пузач, С. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении / С. В. Пузач, Е. В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. Т. 25. – № 2. – С. 13-20.

127. Романова, О. С. О пожарной безопасности населенных пунктов, подверженных угрозе ландшафтных (природных) пожаров / О. С. Романова, А. А. Лазарев, В. Ю. Емелин, А. М. Мочалов, А. А. Липинская, А. Н. Мальцев, П. В. Мочалин // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов VI Международной научно – практической конференции, Иваново, 19 октября 2023 г. – Иваново., С. 337-342.

128. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980 – 248 с.

129. Рябкова, О. А. Фоточувствительные самоочищающиеся композиционные материалы на основе наноструктурированного полититаноксида в полимерных матрицах различной природы: автореф. дис.… к-та хим. наук: 1.4.7 / Рябкова Ольга Андреевна. – Нижний Новгород, 2023. – 26 с.

130. Ряполова, Л. М. Противопожарное обустройство лесов, примыкающих к населенным пунктам и другим объектам в лесу / Л. М. Ряполова, Ю. А. Михалев, Л. П. Золотухина // Охрана лесов от пожаров, лесовосстановление и лесопользование: сб. науч. статей. – Красноярск: МПР, ВНИИПОМ-лесхоз, 2003. – С. 94-101.

131. Сайт Екатеринбургского завода изоляционных материалов [Электронный ресурс] // Рулонные стеклопластики: [сайт]. [2013-2023]. URL: https://www.zavod-izol.ru/catalog/k-167250-rulonnyye_stekloplastiki (дата обращения: 22.02.2023).

132. Сайт Министерства финансов Российской Федерации [Электронный ресурс] // Минфин. URL: https://minfin.gov.ru/ru/document/?id_4=128341 (дата обращения: 01.03.2024).

133. Сайт Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс] // Росстат: [сайт]. [1999-2024]. URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 24.12.2024).

134. Сайт Экология производства: новости экологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://news.ecoindustry.ru/2023/07/ekspert-izmenenie-zakona-o-bajkale-pozvolit-nachat-stroitelstvo-ochistnyh-na-yuge-ozera/.

135. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620979 от 03.03.2025 Российская Федерация. База данных по теплофизическим характеристикам для разработки устройств в целях предотвращения распространения ландшафтного пожара / А. Н. Мальцев, А. А. Лазарев, Е. А. Шварев, О. Е. Сторонкина, В. А. Титов; Правообладатели: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (RU). -заявка № 2025620518 от 24.02.2025.

136. Свод правил СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 3 декабря 2016 г. N 891/пр) (с изменениями и дополнениями). [Электронный ресурс]. – Режим доступа:https://internet.garant.ru/#/document/71636070/paragraph/1/doclist/10830/1/0/0/сп%2020.13330.2016:3.

137. Сертификат соответствия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://penosil.com/ru/wp-content/uploads/sites/20/2020/04/Сертификат-Соответствия-пена-Penosil-и-Budpro-2.

138. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статических данных: учеб. пособие для магистров / Н. И. Сидняев. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 495 с. – Серия: Магистр.

139. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная техника. Огнетушители переносные. Общие технические условия: СТБ 11.13.04 – 2009. – Введ. 01.09.2009. – Минск: Госстандарт, 2009. – 46 с.

140. Слугин, И. В. Микрофиламентная нить русар для средств баллистической защиты / И. В. Слугин, Г. Б. Скляров // Технология полимерных материалов, 2006. - № 23. - С. 17.

141. Слугин, И. В. Параарамидные нити русар для композиционных материалов конструкционного назначения / И. В. Слугин, Г. Б. Скляров // Технология полимерных материалов, 2006. - № 23. - С. 19-21.

142. Случаи природных пожаров, нанесших крупный ущерб населенным пунктам РФ с 2010 г. Досье - ТАСС (tass.ru). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://tass.ru/info/4279071. Дата обращения (01.06.2023).

143. Соболь, В. Р. Влияние влажности на радиационный разогрев напочвенного материала леса / В. Р. Соболь, П. Н. Гоман // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 7. – С. 21-28.

144. Соболь, В. Р. К вопросу о пространственном распределении интенсивности лучистого потока энергии от источника большой площади / В. Р.

Соболь, П. Н. Гоман, В. И. Януть // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2011. – № 2(6) – С. 116-124.

145. СП 12.13130.2009 Свод правил определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

146. Способ локализации лесных пожаров Гришин А. М., Бабаев В. М., Абалтусов В. Е., Грузин А. Д., Зверев В. Г. Авторское свидетельство SU 1147413 A1, 30.03.1985. Заявка № 3359093 от 01.12.1981. A62C 1/00.

147. Страхов, В. Л. Математическое моделирование высокотемпературного тепломассопереноса в бетонных конструкциях / В. Л. Страхов, А. С. Мельников, В. О. Каледин // Пожар взрывобезопасность. – 2009. – Т. 18. № 6. – С. 29-36.

148. Страхов, В. Л. Математическое моделирование нестационарного прогрева насыщенного водой огнезащитного экрана на этапе сушки / В. Л. Страхов, С. В. Заикин // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – Т. 14. № 6. – С. 26-32.

149. Сураев, С. С. Полномочия органов местного самоуправления по обеспечению первичных мер пожарной безопасности / С. С. Сураев // Вестник науки. 2022. Т. 4. № 8 (53). С. 82-90.

150. Таубкин, С. И. Справочник пожароопасности твердых веществ и материалов / С. И. Таубкин, А. Н. Баратов, Н. С. Никитина – М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1961. – 148 с.

151. Трушкин, Д. В. Проблемы классификации строительных материалов по пожарной опасности. Часть 2. Сравнительный анализ экспериментальных методов по оценке пожарной опасности строительных материалов, принятых в России и странах Евросоюза. Определение горючести строительных материалов / Д. В. Трушкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. № 4. – С. 24-32.

152. ТУ 5728 – 001 – 75250588 – 14.

153. Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145 «О Стратегии научно – технологического развития Российской Федерации». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408518353/.

154. Ушаков, А. Г. Силикатные материалы для изготовления огнестойких противопожарных перегородок / Е. С. Ушакова, Г. В. Ушаков // В сборнике: экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения. сборник трудов всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета. 2014. с. 413-416.

155. Федеральный закон «Градостроительный кодекс РФ» от 07.05.1998 № 79 – ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://base.garant.ru/3999213/.

156. Федеральный закон «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 № 69-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/.

157. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/.

158. Федеральный закон от 13.06.1996 № 63-ФЗ «Уголовный кодекс Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_10699/.

159. Федосов, С. В. Моделирование прогрева тонкого слоя материала перемещающимся источником теплоты/ С. В. Федосов, В. Е. Мизонов, А. Б. Иванов, О. В. Тихонов // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 103-105.

160. Федосов, С. В. Моделирование тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты уходящих газов промышленных печей / С. В. Федосов, В. Е. Мизонов, Н. Н. Елин, С. В. Хавер // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С. 14-17.

161. Федосов, С. В. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях / С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 86-87.

162. Федосов, С. В. О проблеме цветовой дифференциации термоиндикаторов по результатам высокотемпературного воздействия пожара / С. В. Федосов, В. Г. Маличенко, М. В. Торопова, А. Н. Мальцев // Техносферная безопасность. – 2023. – №. 3 (40). – С. 28-37.

163. Федосов, С. В. Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов / С. В. Федосов, Р. М. Алоян, А. М. Ибрагимов, Л. Ю. Гнедина, Л. Н. Аксаковская. – М.: Издательство АСВ, 2005 – 501 с.

164. Федосов, С. В. Процесс теплопереноса в монолитном нестационарный железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки. Часть I / С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов, А. В. Гущин // Строительные материалы. – 2006. – № 2. – С. 56-57.

165. Федосов, С. В. Процессы термической обработки дисперсных материалов с фазовыми и термическими превращениями: дис. д-ра техн. наук / Федосов Сергей Викторович. – Ленинград, 1987. – 350 с.

166. Федосов, С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: монография / С. В. Федосов. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. – 364 с.

167. Федосов, С. В. Численно-аналитический метод сведения задач нестационарной теплопроводности с граничными условиями III рода к задачам с условиями I рода / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, В. А. Воронов // Строительные материалы. 2022. № 12. С. 59-62.

168. Фрянова, К. О. Влияние характерных свойств лесного массива и скорости ветра на размеры противопожарного разрыва при верховых лесных пожарах / К. О. Фрянова, Гербель Д. П. // В сборнике: материалы молодежного экологического форума. под редакцией Т. В. Галаниной, М. И. Баумгартэна. 2013. С. 213-217.

169. Фуряев, В. В. О целесообразности трансформации противопожарных разрывов в заслоны / В. В. Фуряев, С. Д. Самсоненко, А. Н. Кузьмин, В. А. Черных // Лесное хозяйство. 2012. № 6. С. 43-44.

170. Хасанов, И. Р. Параметры возмущения атмосферы при крупных лесных пожарах / И. Р. Хасанов // 9th International Seminar on Flame Structure (9ISFS), Novosibirsk, July 10 – 14, 2017 – С. 1-20. Режим доступа: http://www.kinetics.nsc.ru/kcp/9ISFS/Proceedings/Khasanov.pdf.

171. Чухланов, В. Ю. Разработка научных основ получения легких полимербетонов и защитных покрытий на основе кремнийорганических связующих: автореф. дис.… д-ра техн. наук: 05.23.05 / Чухланов Владимир Юрьевич. – Иваново, 2004. – 40 с.

172. Шафоростов, А. И. Возможности системы «Statistica quality control» при проведении научно-исследовательских работ / А. И. Шафоростов, А. В. Вытовтов, В. В. Шумилин // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. –Т. 2. № 1 (4). – С. 116-120.

173. Шимко, В. Ю. Противопожарные преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов для защиты объектов нефтегазового комплекса: автореф. дис. … к-та техн. наук: 05.26.03 / Шимко Василий Юрьевич. – М., 2018. – 24 с.

174. Ширяев, Е. В. Экспериментальная оценка эффективности гашения пламени углеводородных жидкостей в поддонах с гранулированным пеностеклом / Е. В. Ширяев // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 2023. - С. 553-557.

175. Щербаков, В. М. Формирование трудногорючих столярных плит: автореф. дис. … к-та техн. наук: 05.21.05 / Щербаков Виталий Маратович. – Санкт - Петербург, 2005. – 24 с.

176. Яковенко, Т. В. Сферопластики как термоизолирующие защитные материалы промышленного назначения / Т. В. Яковенко, Г. К. Яруллина, И. В. Гарустович, О. Н. Шишилов, Н. О. Мельников // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. Т.30 № 8. – С. 71-73.

177. Abrams, M. S. Compressive strength of concrete up to 1600◦F (871◦C) / M.S. Abrams // Temperature and Concrete. – 1968. – Special Publication SP - 25, American Concrete Institute, Detroit. – pp. 33-58.

178. Ahmed, G. N. An analytical approach for investigating the cases of spalling of high-strength concrete at elevated temperatures / G. N. Ahmed, J. P. Hurst // International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST Gaithersburg, MD, Feb. 13 – 14. – 1997. – paper B.6. – pp. 95-108.

179. Ahmed, M. Improving fire resistance and energy performance of fast buildings made of hollow polypropylene blocks / M. Ahmed, M. H. Aly Reda, Y. Mossa Abdullah, M. Mahmoud, H. Shoukry // Journal of Building Engineering, vol.46. – 2022. – pp. 1-14.

180. Anderson, H. Sundance Fire: an Analysis of Fire Phenomena. – USA: USDA Forest Serv. Res. Paper INT-56, 1968.

181. Ariyanayagam, A. Influence of cavity insulation on the fire resistance of lidght gauge steel framed walls / A. Ariyanayagam, M. Mahendran // Constraction and Building Materials. Queensland University of Technology (QUT), Brisbane, Australia, vol 203 – 2019, pp. 687-710.

182. Ariyanayagam, A. D. Detrimental effects of plasterboard joints on the fire resistance of light gauge steel frame walls / A. D. Ariyanayagam, S. Kesawan, M. Mahendran // Thin-Walled Struct. – 2016. - pp. 597-611.

183. Cohen, J. D. Wildland – urban fire - a different approach // Conf. Proccedings of the Firefigther Safety Summit. – Missoula, MT, 2001. – P. 32-54.

184. European Standard EN (SBI) 13823. Tests of building materials on fire. Building products, except for flooring materials, are exposed to thermal heat from a gas burner [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sp.se/en/index/services/firetest/building/firetest/bu%C3%ADlding/en/13823/sbi/Sidor/default.aspx.

185. Fedosov, S. V. Fiberglass thermal barrier for building safety / S. V. Fedosov, A. A. Lazarev, A. N. Maltsev, M. V. Toropova, I. A. Bogdanov // Materials Physics and Mechanics. 2024;52(4): 152-162.

186. Fisher, R. Barriers to fire spread in Australian tropical savannas, deriving fire edge metrics from long term high – frequency fire histories / R. Fisher, B. Lewis, O. Price, A. Pickford // Journal of Environmental Management 301 (2022) 113864.

187. Friday, O. To the engineering design of fire barriers made of drywall / O. Friday, S. Cramer // Achievements in the field of construction technologies Proceedings of the International Conference on Achievements in the Field of Construction Technologies 4-6 December 2002, Hong Kong, China, vol. 1, pp. 105-112.

188. Gostintsev, Yu. Aerodynamics and Combustion Products Transfer by Large Area Fires / Yu. Gostintsev, N. Kopylov, I. Khasanov // Combustion, Detonation, Shock Waves: Proceeding of the Zel'dovich Memorial, Int. Conf. on Combustion, Moscow, 1994. - V. 2. - P. 252-254.

189. Gunalan, S. Experimental study of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions / S. Gunalan, P. Kolarkar, M. Mahendran // Thin-Walled Structures. School of Civil Engineering and Built Environment, Science and Engineering Faculty, Queensland University of Technology, vol 65 – 2013, pp. 72-92.

190. Kesawan, S. A review of parameters influencing the fire performance of light gauge steel frame walls / S. Kesawan, M. Mahendran // Fire Technology, vol 54 (1) – 2018, pp. 3-35.

191. Kodur, R. Factors Influencing Fire Resistance of Load-bearing Steel Stud Walls / R. Kodur, M. Sultan // Fire Technology, vol 42 – 2006, pp. 5-26.

192. Murillo, M. Comparative experimental analysis of fire resistance of sandwich panels with polyisocyanurate core reinforced with fiberglass fabric / M. Murillo, Aura Acosta Pa, Claudia Quesada Qa, Valery Abisambra Ga, Bernardo F, Tutikyan Roberto Crist // International Journal of Heat and Mass Transfer // Case studies in the field of heat engineering, vol. 40 – December, 2022.

193. Mutsh, R. Protecting Lives and Property in Wildland – Urban interface: Communities in Montana and Southern California Adopt Australian Paradigm / R. Mutsh, M. Rogers, St. Scott, A. Gill // Fire Technology. – July, 2010. – P. 1-21.

194. NFPA 251: Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials.

195. Pat. US 200608392 O A1 United States of America, IPK A62C 2/10, A62C 3/00. External structure fire protection system «ESFPS» / S. Jens, L. Peter; опубл. 20.04.2006.

196. Pat. CN 101380506 (A) China, IPK A62C 3/02. Setting method of burn / L. Guangjy, D. Hongbin; опубл. 09.06.2007.

197. Pat. CN 102511355 (A) China, IPK A01G 23/00. Obstruction system of improved type biological fire proof forest belts and construction method there of / L. Guangjy, L. Binfaw, L. Yankun, L. Suyu, W. Zhawjie, N. Zhichend, J. Dan, Y.

198. Pereira, D. Heat transfer model of fire protection fiberglass thermal barrier coated with thin aluminium layer / D. Pereira, C. Viegas, M. Panão // International Journal of Heat and Mass Transfer. ADAI, LAETA, Mechanical Engineering Department, University of Coimbra, Rua Luis Reis Santos, Coimbra 3030-788, Portugal, vol.184 – March, 2022.

199. Takahashi, F. Whole – House Fire Blanket Protection From Wild Land – Urban interface Fires // frontiers in Mechanical Engineering, Pp 1-22.

200. Tao, Y. Fire tests and thermal analyses of LSF walls insulated with silica aerogel fibreglass blanket / Y. Tao, M. Mahendran // Fire Safety Journal. Queensland University of Technology (QUT), Brisbane, Australia, vol 122 – June, 2021.

201. The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange. - Washington, D.C.: Nat. Acad. Sci. Press, 1985.

202. Viegas, C. Active barrier combining fire-resistant fiberglass fabric and water sprinkler system for protection against forest fires / C. Viegas, R. Batista, A. Albino, M. Coelho, J. Andrade, D. Alves, D. Viegas // Fire Technol., vol. 57 - 2021, pp. 189-206.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 219622

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий" (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России) (RU)*

Авторы: *Малый Игорь Александрович (RU), Шарабанова Ирина Юрьевна (RU), Мальцев Алексей Николаевич (RU), Лазарев Александр Александрович (RU), Самойлов Дмитрий Борисович (RU)*

Заявка № **2023108064**
Приоритет полезной модели **30 марта 2023 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **28 июля 2023 г.**
Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **30 марта 2033 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

# ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 221505

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий" (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России) (RU)*

Авторы: *Малый Игорь Александрович (RU), Шарабанова Ирина Юрьевна (RU), Мальцев Алексей Николаевич (RU), Лазарев Александр Александрович (RU), Иванов Виталий Евгеньевич (RU)*

Заявка № **2023118396**
Приоритет полезной модели **11 июля 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **09 ноября 2023 г.**
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **11 июля 2033 г.**

*Руководитель Федеральной службы*
*по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Расчет коэффициента защиты

Для сравнительной оценки защитных свойств в материале при воздействии тепловых потоков различных мощностей введен коэффициент защиты ($\eta$) для сравнительной оценки защитных свойств огнезащитного материала из стеклопластика.

С целью исследования образца огнестойкого полотна из стеклопластика на основе кремнийорганического соединения от теплового излучения проведены стендовые и огневые испытания по установлению коэффициента защиты в случае применения огнезащитного полотна, проведена аппроксимация данных, получен коэффициент детерминации [91]. В соответствии с требованиями ГОСТа Р ИСО 6942-2007 [33] изготавливался образец стеклопластика размерами 230 х 80 мм из участков, не имеющих дефектов и расположенных на расстоянии не менее 20 мм от кромки материала.

Измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции, производились в соответствии с Государственным стандартом [34], которым установлен метод измерения плотности теплового потока с помощью измерителя плотности теплового потока ИПП-2, характеристики которого описаны в разделе 2.1. Погрешность в определении плотности теплового потока составила 5 %. Для установления эффективности применения огнезащитного полотна фиксировалось время до достижения температуры тыльной стороны образца в 100 °С на всех этапах проведения эксперимента. Данная температура была выбрана исходя из наблюдений и установлена как максимальная на тыльной стороне, не превышающей данный показатель. Исследование проводилось в помещении лаборатории на стенде, где располагался источник теплового излучения (Электрокамин «БУГ-1»). Перед источником вплотную размещался образец из тканного материала стеклопластика. За экраном, на котором размещен образец располагается прибор ИПП-2, зонд которого направлен к экрану (тыльная сторона

стеклопластика), а также термопара прибора ИР 2 ТРМ-1 для фиксации установленной температуры. Увеличению мощности создаваемого теплового потока способствовало передвижению подвижных рельс, на которых был закреплен экран с испытуемым образцом в сторону источника излучения. С помощью данного стенда определялись защитные свойства тканного материала стеклопластик от источника излучения. Температура воздуха в лаборатории составляла 27 °С. Относительная влажность воздуха составляла не более 85%.

Проведение данного измерения позволило оценить расход тепла через материал стеклопластик и, тем самым, определить теплотехнические качества материала, служащего в качестве огнезащитного полотна [91].

Коэффициент защиты от теплового излучения при различных значениях теплового потока оценивался по формуле (3.1.1):

$$\eta = \frac{t}{t_{\text{пс}}} \tag{3.1.1}$$

где $t$ – время достижения контрольной температуры при использовании защитного полотна из стеклопластика, с; $t_{пс}$ – время достижения контрольной температуры без использования защитного полотна из стеклопластика, с.

$$\eta^{0,05} = \frac{1040}{600} = 1{,}73 \tag{3.1.2}$$

$$\eta^{0,1} = \frac{812}{420} = 1{,}93 \tag{3.1.3}$$

$$\eta^{0,2} = \frac{764}{411} = 1{,}85 \tag{3.1.4}$$

$$\eta^{0,3} = \frac{722}{378} = 1{,}91 \tag{3.1.5}$$

$$\eta^{0,4} = \frac{641}{356} = 1{,}80 \tag{3.1.6}$$

$$\eta^{0,5} = \frac{601}{321} = 1{,}87 \tag{3.1.7}$$

$$\eta^{0,6} = \frac{554}{300} = 1{,}84 \tag{3.1.8}$$

$$\eta^{0,7} = \frac{472}{245} = 1{,}92 \tag{3.1.9}$$

$$\eta^{0,8} = \frac{371}{154} = 2{,}41 \quad (3.1.10)$$

$$\eta^{0,9} = \frac{265}{99} = 2{,}68 \quad (3.1.11)$$

$$\eta^{1} = \frac{196}{57} = 3{,}44 \quad (3.1.12)$$

В таблице 3.1 приведены результаты лабораторных испытаний по определению коэффициента защиты от воздействия лучистого теплового потока.

Таблица – 3.1. Результаты лабораторных испытаний по определению коэффициента защиты от воздействия теплового потока

| № Эксперимента | Плотность теплового потока, кВт/м$^2$ | Время достижения контрольной температуры, с | | Коэффициент защиты |
|---|---|---|---|---|
| | | без использования защитного полотна из стеклопластика | при использовании защитного полотна из стеклопластика | |
| 1. | 0,05 | 600 | 1040 | 1,73 |
| 2. | 0,1 | 420 | 812 | 1,93 |
| 3. | 0,2 | 411 | 764 | 1,85 |
| 4. | 0,3 | 378 | 722 | 1,91 |
| 5. | 0,4 | 356 | 641 | 1,80 |
| 6. | 0,5 | 321 | 601 | 1,87 |
| 7. | 0,6 | 300 | 554 | 1,84 |
| 8. | 0,7 | 245 | 472 | 1,92 |
| 9. | 0,8 | 154 | 371 | 2,41 |
| 10. | 0,9 | 99 | 265 | 2,68 |
| 11. | 1 | 57 | 196 | 3,44 |

Как видно из таблицы 3.1 среднее значение коэффициента защиты стеклопластика на основе кремнийорганического соединения при различных плотностях тепловых потоков в лабораторных испытаниях составило 2.13.

На рисунке 3.1 зависимости времени достижения контрольной температуры от плотности теплового потока как без защитного полотна из стеклопластика, так и при его использовании. Проведена аппроксимация данных. Погрешность измерения составила не более 6% во всех случаях, что свидетельствует о достоверности полученных данных.

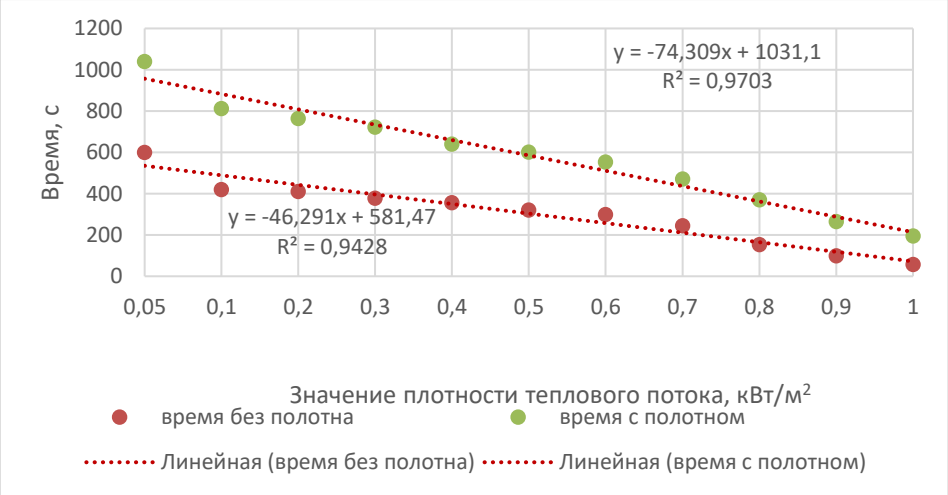



Рисунок 3.1 – Зависимость времени достижения контрольной температуры от плотности теплового потока

Далее проводился аналогичный эксперимент в полевых условиях (огневые испытания). Методика и условия проведения эксперимента отражены в разделе 4.2 и публикации [89]. Отличительной особенностью проведения данного эксперимента от лабораторного заключается в большем значении плотности теплового потока, излучаемым тестовым очагом за счет открытого пламенного горения сухой травянистой растительности. Эффективность защиты оценивалась по формуле (3.1.1).

$$\eta^{0,5} = \frac{1468}{734} = 2 \quad (3.1.13)$$

$$\eta^{1} = \frac{1311}{686} = 1,91 \quad (3.1.14)$$

$$\eta^{2} = \frac{992}{513} = 1,93 \quad (3.1.15)$$

$$\eta^3 = \frac{779}{378} = 2{,}06 \quad (3.1.16)$$

$$\eta^4 = \frac{661}{346} = 1{,}91 \quad (3.1.17)$$

$$\eta^5 = \frac{601}{302} = 1{,}99 \quad (3.1.18)$$

$$\eta^6 = \frac{549}{273} = 2{,}01 \quad (3.1.19)$$

$$\eta^7 = \frac{472}{230} = 2{,}05 \quad (3.1.20)$$

$$\eta^8 = \frac{304}{122} = 2{,}49 \quad (3.1.21)$$

$$\eta^9 = \frac{196}{86} = 2{,}27 \quad (3.1.22)$$

$$\eta^{10} = \frac{153}{71} = 2{,}15 \quad (3.1.23)$$

В таблице 3.2 приведены результаты полевых испытаний по определению коэффициента защиты от воздействия лучистого теплового потока.

Таблица – 3.2. Результаты полевых испытаний по определению коэффициента защиты от воздействия теплового потока

| № Эксперимента | Плотность теплового потока, кВт/м$^2$ | Время достижения контрольной температуры, с | | Коэффициент защиты |
|---|---|---|---|---|
| | | без использования защитного полотна из стеклопластика | при использовании защитного полотна из стеклопластика | |
| 1. | 0,5 | 734 | 1468 | 2 |
| 2. | 1 | 686 | 1311 | 1,91 |
| 3. | 2 | 513 | 992 | 1,93 |
| 4. | 3 | 378 | 779 | 2,06 |
| 5. | 4 | 346 | 661 | 1,91 |
| 6. | 5 | 302 | 601 | 1,99 |
| 7. | 6 | 273 | 549 | 2,01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 8. | 7 | 230 | 472 | 2,05 |
| 9. | 8 | 122 | 304 | 2,49 |
| 10. | 9 | 86 | 196 | 2,27 |
| 11. | 10 | 71 | 153 | 2,15 |

По данным из таблицы 3.2 среднее значение коэффициента защиты материала стеклопластика на основе кремнийорганического соединения при различных тепловых потоках в полевых испытаниях составило 2,07.

На рисунке 3.2 показаны зависимости времени достижения контрольной температуры от плотности теплового потока при использовании огнезащитного полотна и без него в условиях огневых испытаний. Проведена аппроксимация данных. Погрешность измерения составила не более 6% во всех случаях, что свидетельствует о достоверности полученных данных.

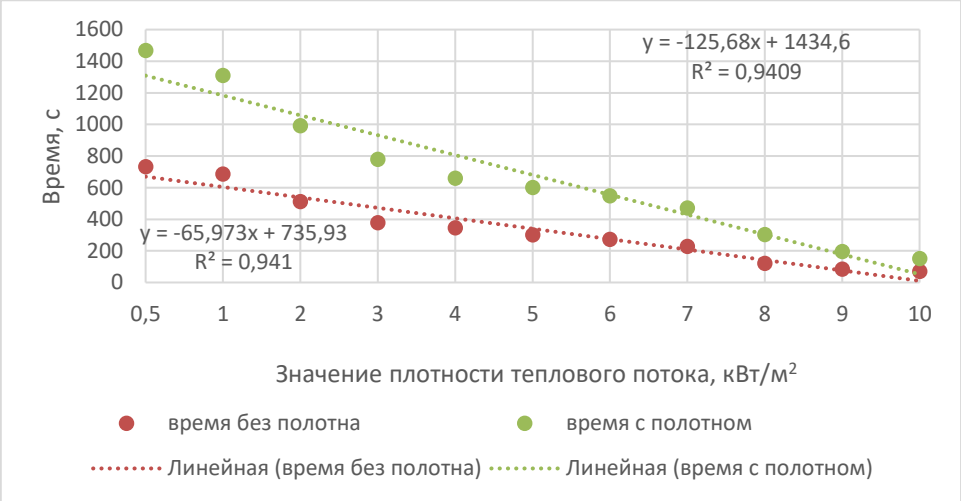



Рисунок 3.1 – Зависимость времени достижения контрольной температуры от плотности теплового потока

Таким образом полученные значения коэффициентов защиты при проведении лабораторных и огневых (полевых) испытаний на основе кремнийорганического соединения свидетельствуют о положительных качествах используемого материала стеклопластика и его применения в качестве огнезащитного материала при изготовлении ПП для защиты от ландшафтных пожаров.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Определение средней величины тепловыделения ТОП – 2

Данный расчет по определению средней величины тепловыделения от ТОП – 2 (тестового очага пожара в виде распространяющегося фронта пламени) выполнен на основе публикации [170]. Средняя величина тепловыделения с единицы кромки фронта конфлаграционного типа пожара оценивается по формуле (4.1):

$$J = (S^{0,5} * m * H) / (\pi^{0,5} * t) \quad (4.1)$$

где: *t*-время горения, с, равное 480; *S*-общая площадь пожара, м$^2$, равная 4 м$^2$; *m*-горючая нагрузка, кг/м$^2$, где на 1 м$^2$ площади горения приходится 1 кг горючей нагрузки); *H*-теплота сгорания 1 кг горючего материала, МДж/кг.

$$J = (2 * 4 * 1) / (1,57 * 480) = 0,011 \text{ МВт/м}^2 \quad (4.2)$$

Далее определялась средняя величина тепловыделения с единицы площади пожара по формуле (4.3):

$$Q = (m * H) / t \quad (4.3)$$

$$Q = (4 * 1) / 480 = 0,008 \text{ МВт/м}^2 \quad (4.4)$$

Средняя величина тепловыделения, выделяемая ландшафтным пожаром с 1 м$^2$ площади 0,008 МВт/м$^2$, что составляет 8 кВт/м$^2$.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Свидетельство о государственной регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2025620979

**База данных по теплофизическим характеристикам для разработки устройств в целях предотвращения распространения ландшафтного пожара**

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (RU)***

Авторы: ***Мальцев Алексей Николаевич (RU), Лазарев Александр Александрович (RU), Шварев Евгений Анатольевич (RU), Сторонкина Ольга Евгеньевна (RU), Титов Валерий Александрович (RU)***

Заявка № **2025620518**

Дата поступления **24 февраля 2025 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре баз данных ***03 марта 2025 г.***

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

# ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Расчет плотности теплового потока, направленного во второй скат огнезащитного полотна

Основой для расчета является уравнение лучистого теплообмена [173]:

$$q = c_{1-2}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\varphi_{1-2} \qquad (6.1)$$

где $q$ – плотность теплового потока, Вт/м$^2$; $T_1$, $T_2$ – абсолютные температуры факела и воспринимаемой поверхности материала, К; $c_{1-2}$ – приведенный коэффициент излучения в системе «плотно (1) – полотно (2)», равный 5,7 Вт/(м$^2$*К$^4$)**;** $\varphi_{1-2}$ – угловой коэффициент излучения.

Данные, используемые для расчета по формуле (6.1) приведены в таблице 6.1. Результаты расчета, представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.1 – Данные, используемые для расчета плотности теплового потока

| № п/п | Время, мин | Температура факела пламени, К | Температура воспринимаемой поверхности материала, К |
|---|---|---|---|
| 1. | 1 | 275 | 267 |
| 2. | 2 | 311 | 294 |
| 3 | 3 | 440 | 400 |
| 4. | 4 | 548 | 489 |
| 5. | 5 | 462 | 408 |
| 6. | 6 | 438 | 411 |
| 7. | 7 | 319 | 298 |
| 8. | 8 | 266 | 241 |

Таблица 6.2 – Результаты расчета плотности теплового потока

| Значение плотности теплового потока q, Вт/м$^2$ | 4,7 | 14 | 88 | 244,6 | 132,3 | 61,3 | 18,3 | 12,1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Время, мин | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

Ивановская область
Шуйский муниципальный район
Остаповское сельское поселение

УТВЕРЖДАЮ
Глава Остаповского
сельского поселения
А.Ю. Федулов
«__» 2025 г.

АКТ
внедрения результатов диссертационной работы
Мальцева Алексея Николаевича по специальности
2.10.1 Пожарная безопасность

Комиссия в составе заместителя главы администрации Донской И.Ю., старшего инспектора администрации Ягодкиной Н.В., главного специалиста Вахтиной О.Н. настоящим подтверждает, что опытно-экспериментальный образец противопожарной преграды, изготовленный с учетом Патентов на полезную модель 219622 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 2/06, A62C 3/02. Устройство для предотвращения распространения ландшафтного пожара и 221505 U1 (RU), Российская Федерация, МПК A62C 2/06, A62C 3/02. Устройство для предотвращения распространения ландшафтного пожара позволяет ограничивать распространение огня при горении нижних ярусов сухой травянистой растительности, где отсутствует возможность создания минерализованных полос и применяется в практической деятельности на территории сельского поселения.

Председатель комиссии Донская И.Ю.
Члены комиссии: Ягодкина Н.В.
Вахтина О.Н.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Сравнительная оценка экономической эффективности различных способов в ограничении распространения низового ландшафтного пожара

Оценка экономической эффективности играет ключевую роль в принятии управленческих решений относительно реализации новых проектов и технических решений. От правильного выбора методики зависят не только финансовые результаты деятельности, но и целесообразность присутствия продукции на рынке и долгосрочная перспектива развития. Современные подходы к анализу предлагают широкий спектр инструментов, позволяющих оценивать проекты комплексно, учитывая различные аспекты — от текущих затрат и ожидаемых выгод до степени риска и влияния внешней среды.

Одним из важнейших этапов подготовки любого проекта является разработка технического и экономического обоснования, которое включает обоснование рациональности вложений и предполагаемого результата. Для этого применяются специальные методы сравнительного анализа, позволяющие сравнивать разные варианты решений по критериям экономической привлекательности. Эти методы помогают выявлять сильные и слабые стороны предлагаемых решений, снижать уровень неопределённости и формировать стратегию принятия обоснованных управленческих решений.

Наиболее распространёнными среди таких методов являются метод экспертных оценок, позволяющий привлекать профессиональные суждения компетентных специалистов, и метод коэффициента эквивалентности, обеспечивающий точное сопоставление различных по сути технических решений, направленных на выполнение одинаковой задачи. Оба метода обладают своими достоинствами и недостатками, что делает необходимым комбинированный подход к исследованию, способствующий повышению точности и обоснованности полученных результатов.

Таким образом, правильный выбор методик оценки экономической эффективности становится залогом успешного внедрения инноваций, повышения конкурентоспособности организации и устойчивого роста её финансового потенциала. Внедрение новых технических решений требует учета не только изменяющихся эксплуатационных параметров, но и сопоставления затрат, связанных с реализацией этих решений. В основе эксплуатационных затрат лежат потребности используемой техники и оборудования в обслуживании для нормальной эксплуатации. Так как сравниваемые варианты способов защиты от ландшафтных пожаров имеют слишком большую разницу в механизме реализации, то целесообразно в качестве стоимостных параметров рассматривать только капитальные затраты на их реализацию. Эксплуатационные затраты будут описаны количественными показателями и лягут в основу сравнительного анализа по показателю коэффициента эквивалентности, который на основании оценки важности каждого из сравниваемого показателя позволит сопоставить вложения денежных средств.

Одними из общих параметров, которые присутствуют при оценке реализации каждого из варианта является трудоемкость, частота обслуживания, наименьшая потребность в людском ресурсе и скорость (оперативность) реализации. Оценка параметров осуществлялась на основе изложенных данных в контрактно-сметной документации муниципальных образований, размещенной на официальном сайте Единой информационной системы в сфере закупок.

Показатель трудоемкость (чел/м) измерялся на основе стандартов и норм времени.

Сравниваемая противопожарная преграда является мобильной и универсальной. Для ее установки достаточно одного человека, который в течение 10 минут способен ее привести в необходимое положение для предотвращения распространения пожара. Тогда, как на реализацию сравниваемых мероприятий, необходимо затратить в 2-6 раз больше времени, при этом для организации встречного пала потребуется вовлечение не менее четырех человек.

Показатель частота обслуживания (раз/год) измерялся на основе договорной (контракты и соглашения) документации муниципальных образований, а также календарных отчетов. Сравнение запланированных сроков с фактическими позволяют оценить отставание или опережение графика обслуживания.

Показатель скорость реализации измерялся на основе анализа предыдущих мероприятий. Показатель, учитывающий минимальную потребность в людском ресурсе, определялся из отчетов табелей рабочего времени работников.

Для оценки важности каждого из параметров с помощью метода экспертных оценок был проведен анализ анкет глав сельских населенных пунктов муниципальных образований (табл. 8.1). Каждому из приведенных параметров в таблице 8.2. присваивался определенный бал по 10 бальной шкале в зависимости от среднего значения каждого из сравниваемых показателей по результатам анализа анкет экспертов.

Таблица 8.1 – Результаты анкетирования

| Показатели (параметры): | **Э1** | **Э2** | **Э3** | **Э4** | **Э5** | **Э6** | **Э7** | **Э8** | **Э9** | **Э10** | **Среднее значение** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Трудоемкость, чел/м | 10 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 | 9 | 10 | 9 | 8 | 8,7 (**I**) |
| Частота обслуживания, раз/год | 10 | 8 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 10 | 8,6 (**II**) |
| Минимальная потребность в людском ресурсе | 8 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 10 | 9 | 8,3 (**IV**) |
| Скорость реализации | 9 | 9 | 10 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8,5 (**III**) |

По результатам анкетирования, приведенных в таблице 8.1 делаем вывод, что наиболее важным параметром при оценке способов защиты от ландшафтных пожаров является трудоемкость, поэтому по степени важности данному показателю присваивается 10 баллов. Далее распределим баллы важности с шагом 2 единицы по остальным параметрам с учетом ответов экспертов. На втором месте по степени важности является частота обслуживания с 8 баллами. Далее по степени важности является скорость реализации с 6 баллами. За ним расположился показатель, учитывающий задействование в потребности людского ресурса с 4 баллами.

Следует иметь в виду, что коэффициент эквивалентности определяется по каждому виду сравниваемых способов борьбы с низовыми ландшафтными пожарами как средневзвешенный арифметический показатель (8.1):

$$К_Э = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i} \quad (8.1)$$

где $К_Э$ - коэффициент эквивалентности;

$q_i$ - относительный показатель качества i характеристики варианта организации противопожарной преграды;

$\alpha_i$ - коэффициент значимости относительных показателей качества;

n - количество показателей качества.

Методика предполагает парные сравнения рассматриваемых вариантов, для которых принимается следующее условие: вариант 1 – стоимость которого превышает стоимость варианта 2 в сравниваемой паре. Относительные показатели качества определяются из следующих условий:

Если увеличение количественного значения рассматриваемой характеристики варианта организации противопожарной преграды, говорит об ее преимуществах, то расчет относительного показателя качества q проводится по следующей формуле (8.2):

$$q_i = \frac{P_{\text{вариант 1}}}{P_{\text{вариант 2}}} \quad (8.2)$$

где: $P_{вариант\ 1}$ – количественная характеристика более дорого варианта организации противопожарной преграды;

$P_{вариант\ 2}$ – количественная характеристика дешевого варианта организации противопожарной преграды.

Если уменьшение количественного значения рассматриваемой характеристики варианта организации противопожарной преграды, говорит об ее преимуществах, то расчет относительного показателя качества q проводится по следующей формуле (8.3):

$$q_i = \frac{P_{\text{вариант 2}}}{P_{\text{вариант 1}}} \quad (8.3)$$

Для сопоставления по стоимостному параметру используется следующее выражение (8.4):

$$К_{\text{цена}} = \frac{Ц_{\text{вариант 1}}}{Ц_{\text{вариант 2}}} \quad (8.4)$$

где: Ц $_{\text{вариант 1}}$ и Ц $_{\text{вариант 2}}$ – показатели цены нового и традиционных способов защиты.

Если Кэ>Кц – выбираем новый вариант, в остальных случаях традиционный.

В таблице 8.2 приведены способы защиты от низовых ландшафтных пожаров со сравниваемыми параметрами показателей. Необходимо отметить, что параметры показателей, учитываемых при сравнении характерны для каждого из рассматриваемых способов.

Таблица 8.2 – Способы защиты от низовых ландшафтных пожаров по характерным для них показателям

| Показатели (параметры): | Трудоемкость, чел/м | Частота обслуживания, раз/год | Минимальная потребность | Скорость реализации | Стоимость, руб. |
|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | в людском ресурсе | | |
| Лучше | ниже | ниже | ниже | ниже | |
| Противопожарная преграда | 10 | 1 | 1 | 1 | 20000 |
| Встречный пал | 20 | 2 | 4 | 2 | 32000 |
| Очистка от валежника | 60 | 2 | 1 | 1 | 16000 |
| Важность | 10 | 8 | 4 | 6 | |

По результатам сравнительного анализа способов борьбы с низовыми ландшафтными пожарами определено, что стоимость организации встречного пала на 60% превышает стоимость противопожарной преграды, при этом по технико-эксплуатационным характеристикам противопожарная преграда показывает себя лучше, что позволяет рассматривать ее как оптимальный вариант. При сравнении очистки территории от валежника и противопожарной преграды стоит заметить, что применение противопожарной преграды на 25% дороже, при этом по технико-эксплуатационным характеристикам противопожарная преграда в 4 раза эффективнее.

Проведенный сравнительный анализ различных вариантов защиты от низовых ландшафтных пожаров позволил выявить преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых подходов. Использование для этого метода экспертных оценок дало возможность учесть специфические характеристики исследуемого проекта, включив в рассмотрение мнение опытных специалистов, знакомых с особенностями организации подобного вида работ. Применение метода коэффициента эквивалентности обеспечило высокую точность расчётов и

позволило привести сравниваемые варианты к единой оценочной шкале, что повысило объективность проводимого анализа.

Оба метода продемонстрировали свою эффективность и взаимодополняемость, позволив получить рекомендации по выбору наилучшего варианта. Таким образом, проведённый анализ подтвердил целесообразность использования варианта с противопожарной преградой и является оптимальным.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Византия»
О.Н. Закирова
«05» 08 2025 г.

**АКТ**
внедрения результатов диссертационной работы
Мальцева Алексея Николаевича в практическую деятельность предприятия

Комиссия ООО «Византия» в составе, мастера производства Е.Г. Кауткиной, мастера производства Т.В. Демидовой и кладовщика В.В. Одинцовой настоящим подтверждают, что результаты научных исследований соискателя ученой степени кандидата наук Мальцева Алексея Николаевича внедрены в практическую деятельность и использованы для выпуска опытно-промышленной партии негорючих материалов «Стеклоткань РС-28».

Председатель комиссии Е.Г. Кауткина
Члены комиссии: Т.В. Демидова
В.В. Одинцова

# ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель начальника
Ивановской пожарно-спасательной
академии ГПС МЧС России
по учебной работе
полковник внутренней службы
А.С. Федоринов
«19» 05 2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Мальцева Алексея Николаевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки) в образовательную деятельность Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе:

Председатель комиссии – начальник кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ (в составе УНК «Пожаротушение») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, к.т.н., доцент подполковник внутренней службы Никишов С.Н.

Члены комиссии:

– заместитель начальника кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ (в составе УНК «Пожаротушение») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России полковник внутренней службы Орлов Е.А.

– преподаватель кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ (в составе УНК «Пожаротушение») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России майор внутренней службы Катин Д.С.

Подтверждает, что результаты диссертационной работы Мальцева Алексея Николаевича применяются при организации и проведении учебных занятий по дисциплинам кафедры.

Председатель комиссии:
Начальник кафедры пожарной тактики
и основ аварийно-спасательных
и других неотложных работ
(в составе УНК «Пожаротушение»)
Ивановской пожарно-спасательной
академии ГПС МЧС России, к.т.н, доцент
подполковник внутренней службы Никишов С.Н.