

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы

На правах рукописи



Круглов Евгений Юрьевич

**ОГНЕСТОЙКОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ
ЛЕГКИХ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ПОЛИМЕРНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(отрасль строительство, технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Борис Борисович Серков

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МАЛОЭТАЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ДЕРЕВЯННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	12
1.1. Развитие малоэтажного строительства в России и за рубежом.....	12
1.2. Пожарная опасность и огнестойкость легких деревянных каркасных конструкций (ЛДКрК).....	19
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	32
2.1. Объекты исследования.....	32
2.2. Методы исследования.....	34
ГЛАВА 3. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.....	40
ГЛАВА 4. ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ.....	59
ГЛАВА 5. ОГНЕСТОЙКОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ ЛЕГКИХ ДЕРЕВЯННЫХ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	76
5.1. Определение фактического предела огнестойкости ограждающих ЛДКрК и вклад в огнестойкость ее составляющих элементов.....	80
5.2. Теплофизические и теплозащитные свойства ограждающих ЛДКрК и составляющих ее элементов.....	94

ГЛАВА 6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ ЛЕГКИХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОЛИМЕРНОЙ ТЕЛПОИЗОЛЯЦИЕЙ.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
Приложение А ПРОТОКОЛЫ ИСПЫТАНИЙ.....	129
Приложение Б АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Применение натуральной древесины для строительства зданий и сооружений разного назначения имеет многовековую историю. Горючесть и высокая пожарная опасность древесины надолго ограничили её применение малоэтажным домостроением. Индустриальное производство новых конструкционных материалов из древесины открыло перспективы применения прогрессивных каркасных и каркасно-панельных технологий в строительстве не только малоэтажных, но и среднеэтажных и даже высотных зданий. По сравнению с конструкциями из других материалов (кирпича, железобетона или металла) деревянные конструкции обладают большим преимуществом по ряду показателей. Помимо того, что данный сырьевой ресурс является возобновляемым и экологически безопасным, а производство продукции из древесины менее энергозатратно, следует отметить стойкость данного материала к агрессивным средам, хорошие звуко- и теплоизолирующие свойства, высокую механическую прочность при относительно небольшой плотности. Соответственно, меньший вес деревянных конструкций приводит к снижению нагрузки здания на фундамент и сбережению трудозатрат на его возведение.

В мире широкое распространение получило строительство мало- и среднеэтажных деревянных зданий и сооружений легкого каркасного типа, потребность в которых постоянно возрастает. В Российской Федерации наблюдается высокий темп малоэтажного строительства торговых центров, офисов и жилых зданий с ограждающими и несущими легкими деревянными каркасными конструкциями (ЛДКрК). Их обычно относят к V степени огнестойкости, предел которой по закону РФ № 123-ФЗ не нормируется. Анализ пожаров, происшедших в зданиях с применением деревянных конструкций, свидетельствует о том, что пожарная опасность таких объектов обусловлена образованием высокой скоростью тепловыделения при горении древесины, интенсивной динамикой развития пожара, со-

зданием условий для объёмной вспышки, быстрым наступлением критических значений для человека опасных факторов пожара (ОФП), в частности, высокой дымообразующей способностью и токсичностью продуктов горения. Согласно статистическим данным, 80% пожаров происходят в жилом секторе, где гибнет около 90%, от общего количества погибших при пожаре по стране.

ЛДКрК являются многослойными и состоят из деревянного каркаса и обшивок (облицовочных плит) пространство между ними может быть пустым или заполнено теплоизоляционным материалом (ТИМ).

Важной проблемой в строительстве деревянных зданий и сооружений каркасного типа является обеспечение не только требуемого уровня огнестойкости и пожарной безопасности, но и обеспечение их эффективной теплозащиты. В условиях холодного климата России проблема энергосбережения за счет снижения потери тепла через ограждающие конструкции зданий разного назначения особенно актуальна. Она рассматривается как приоритетная в Государственной программе РФ «Энергосбережение и повышение энергоэффективности на период до 2020 года».

Актуальным является определение таких неизученных ранее показателей пожаробезопасности, как огнестойкость новых вариантов конструктивного исполнения ЛДКрК, характеристик тепловыделения, рекомендуемых к применению материалов, показателей их пожарной опасности, усадки, коэффициента теплопроводности и пр.

Перспективным направлением в решении проблемы одновременного повышения огнестойкости и эффективности теплозащиты деревянных зданий и сооружений легкого каркасного типа является применение инновационных облицовочных и теплоизоляционных материалов нового поколения с высокими пожарно-техническими характеристиками, а также новых эффективных средств огнезащиты. Успешное решение этой проблемы требует комплексного анализа поведения при пожаре всех составляющих элементов деревянных конструкций, знания базовых характеристик материалов этих элементов, углубленного изучения закономерностей их термического разрушения.

Актуальность темы диссертационного исследования подтверждается тем, что она находится в согласии с последними Постановлениями Правительства РФ (№868 от 10.05.2016г. и №940/пр от 14.12.2016г.) и дорожной карты по господдержке развития деревянного домостроения.

Целью работы является научное обоснование обеспечения пожарной безопасности и повышения огнестойкости ограждающих ЛДКрК за счет применения современного негорючего облицовочного стекломгнезитового материала, инновационного трудногорючего полимерного пенокомпозита «PENOCOM», карбонизирующегося типа в качестве теплоизоляции, а также обработки деревянных элементов новыми огнезащитными средствами.

Научная концепция исследования: для прогнозирования уровня пожарной безопасности и огнестойкости ограждающих ЛДКрК необходимо знание свойств, термического поведения и взаимного влияния **всех элементов** указанных конструкций.

Поставленная цель предопределила следующие задачи исследования:

- провести анализ научно-технической литературы о применении и свойствах современных облицовочных и теплоизоляционных материалов при строительстве малоэтажных деревянных каркасных объектов;

- определить с помощью стандартного проточного калориметра OSU (ASTM E 906) характеристики тепловыделения при горении древесины хвойных и лиственных пород элементов конструкций в зависимости от разных факторов: плотности внешнего радиационного теплового потока, наличия локального источника зажигания, влажности образцов, типа огнезащитной обработки древесины;

- методами термического анализа определить механизм и эффективные макрокинетические параметры термического и термоокислительного разложения полимерного пенокомпозита «PENOCOM», формоустойчивость при повышенной температуре в сравнении с другими видами теплоизоляции;

- провести огневые испытания в условиях стандартного режима пожара фрагментов ограждающих деревянных конструкций с различной комбинацией со-

ставляющих элементов, определить фактический предел огнестойкости ограждающих конструкций и вклад каждого составляющего элемента;

- разработать модель теплопередачи в ограждающей деревянной легкой каркасной конструкции. Методом конечных элементов с привлечением программного комплекса ANSYS Mechanical провести теплотехнический расчет некоторых многослойных вариантов систем конструкций с полимерной и неорганической теплоизоляцией. Сравнить результаты расчета и эксперимента.

Объектом исследования являются образцы древесины двух хвойных и двух лиственных пород; трех- и четырехслойные ограждающие деревянные несущие каркасные конструкции с различной комбинацией облицовок и теплоизоляции; огнезащитные средства для древесины.

Предметом исследования является определение огнестойкости ограждающих деревянных легких каркасных конструкций, материальных характеристик элементов конструкций, эффективности огнезащитных средств.

Экспериментальное исследование базируется на анализе фундаментальных работ в области пожарной опасности и огнестойкости строительных объектов (в том числе деревянных) отечественных и зарубежных ученых, таких, как Яковлев А.И., Ройтман М.Я., Кошмаров Ю.А., Романенко И.Г., Ройтман В.М., Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., White R.H., Vabrauskas V., Takeda H., Janssens M.L., Konig J., Mehaffey J.R., и др. В области огнезащиты древесины учтены работы Леоновича А.А., Покровской Е.Н., Таубкина С.И., Корольченко А.Я., Берлина А.А., Халтуринского Н.А., Серкова Б.Б., Сивенкова А.Б., Асеевой Р.М., Ostman B., Diemberger M.A., Kozlowski R. и др.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые с помощью стандартного проточного калориметра OSU марки HRR-3 (США) получены базовые характеристики тепловыделения для образцов древесины хвойных и лиственных пород, широко используемых в отечественном строительстве деревянных зданий и сооружений. Показано, что обработка древесины огнезащитными средствами с разным механизмом действия приводит к значительному (в 2 – 9 раз) снижению общего тепловыделения при пламенном горе-

нии древесины, а также снижению интенсивности нарастания скорости тепловыделения как на стадии пламенного, так и тлеющего горения.

2. Впервые установлен механизм и определены эффективные макрокинетические параметры пиролиза и термоокислительного разложения трудногорючего полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» и его формоустойчивость при повышенной температуре в сравнении с другими видами ТИМ.

3. При стандартном режиме пожара определены фактический предел огнестойкости несущих ограждающих ЛДКрК с разной комбинацией облицовочных плит и ТИМ, а также вклад каждого из составляющих элементов. Впервые показано, что в случае одинакового сочетания облицовочных плит (СМЛ - стекломагнезитовых листов и OSB – ориентированная стружечная плита (oriented strand board)) замена базальтволоконистой плиты «Rockwool Light», толщиной 150 мм на полимерную теплоизоляцию «PENOCOM» такого же размера, позволяет увеличить фактический предел огнестойкости ограждающей конструкции почти в 2 раза (с EI 52,5 до EI 110).

4. По изменению температуры на поверхности элементов ограждающих ЛДКрК при стандартном режиме пожара впервые оценены значения коэффициентов удельной теплопроводности СМЛ и ТИМ «PENOCOM» до начала его разложения. Показано влияние температуры на приведенное термическое сопротивление неорганической и полимерной ТИМ и некоторых систем конструкций.

5. Разработана одномерная модель прогрева ограждающих ЛДКрК с полимерной теплоизоляцией. Впервые, численные теплотехнические расчеты конструкций с полимерной и неорганической ТИМ, методом конечных элементов с привлечением программного комплекса ANSYS Mechanical, показали результаты, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными результатами по значению предела огнестойкости конструкций и вклада отдельных элементов.

Достоверность изложенных в диссертации положений и выводов обеспечивается:

- применением апробированных физико-химических и физико-математических методов, экспериментальным исследованием и их тщательным анализом;
- использованием комплекса современных сертифицированных приборов и устройств для определения свойств пожарно-технических характеристик материалов и конструкций;
- удовлетворительным согласием результата эксперимента и численного расчета по оценке огнестойкости конструкций.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных базовых данных о характеристиках тепловыделения древесины разных пород, теплофизических свойствах СМЛ и полимерного пенокомпозиата «PENOCOM», макрокинетических параметрах разложения полимерной теплоизоляции для моделирования динамики развития пожара, прогнозирования нарастания опасных факторов пожара в помещениях деревянных каркасных зданий различного функционального назначения, для расчета предела огнестойкости ограждающих деревянных конструкций, включающих указанные материалы, при сценариях пожара, отличающихся от стандартного. Результаты работы показывают, что трудногорючий, неплавкий, коксообразующий и не тлеющий после удаления источника нагрева полимерный пенокомпозиат «PENOCOM» может успешно конкурировать с базальтоволокнистой теплоизоляцией в обеспечении пожарной безопасности и повышении огнестойкости ограждающих деревянных конструкций. С учетом преимуществ материала «PENOCOM» по технологии производства, вариативности методов применения на строительных объектах и экономической эффективности, обоснованы рекомендации по широкому использованию этого материала в строительстве (для теплоизоляции внешних и внутренних конструкций зданий, фасадов, стен и перегородок, чердачных перекрытий и пр.). Значительный интерес может представлять применение этого ТИМ в сочетании с СМЛ для производства SIP - панелей с несущими и ограждающими функциями.

Материалы диссертации реализованы:

- при разработке курса лекций по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре» в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России;

- при написании монографий: «Горение древесины и ее пожароопасные свойства» (Академия ГПС МЧС России, 2010) и «Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings» (Springer, Germany, 2014);

- в научно-исследовательской деятельности Оренбургского филиала ФГБУ ВНИИПО МЧС России использованы значения скорости тепловыделения при горении древесины при моделировании пожара в зданиях с использованием полевой модели FDS с целью повышения пожарной безопасности в зданиях с применением легких деревянных каркасных конструкций;

- при проведении строительной экспертизы зданий и сооружений АНО «Технопарк ОГУ» использован метод расчета огнестойкости деревянных легких каркасных конструкций с полимерной и неорганической теплоизоляцией с целью повышения пожарной безопасности в зданиях с применением легких деревянных каркасных конструкций;

- в ООО НПП «Промтехнология» при разработке специальных технических условий при проектировании здания административного назначения по адресу: Республика Казахстан, Актюбинская область, г. Актобе, с. Каргалинское.

Основные результаты работы были доложены на: 14 международных и всероссийских конференциях: Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности», (г. Москва, ВНИИПО МЧС России, 2009); 10-й Международной конференции по химии и физикохимии олигомеров «Олигомеры-Х» (г. Волгоград, ВолгГТУ, 2009); VI Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести», (г. Вологда, ВоГУ, 2011); XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института (г. Москва, ВНИИПО МЧС России, 2012); 17-й, 18-й, 19-й и 20-й Международных научно-практических конференциях «Системы безопасности», (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2008, 2009, 2010, 2011 гг.); Международной конференции «Оценка

рисков и безопасность в строительстве. Новое качество и надежность строительных материалов и конструкций на основе высоких технологий», (г. Москва, МГСУ, 2012); Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России», (г. Москва, ВИАМ, 2012); Всероссийская конференция «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики», (г. Томск, ТПУ, 2012); V Международной конференции-школы по химии и физикохимии олигомеров (г. Волгоград, ВолгГТУ, 2015), V Международной научно-практической конференции «Ройтмановские чтения» (г. Москва, 2017), VIII Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести», (г. Алматы, 2017).

На защиту выносятся:

- характеристики тепловыделения древесины хвойных и лиственных пород (скорость тепловыделения, общее тепловыделение, интенсивность нарастания скорости тепловыделения, эффективная теплота сгорания) в зависимости от плотности радиационного теплового потока, наличия локального источника зажигания, влажности. Эффективность огнезащитной обработки;

- механизм и макрокинетические параметры пиролиза и термоокислительного разложения полимерной теплоизоляции «PENOCOM», ее формоустойчивость при тепловом воздействии;

- результаты маломасштабных испытаний огнестойкости не несущих ограждающих деревянных легких каркасных конструкций, с полимерной и неорганической теплоизоляцией, при стандартном режиме пожара;

- модель теплопередачи ограждающей деревянной каркасной конструкции с полимерной теплоизоляцией. Результаты расчета огнестойкости конструкций по методу конечных элементов.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 27 научные работы из них 10 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и семи приложений. Содержание работы изложено на 128 страницах текста, включает в себя 13 таблиц, 46 рисунков, список литературы из 94 наименований и приложения.

ГЛАВА 1. МАЛОЭТАЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ДЕРЕВЯННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1. Развитие и проблемы малоэтажного строительства в России и за рубежом

Глобальным общероссийским современным трендом жилищного строительства является его ориентация на рынок малоэтажного жилья. Реструктуризация спроса и предложения на рынке привела к тому, что относительная доля ввода малоэтажного жилья увеличилась в несколько раз за последние 20 лет. В 1990 г. этот показатель составлял – 6,2 %, в 2004 году вырос до 39,5%, а в первом полугодии 2011 г. достиг 50,8%. По прогнозам Правительства Российской Федерации доля малоэтажного строительства в общем вводе жилья в 2015 году должна была составить не менее 60 %, а в 2020 году – 70 %. Доля деревянного домостроения в этом сегменте должна возрасти с 26% до 50 %, а объем строительства деревянных домов превысить 40 млн. м² [1].

Несмотря на положительную динамику, доля малоэтажного жилищного строительства России существенно отстает от близких к нам по климатическим условиям и наличию лесных ресурсов странам, таких как Канада (79 %), США (92 %), а также европейских стран (80 %). Примером может служить «одноэтажная Америка», где малоэтажное жилье составляет более 90 % жилищного фонда страны.

Анализ проводимых социологических опросов граждан РФ Фондом «Общественное мнение», желающих улучшить жилищные условия, подтверждает, что в среднем около 59 % опрошенных предпочитают жить в индивидуальном доме и только 27 % в отдельной квартире. Эти изменения в структуре спроса населения

на рынке жилья характеризуют собой новый современный тренд в запросах потребителей на рынке жилья в Российской Федерации.

Древесина остаётся одним из наиболее применяемых конструкционных материалов в жилом и общественном домостроении каркасного типа. Современные «революционные» тенденции в мировой строительной индустрии свидетельствуют о том, что из древесины можно возводить не только традиционные строительные объекты (коттеджи, хозяйственные постройки и т.д.), но и здания гостиниц и ресторанов, магазинов и офисов, развлекательных комплексов и баз отдыха, многоквартирных и многоэтажных жилых домов. В ряде зарубежных стран достаточно давно в практику строительства введено использование древесины при строительстве указанных объектов. Так, в Канаде и США фактически 90 % пятиэтажных домов имеют деревянный каркас. В Финляндии традиционно с применением древесины идет строительство большинства жилых и общественных домов каркасного типа.

В настоящее время строительство объектов из древесины переживает новую стадию возрождения. Как в Америке, так и в Европе деревянный дом находится на вершине популярности, поэтому индустриальные системы деревянных каркасных конструкций и деревянных многоэтажных домов являются предметом различных дискуссий и научных исследований. По опыту шведских специалистов, строительство деревянных каркасно-панельных многоэтажных домов обходится на 5%–20 % дешевле, чем бетонных панельных домов.

В России внедрение современных инновационных технологий в области деревянного домостроения происходит менее активно по сравнению с рядом европейских государств. В большей степени это обусловлено недостаточной проработкой строительных норм в области деревянного домостроения, а также действующими требованиями в области пожарной безопасности.

Застройка панельными и монолитными многоэтажками крупных городов России долгое время шла вразрез с мировыми тенденциями комфортабельности проживания. Градостроительная концепция, занимающая ведущее место в России на протяжении многих лет, предусматривала развитие многоэтажного домострое-

ния с преимущественным использованием таких строительных материалов как металлопрокат, бетон и кирпич. Это приводит к высокой стоимости жилья, чрезмерно уплотняет застройку центральной части городов и снижает его комфортность, доступность и экологичность.

Развитие мало- и среднеэтажного жилья позволяет активно использовать наиболее эффективные строительные материалы, такие как современные, высококачественные облицовочные, теплоизоляционные и отделочные материалы.

14 июня 2016 года во Владимире состоялось совещание правительства Российской Федерации «Об инновационном развитии промышленности строительных материалов». На совещании председателем правительства Д.А. Медведевым была поставлена задача создать условия для того, чтобы новейшие материалы применялись в нашей стране наиболее активно и, конечно, чтобы они производились у нас, чтобы эта ниша развивалась динамично, отвечала запросам нашего строительного рынка и постепенно отвоевывала себе место и на международном рынке. Для успешного развития отрасли была утверждена стратегия развития промышленности стройматериалов (№868 от 10.05.2016 г.). В ней сформулированы планы по дальнейшей работе вплоть до создания новых элементов структуры строительной индустрии к 2030 году.

В частности, одним из важнейших направлений в развитии стройиндустрии отмечено расширение использования изделий и конструкций из древесины, перспективных технологий с применением клеёного бруса и несущих конструкций из клеёных панелей с утеплителем SIP-панелей. По прогнозам экспертов, среднегодовые темпы роста до 2020 года в данном сегменте деревянного домостроения могут составить 10–12% [2].

Межведомственной рабочей группой по выработке мер Государственной поддержки деревянного домостроения в декабре 2016 года была утверждена «Дорожная карта» по развитию деревянного домостроения [3]. В «Дорожную карту» были включены такие задачи, как:

- разработка нового свода правил «Проектирование и строительство энергоэффективных жилых и общественных зданий с применением конструкций из древесины и на основе древесины»;
- пересмотр СП 64.13330.2011 «СНиП II–25–80 Деревянные конструкции»;
- разработка нового свода правил «Конструкции деревянные с узлами на винтах. Правила проектирования»;
- разработка нового свода правил «Здания жилые многоквартирные с деревянным каркасом. Правила проектирования и строительства»;
- анализ практики применения нормативных документов по пожарной безопасности, содержащих требования к огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций на основе древесины в зданиях разного назначения;
- утверждение стандартов на новые виды материалов и конструкций на основе древесины для строительства зданий и сооружений разного функционального назначения и другие важные задачи.

Деревянные здания и сооружения каркасного типа приобретают все большую популярность в секторе мало – и средне этажного строительства. Этому способствует развитие новых прогрессивных технологий индустриального производства современных высококачественных конструкционных материалов на основе древесины с несущими и ограждающими функциями.

В строительной индустрии используют, в основном, два типа деревянных каркасных сооружений: на основе массивных деревянных конструкций и на основе облегченных деревянных элементов. Каркасная система представляет собой совокупность вертикальных и горизонтальных элементов, которая обеспечивает прочность, жесткость и устойчивость здания. Следует отметить две главные проблемы, с которыми приходится сталкиваться при проектировании и строительстве деревянных зданий каркасного типа. Это, прежде всего, – обеспечение требуемого уровня огнестойкости и пожарной безопасности, и обеспечение эффективной теплозащиты зданий.

В настоящее время в России с применением массивных деревянных клееных конструкций (МДКК) в качестве несущего каркаса построен целый ряд больше-

пролетных сооружений. Например, крытый каток пролетом 58 м (г. Тверь); склад минеральных удобрений пролетом 63 м и высотой в коньке арок 45 м (морской порт, г. Санкт–Петербург) [4].

За рубежом ведется работа по проектированию многоэтажных и высотных зданий (30 – 40 этажей) с применением массивных элементов из древесины. Существует множество примеров многоэтажных объектов, построенных в разных городах. Десяти этажное каркасно-панельное здание квартирного типа построено с применением CLT (cross laminated timber) панелей в Австралии в 2012 г. Объекты, построенные по данной технологии, позволяют сократить время введения их в эксплуатацию по сравнению с домами из бетона примерно на 30 % [5,6].

Недавно был завершен проект 8-ми этажного центра в Британской Колумбии – на данный момент самого высокого современного здания с применением деревянного каркаса в Северной Америке (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Центр дизайна в Британской Колумбии

В Солнечногорском районе Московской области завершено строительство офисного 6–ти этажного здания по каркасной технологии площадью 3400 м² – самого большого офисного «зеленого» здания из МДКК. Его планированием и возведением занимается российская девелоперская корпорация Good Wood, специализирующаяся на строительстве деревянных загородных домов и поселков. Деловой центр, который получил название Good Wood Plaza, станет штаб – квартирой компании. Данный объект был внесен в Книгу Рекордов России (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Офисное здание GOOD WOOD PLAZA

Несущие конструкции и перекрытия шестиэтажного здания сделаны из массивных деревянных конструкций, а внешними стенами выступают панорамные стеклянные панели. Высота офисного центра составляет 19,754 м, расчетная площадь – 4,5 тыс. кв. м, площадь остекления – 1,5 тыс. м². При строительстве применено 60 колонн из МДКК сечением 280 × 800 мм и 600 балок 180 × 390 мм [7].

Известно, что повышения необходимого предела огнестойкости массивных деревянных каркасных систем, можно добиться путем увеличения площади поперечного сечения несущего элемента каркаса и применения огнезащитных средств, снижающих скорость обугливания древесины и распространения пламени по поверхности [8, 9].

В отличие от каркасных сооружений из МДКК, многослойной фанеры, массивных панелей с ортогональным расположением досок и т.п., для легких деревянных каркасных зданий критическим моментом в решении указанных выше проблем является наличие качественной конструктивной огне- и теплозащиты. В условиях холодного климата России проблема сбережения энергии и эффективной теплозащиты деревянных зданий легкого каркасного типа особенно актуальна.

В жилом секторе малоэтажного деревянного домостроения, при возведении зданий офисов, небольших торговых центров, главным образом, используют ЛДКрК (Рисунок 1.3). Первичным признаком отличия легких деревянных каркас-

ных конструкций от МДКК служит размер сечения деревянных элементов. Принимают, что минимальный размер сечения элементов облегченного каркаса из древесины не превышает 80 мм [9].



Рисунок 1.3 – Строительство жилого дома из ЛДКрК, Солнечногорский район, д. Смирновка

В России существует большое количество компаний, которые строят малоэтажные объекты из легких деревянных каркасных конструкций (Теремь, INDEX НОМЕ, Зодчий, Технология, Твой дом и др.). К основным преимуществам технологии строительства деревянных легких каркасных сооружений относится:

- высокоскоростное строительство;
- экономическая эффективность (при строительстве не требуется применение специальной строительной техники);
- возможность строить в районах крайнего севера;
- огромный выбор теплоизоляционных, отделочных и облицовочных материалов, их доступность.

За рубежом ведется активное строительство малоэтажных и среднеэтажных зданий каркасного типа с облегченными деревянными конструкциями. Полагают, что такие конструкции предпочтительны для зданий не выше 5–6 этажей [8, 9].

Таким образом, исследование огнестойкости и пожарной опасности таких конструкций и применяемых в них материалов является актуальной задачей.

1.2. Пожарная опасность и огнестойкость легких деревянных каркасных конструкций

Анализ пожаров, происшедших в зданиях с применением деревянных конструкций, свидетельствует о том, что пожарная опасность таких объектов обусловлена образованием высокой скоростью тепловыделения при горении древесины, интенсивной динамикой развития пожара, созданием условий для объёмной вспышки, быстрым наступлением критических значений для человека опасных факторов пожара (ОФП), в частности, высокой дымообразующей способностью и токсичностью продуктов горения.

Все факторы пожарной опасности объектов из древесины представляют значительную угрозу для жизни и здоровья человека. Необъективная или заниженная оценка пожарной опасности объектов с наличием материалов и конструкций на основе древесины может привести к трагическим последствиям. Основные статистические показатели количества пожаров и их последствий в городах и сельской местности РФ в период с 2010 года по 2015 год (Рисунок 1.4) [10].

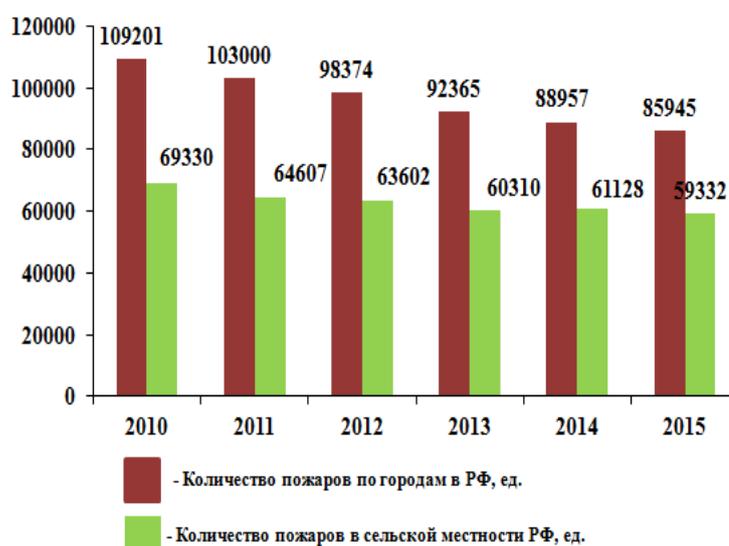


Рисунок 1.4 – Распределение количества пожаров в городах и сельской местности в Российской Федерации

Согласно статистическим данным 80 % пожаров происходит в жилом секторе, гибнет около 90 % от общего количества погибших при пожаре по стране. Одноэтажные здания для людей являются наиболее пожароопасными (Рисунок – 1.5, 1.6).

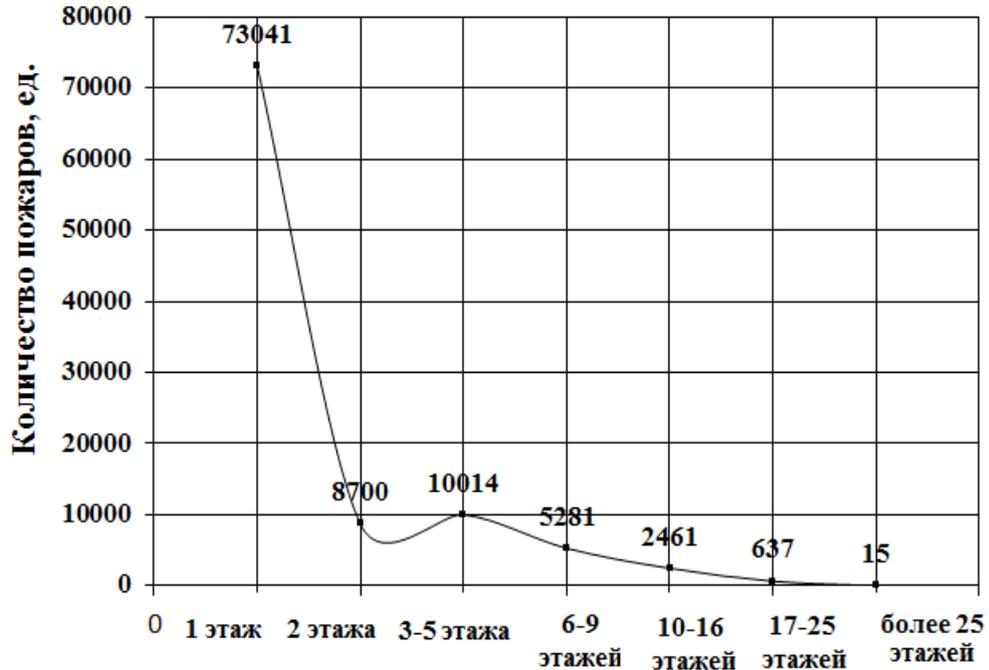


Рисунок 1.5 – Распределение количества пожаров при пожаре в зависимости от этажности жилых зданий в Российской Федерации

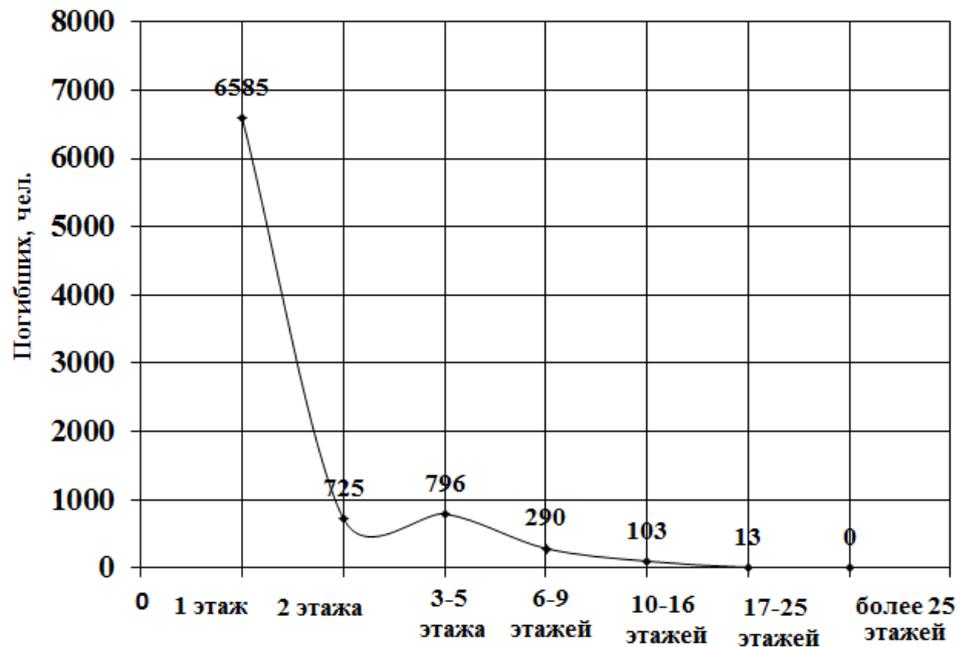


Рисунок 1.6 – Распределение количества погибших людей при пожаре в зависимости от этажности жилых зданий в Российской Федерации

Сравнение статистических данных показывает, что количество пожаров в городах значительно выше числа пожаров, происходящих в сельской местности. Однако, более высокое число жертв по отношению к количеству пожаров характерно для сельской местности. И этот факт связывают именно с широким использованием в сельской местности древесины и материалов на ее основе для строительства различных малоэтажных зданий и сооружений (Рисунок – 1.7).

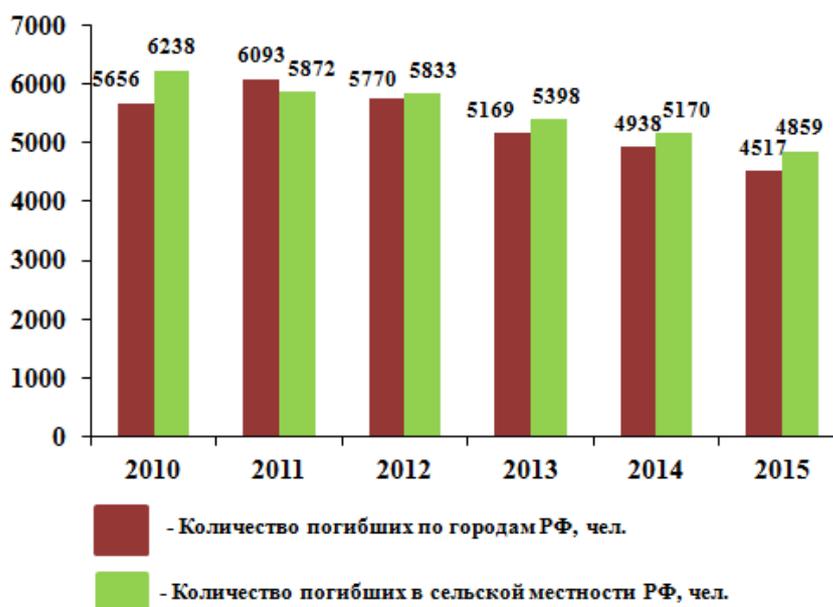


Рисунок 1.7 – Распределение количества погибших при пожаре в городах и сельской местности в Российской Федерации

В качестве конкретных примеров можно привести ряд данных. Так, например, 31 января 2009 года произошел пожар в муниципальном учреждении «Интернат малой вместимости для граждан пожилого возраста и инвалидов» в селе Подбельск республики Коми. Здание представляло собой одноэтажный деревянный дом размерами в плане 40 на 28 метров. На момент прибытия первого пожарного подразделения здание было охвачено огнем по всей площади, которая составила 1120 квадратных метров. В результате пожара погибли 23 человека.

14 февраля 2009 года произошел пожар в поселке Молодежный (Аксарайский) Красноярского района Астраханской области. Он унес 16 человек. Пожар возник в жилом деревянном двухэтажном доме – здании бывшего

общежития. На момент пожара в здании находился 81 человек. Здание в результате пожара полностью выгорело.

4 ноября 2014 года произошел пожар в доме престарелых в поселке Велье–Никольское в 30 км юго–западнее Тулы. Дом престарелых, размещался в двухэтажном кирпичном здании с деревянными перегородками. На момент пожара в учреждении находилось 279 пациентов и 12 человек медицинского персонала. На месте происшествия обнаружено 32 погибших. Всего в тушении огня принимали участие более 100 человек и 22 единицы техники. По некоторым сообщениям, площадь пожара составила 1,7 тыс. м².

Приведённые данные свидетельствуют о высокой пожарной опасности малоэтажных строительных объектов с применением древесины и катастрофических последствиях пожара с массовой гибелью людей и фактической потерей самого объекта. Одной из причин этих последствий, как было установлено в ходе пожарно–технической экспертизы, явилось, быстрое распространение пламени по всем помещениям, отсутствие технических средств оповещения для своевременного обнаружения пожара на объектах. Другой причиной является недостаточно изученность показателей пожаробезопасности конструкций и применяемых в них материалов, что затрудняет выбор их реального конструктивного исполнения.

Анализ пожаров, происшедших в зданиях с применением деревянных конструкций, свидетельствует о том, что пожарная опасность таких объектов характеризуется следующими особенностями:

- интенсивной динамикой развития пожара;
- быстрым наступлением критических значений опасных для человека факторов пожара, в частности критически опасной температуры, высокой дымообразующей способности и токсичности продуктов горения;
- высокими скоростями тепловыделения при горении материалов и конструкций на основе древесины;
- созданием условий для общей вспышки на объекте.

В России при оценке возможности применения различных материалов в строительстве применяется комплекс показателей, которые отражены в стандартах: ГОСТ 30244-94, ГОСТ 30402-96, ГОСТ 30444-97, ГОСТ 12.1.044-89*. Существующие показатели пожарной опасности строительных материалов и методы их определения зачастую не позволяют достоверно оценивать поведения этих материалов в условиях реальных пожаров. Любой показатель пожарной опасности зависит от химической природы материала, его размеров, геометрической формы, ориентации в пространстве, состава окружающей среды, газодинамики движения среды, тепловых свойств источника зажигания, времени его воздействия и ряда других факторов. Большинство же существующих методов определения показателей пожарной опасности материала позволяет проводить испытания в фиксированных условиях, часто несоответствующих условиям реального пожара.

Рассмотрение возможности обеспечения безопасности людей на строительных объектах из древесины в случае возникновения пожара должно базироваться на более глубоком знании огнестойкости и пожарной опасности всех элементов строительных конструкций и характеристик применяемых материалов. Объективная оценка этих характеристик, в зависимости от различных факторов, позволяет достоверно прогнозировать сценарии развития пожара на объекте, предложить технические способы огнезащиты и средства обеспечения пожарной безопасности, эффективные способы предотвращения, обнаружения, тушения пожара [11, 12, 13, 14].

Современные нормативно-технические документы федерального уровня устанавливают требования к тепловой защите, пожарной безопасности и огнестойкости зданий и сооружений с целью защиты жизни, здоровья, имущества граждан и юридических лиц, государственного и муниципального имущества при пожарах [15, 16].

ЛДКрК с несущими и ограждающими функциями являются многослойными и состоят из деревянного каркаса и обшивок (облицовочных плит). Пространство между ними может быть пустым или заполнено теплоизоляцией.

В европейском стандарте по проектированию деревянных каркасных сооружений [17] и рекомендациях по огнестойкости деревянных конструкций [18], разработанных по результатам стандартных крупномасштабных испытаний и расчетов вклада отдельных слоев конструкций по методу конечных элементов, отражена роль разных комбинаций материалов в общей каркасной системе. Установлена иерархия вклада различных слоев в огнестойкость деревянной конструкции в целом [19]. Особенно важен вклад в огнестойкость всей конструктивной системы слоев, подвергаемых прямому воздействию пожара. Показано, насколько негорючая теплоизоляция на минеральной основе, повышает огнестойкость деревянного каркаса [20].

Значительное число работ было проведено по экспериментальному исследованию огнестойкости и материальных характеристик элементов ЛДКрК: огнезащитных обшивок и облицовок деревянного каркаса, а также различных теплоизоляционных материалов на минеральной основе. Наиболее широко была изучена огнезащитная способность различных типов гипсовых штукатурок, гипсокартона и ГВЛ. База данных о них включает более 350 результатов полномасштабных круговых огневых испытаний материалов по стандарту EN-13381-7 [21] в различных лабораториях мира [22].

К сожалению, ассортимент материалов в качестве элементов легких ограждающих деревянных конструкций каркасного типа, рекомендуемых [17,18] при проектировании зданий и сооружений с учетом огнестойкости и пожарной безопасности, довольно ограничен. Теплоизоляционные материалы на органической полимерной основе вообще не рассматриваются. Помимо разного типа гипсовых штукатурок имеются сведения о свойствах облицовочных материалов из древесины (фанера, ДВП, ДСП, OSB).

OSB - сравнительно новый облицовочный материал из крупноразмерных деревянных частей с ортогональной структурой внешних и внутренних слоев. Его довольно часто используют в легких деревянных конструкциях [23].

Плиты OSB обладают высокой прочностью, износостойкостью, стойкостью к деформациям, низким водопоглощением. Коэффициент теплопроводности плит

OSB изменяется от 0,12 до 0,30 Вт/м×К при повышении температуры от 22 до 100 °С, а удельная теплоемкость соответственно растет в пределах 1,91–3,67 кДж/кг×К. По своим свойствам они приближаются к фанере конструкционного назначения и конкурируют с ней. В каркасном деревянном домостроении OSB плиты активно используют для опорных балок, как основы для покрытия крыш, обшивки потолков, внутренних стен, перегородок помещений, покрытия полов.

Импорт OSB-плит был значимым для российского рынка до 2014 года. До 2012 года весь объем российского рынка состоял только из импорта. Затем поставки стали стремительно сокращаться. Основными поставщиками были Bolderaja (Латвия), Kronospan (разные европейские страны), Louisiana Pacific и Norbord (Канада), Egger и Glunz (Германия), Kronopol (Польша) и ряд других компаний (таблица 1). Поступали на наш рынок также плиты OSB из Китая, но их качество намного уступает европейским, американским, а теперь уже и российским аналогам. И если в 2013 году импорт из Китая составил 36 тыс. м³, то в 2015 году уже всего 4,4 тыс. м³ [24]. В таблице 1.1 показаны объемы импорта OSB плит в Россию из ведущих зарубежных стран в 2011, 2013 и 2015 годах (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Импорт плит OSB в РФ (тыс.м³.)

Компания	Страна производителя	2011	2013	2015
Bolderaja	Латвия	185,1	132,0	62,2
Kronospan	Чехия, Румыния, Словакия, Италия, Польша	19,4	136,5	3,2
LP Canada	Канада, США	28,1	105,1	4,7
Egger	Германия, Румыния	14,3	105,1	22,8
«Кроношпан» и др.	Республика Беларусь	0	0	50
Китайские производители	Китай	13,1	35,9	4,4
Другие европейские бренды	Разные страны	2,4	7,5	1,3

Лидером в импорте плит OSB на российский рынок было латвийское подразделение компании Kronospan – Bolderaja. Также довольно большой объем поставок предлагала компания Kronospan из Чехии, Румынии, Словакии, Польши, Италии. Максимальный объем поставок плит OSB от Kronospan был отмечен в 2013

году. Продукция польского подразделения Kronopol импортировалась в объеме 20-30 тыс. м³ в год. Немецкая компания Kronoply всегда поставляла небольшие объемы плит.

Темпы прироста импорта плит OSB были особенно высокими после кризиса 2008-2009 годов. Уже в 2010 году импортеры с верхом отыграли потерянные в кризис объемы, а в 2011-2013 годы поставки продолжали расти: в 2011 году было импортировано 450,6 тыс. м³ OSB-плит, а в 2013 году - 710,6 тыс. м³, что на 16% превышает объем поставок в 2012 году. Но в 2014 году было ввезено 498,6 тыс. м³, а в 2015 году – всего 157,3 тыс. м³, причем значительная доля импорта теперь приходится на белорусскую продукцию: в 2014 году заработал завод «Кроношпан» под Могилевом. И белорусские плиты активно продаются на российском рынке в силу высокого качества и приемлемой цены. Плиты OSB из Латвии, Германии и Румынии все еще востребованы на рынке РФ, а вот поставки из Канады и США, по сути, прекратились [24].

В качестве облицовочного материала большой интерес представляют недавно появившиеся на рынке РФ стекломгнезитовые листы – СМЛ. Негорючий материал, устойчивый к влаге, внешним нагрузкам, перепадам температуры. Механически легко обрабатывается, не подвергается действию плесени и грибов. Имеет высокую прочность, гибкость, длительное время (до 2-х часов) выдерживает действие открытого пламени с температурой 1200 °С, сохраняя форму. СМЛ рекомендуют для облицовки стен, потолков, несущих конструкций различной геометрии. Коэффициент теплопроводности СМЛ равен 0,12 – 0,26 Вт/м×К в зависимости от состава и плотности, а удельная теплоемкость $C_p = 1,95$ кДж/кг×К. Главными производителями СМЛ являются Китай и Южная Корея [25].

Теплоизоляционные материалы (ТИМ) по типу исходного сырья (ГОСТ 16381-77) подразделяют на неорганические и органические. ТИМ из смеси органических и неорганических компонентов относят к неорганическим, если содержание неорганического компонента превышает 50% по массе. По структуре ТИМ подразделяют на волокнистые (минеральные или органические волокна), ячеистые (пенопласты) и зернистые (вспученный перлит, вермикулит, керамзит).

По итогам исследования маркетингового агентства Discovery Research Group, завершено в 2014 г., объем рынка ТИМ в РФ в натуральном выражении в 2013 г. Составил 53,4 млн. м³ с темпом роста 14 %/год общий объем производства ТИМ в РФ не превышает, однако, 4 % от мирового. Наиболее значительной (свыше 70%) в структуре ТИМ является группа волокнистых и пористых неорганических материалов (минеральная вата, вспученный перлит, вермикулит, керамзит, ячеистый бетон). Вторую группу составляют газонаполненные материалы на органической основе [26].

Минеральная вата – это собирательное название продукции ТИМ на неорганической основе (Рисунок 1.8)

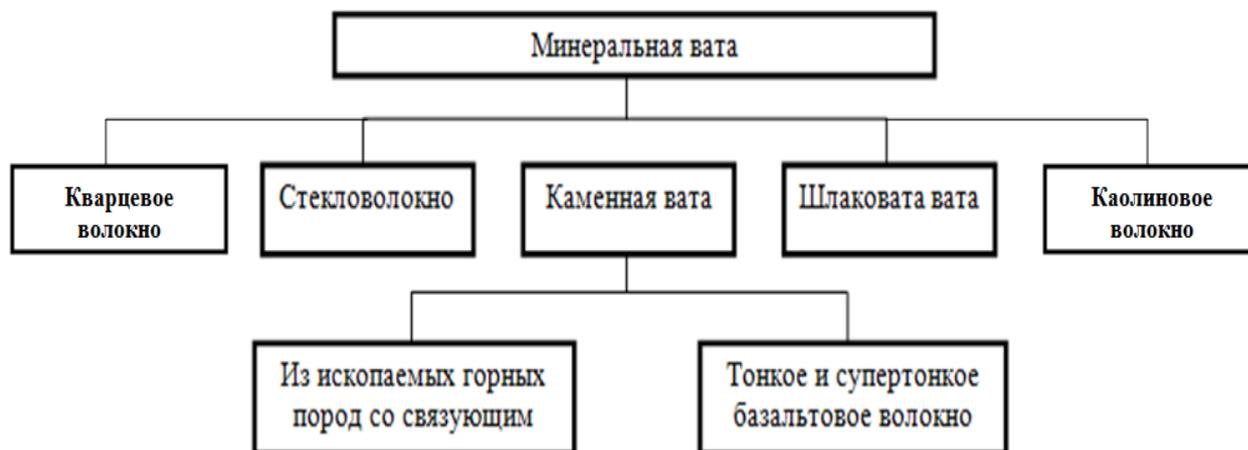


Рисунок 1.8 - Неорганические волокнистые теплоизоляционные материалы [33]

Общая структура производства утеплителей в России близка к структуре, сложившейся в передовых странах мира, где большой объем (60% – 80 %) приходится на производство неорганических волокнистых теплоизоляционных материалов.

На территории России расположено 69 предприятий и цехов по производству таких изделий. Общее количество технологических линий – 122. Суммарная установленная мощность предприятий – около 12 млн. м³. Наиболее крупными предприятиями в России, выпускающими волокнистые неорганические ТИМ, счита-

ются производители 7 марок: rockwool, paroc, isover, knauf, ursa, izovol, белтеп [27].

Большой объем продукции минеральной ваты на рынке ТИМ, позволяет выбирать ее с наилучшими теплофизическими и физико-механическими свойствами [28].

Теплоизоляционные материалы на органической полимерной основе (пенопласты) представляют вторую группу теплоизоляционных материалов. Сюда относятся пенополистирол, пенополиуретаны, пенополиизоцианаты, фенолформальдегидные и карбамидоформальдегидные пенопласты.

Более 20 % от общего объема ТИМ приходится на беспрессовый пенополистирол самозатухающий (ПСБ-С) и экструдированный пенополистирол (ЭППС), а также пенополиуретан (ППУ). На долю других теплоизоляционных материалов, включая изделия из вспененного каучука приходится не более 5% от общего объема потребления ТИМ [29]. Сравнительные характеристики самозатухающей пенополистирольной теплоизоляции приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Теплофизические характеристики самозатухающей пенополистирольной органической теплоизоляции

Наименование материалов	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м×К	Макс. температура, t, °С
Пенополистирол ПСБС-15	14	0.042	80
ПСБС-35А	28	0.037	80
ПСБС-50	42.6	0.04	80

Информация об огнезащитной способности теплоизоляции из различных вспененных органических материалов в условиях пожара в деревянных и прочих зданиях ограничена, и перспективы их безопасного применения в строительстве легких деревянных каркасных сооружений остаются неясными. Одно – и двухэтажные легкие каркасные деревянные здания и сооружения относят к V степени огнестойкости и согласно Федеральному закону РФ №123–ФЗ от 22 июля 2008 г. их предел огнестойкости не нормируется. Видимо, поэтому в настоящее время в

малоэтажном деревянном домостроении РФ в качестве органического строительного теплоизоляционного материала доминирует пенополистирол (ППС) и его, так называемые, самозатухающие модификации, хотя материал является горючим и горит с напалмовым эффектом и образованием токсичных дымовых газов, в которых обнаружен фосген [30]. Интересно, что ППС без антипиренов не образует высокотоксичных гетероорганических соединений (фосгена).

Стандартные испытания показателей пожарной опасности беспрессового самозатухающего пенополистирола ПСБ–С (ГОСТ 15588–86) от разных производителей (с плотностью 25–50 кг/м³) показали, что он относится к группе горючести Г3 и Г4, воспламеняемости В2 и В3, дымообразующей способности Д3. Материал имеет высокую теплоту сгорания ($Q_H = 41,2$ МДж/кг) и низкое значение кислородного индекса (КИ = 20 %). Плавится он при температуре около 80 °С. При 310°С — воспламеняется. Теплопроводность ПСБ–С находится в пределах 0,035–0,042 Вт/(м·К).

Испытания при режиме стандартного пожара фрагментов стен из трехслойных панелей со стальными или асбоцементными обшивками и ПСБ–С с плотностью $\rho = 30\div 35$ кг/м³ показали, что утеплитель воспламеняется через 3–4 мин одностороннего нагрева, а затем происходит скрытое распространение горения внутри конструкции, сопровождающееся образованием расплава, дыма и токсичных газов. Этот процесс продолжается до полного выгорания теплоизоляции даже при удалении источника теплового воздействия на конструкцию. Навесные стены с обшивками из тонких металлических листов или асбоцементных плит толщиной $\delta = 10$ мм и теплоизоляцией ПСБ–С независимо от ее толщины были отнесены к группе сгораемых конструкций с пределом огнестойкости 0,1–0,2 ч.

Теплоизоляционные материалы из «самозатухающего» экструзионного и беспрессового пенополистирола не рекомендованы для применения на важных строительных объектах (атомных станциях и пр.)

В настоящее время в строительной индустрии популярность приобретают так называемые SIP–панели (Structural Insulated Panels), с несущими и ограждающими функциями, для соединения которых могут быть использованы элементы дере-

вянного каркаса. SIP–панели представляют собой многослойные конструкции, из теплоизоляции и негорючих или сгораемых облицовок, приклеиваемых прямо к теплоизоляции разными адгезивами. Отсутствие в SIP–панелях воздушных зазоров и металлических узлов соединения повышает их предел огнестойкости.

В 2013 г. были проведены крупномасштабные испытания по стандартам ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94 SIP–панелей фирмы «Хотвелл» с теплоизоляцией из самозатухающего ПСБ–С [31]. Конструкция наружной несущей стены из SIP–панели с теплоизоляцией ПСБ–С 25 толщиной 150 мм, внешней обшивкой OSB толщиной 12 мм и внутренней облицовкой гипсоволокнистым листом (ГВЛ) толщиной 12,5 мм при равномерно распределенной нагрузке 1500 кг на 1 м показала предел огнестойкости 60 мин (R 60). При облицовке двумя слоями ГВЛ предел огнестойкости конструкции по несущей способности возрастал до 90 мин [32, 33]. Если учесть низкую температуру плавления и склонность ПСБ–С к скрытому горению, то огнестойкость и безопасность подобных конструкций при пожаре по теплоизолирующей способности (I) остается под вопросом.

Объемы применения в строительстве малоэтажных зданий и сооружений в Российской Федерации теплоизоляционного материала из пенополиуретана (ППУ) очень малы из-за высокой токсичности продуктов его горения (цианиды, фосген), и более высокой стоимости по сравнению с ПСБ–С.

За рубежом не ослабевает интерес к использованию в строительстве неплавких, карбонизирующихся ТИМ на органической основе [34]. В качестве неплавкой теплоизоляции внешних стен малоэтажных деревянных легких каркасных зданий до сих пор используют эковату – измельченную, пушистую и подвижную целлюлозную массу из отходов макулатуры, обработанной антипиренами [35,36].

В качестве неплавкой трудносгораемой теплоизоляции английской компанией Kingspan был испытан ТИМ под маркой Thermawall TW 55 на основе пенополиизоцианурата PIR (ПИР). Материал имеет закрытую пористость, характеризуется очень низким коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,022$ Вт/м×К. Ограждающие деревянные каркасные конструкции, включающие 12,5 мм ГВЛ; 60 мм Thermawalls TW 55, 11 мм OSB (каркас из древесины сечением 89×38 мм) при

стандартном режиме пожара показал предел огнестойкости 38 мин. При нагружении 11 кН/м получен надежный результат REI – 30 [37,38]. Полимерный ТИМ не уступал по огнестойкости стекловолокнутой теплоизоляции.

Повышение огнестойкости деревянных каркасных конструкций может быть достигнуто за счет применения различных огнезащитных средств или облицовка негорючими листами [38, 39, 40, 41, 42]. Особое внимание в последнее время уделяется применению наиболее эффективных огнезащитных составов вспучивающегося типа. Анализу оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся составов (покрытий) посвящено много работ экспериментального и теоретического плана. Математическое моделирование тепло и массопереноса в подобных огнезащитных покрытиях позволяет выявить влияние различных факторов (теплофизических свойств материалов, кратность вспучивания, толщины, влагосодержания и пр.) на эффективность огнезащиты и огнестойкость различных объектов [43,44].

Анализ опубликованных работ позволяет сделать вывод, что для повышения огнестойкости и пожарной безопасности ограждающих легких деревянных каркасных конструкций за счёт применения в качестве элементов материалов нового поколения, в том числе полимерной теплоизоляции карбонизирующего типа, является весьма актуальной проблемой.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования

В работе исследовали образцы хвойных (ель, сосна, лиственница) и лиственных (береза, дуб) разновидностей древесины из средней полосы России, используемых в качестве деревянных элементов ограждающих каркасных конструкций. Перед экспериментом образцы размером 150×150×10 мм высушивали в шкафу до постоянной массы при температуре 60 °С. Контроль осуществляли измерением влажности с помощью игольчатого влагомера. Высушенные образцы хранили в герметичной упаковке.

В качестве огнезащитных средств для древесины исследовали составы, разработанные ранее при участии Академии ГПС МЧС РФ совместно с другими организациями: пропиточный состав «КСД-А» (марка - 1), а также покрытие вспенивающегося типа на основе модифицированных полисахаридов растительного сырья. Составы показывали I группу огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53295 – 2009.

Образцы, в виде фрагментов моделирующих несущие ограждающие легкие деревянные каркасные конструкции (перегородки, стены) представляли собой трех- и четырехслойные системы с разной комбинацией обшивок и теплоизоляции. В качестве ТИМ исследовали образцы полимерной теплоизоляции «PENOCOM» разной толщины и объемной плотности, а также исследовались образцы минеральной «Rockwool Light Batts Scandic» ($\rho = 36 \text{ кг/м}^3$). В некоторых опытах для сравнения ис-

пользовали беспрессовый самозатухающий пенополистирол ПБС – С25 с $\rho = 15 \text{ кг/м}^3$ (ГОСТ 25588-86) и ППС – 10 ($\rho = 10 \text{ кг/м}^3$) Хабаровского завода стройматериалов.

Ранее было высказано предположение перспективности применения в строительстве неплавкого коксуемого, трудногораемого полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» [45].

Разработанный в РФ инновационный пенокомпозиат «PENOCOM» сертифицирован как слабогорючий материал Г1, умеренновоспламеняемый В2 и с умеренной дымообразующей способностью Д2. Он является экологически безопасным при изготовлении и эксплуатации (концентрация выделяемых токсичных веществ намного ниже ПДК – предельно допустимой концентрации). При длительном (до 2–х часов) воздействии открытого пламени пропановой горелки ($1500 \text{ }^\circ\text{C}$) не разрушается, а только коксуется. Важно подчеркнуть, что этот инновационный материал при огневом воздействии коксуется, а образовавшийся обугленный слой (пенококс) не тлеет после удаления источника нагрева. Материал устойчив к кислотам и щелочам, не подвергается воздействию грызунов. Имеет низкий коэффициент теплопроводности. При плотности пенокомпозиата 55 кг/м^3 его коэффициент теплопроводности с повышением температуры от 0 до $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ изменяется от $0,0326$ до $0,0391 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [45,46].

Пенокомпозиат разработан и промышленно выпускается в ООО «PENOCOM» (г. Москва) с 2012 г. Данный материал изготавливается на основе отечественного сырья по заливочной технологии путем смешения двух жидких композиций в формах любых размеров и конфигураций. Процессы вспенивания и отверждения завершаются спустя 2–3 мин после начала смешения компонентов. Технология изготовления материала «PENOCOM» является энергосберегающей, т.к. не требует применения тепла и давления. Изготовление данного материала возможно как в стационарных заводских условиях в виде плит большого размера и изделий любых конфигураций (скорлуп и пр.), так и непосредственно на месте применения, т.е. на строительных площадках, в том числе и при отрицательных температурах наружного воздуха.

Материал из базальтового волокна «Rockwool Light Batts Scandic» ($\rho = 36 \text{ кг/м}^3$) является негорючим материалом (НГ по ГОСТ 30244–94), не впитывает влагу из воздуха, имеет низкую теплопроводность ($\lambda = 0,036 \text{ Вт/м}\times\text{К}$), высокий коэффициент паропроницаемости ($0,25 \text{ мг/м}\times\text{ч}\times\text{Па}$), что позволяет «дышать» конструкции и препятствует конденсации внутри неё влаги.

В качестве облицовок (отделочных материалов) в фрагментах ограждающих конструкций применяли 9 мм листы гипсокартона ГКЛ, фирмы Knauf (ГОСТ 6266 - 97) с плотностью $\rho = 1041 \text{ кг/м}^3$, а также 9 мм плиты OSB фирмы «Кроношпан» с $\rho = 654 \text{ кг/м}^3$.

Образцы стекломгнезитовых листов (СМЛ) южно-корейского производства имели толщину 6 мм и 10 мм и плотность 931 и 816 кг/м^3 соответственно.

В работе кроме того использовали отделочный материал из древесины сосны в виде имитации бруса с толщиной 20 мм и $\rho = 375 \text{ кг/м}^3$.

2.2. Методы исследования

В этом разделе представлены методы изучения свойств элементов конструкций и огнестойкости фрагментов ограждающих ЛДКрК в целом.

За рубежом одним из важнейших показателей, используемых для классификации и сертификации пригодности материалов в тех или иных областях техники, являются характеристики тепловыделения при горении в разных условиях теплового и огневого воздействия. Приняты с этой целью международные и национальные стандарты, на основе разработанных мало-средне и крупномасштабных установок (ISO – 5660, ASTM E 906, SBI EN 13823, ISO 9705).

В настоящей работе для определения характеристик тепловыделения при горении древесины основного элемента деревянного каркаса использован стандартный проточный калориметр OSU HRR – 3 фирмы Atlas (ASTM E 906), который был разработан в Университете штата Огайо (Ohio State University), США (Рисунок – 2.1). Определение характеристик тепловыделения основано на принципе измерения температуры отходящих газов – продуктов сгорания при воздействии на материал образца лучистого теплового потока от 5 до 80 кВт/м². В настоящее время в РФ этот стандарт включен в требования правил пожарной безопасности АП – 25 в авиастроении. Основными классификационными параметрами для отбора материалов являются максимальная скорость и общее тепловыделение за период пламенного горения (2 мин.).



Рисунок 2.1 – Проточный калориметр (ASTM E906): *а* – общий вид;
б – реакционная огневая камера

С целью изучения термического поведения ТИМ в широком интервале температур (20 - 1000 °С) в разных средах (воздух, инерт) использованы методы термического анализа [47,48]. Формоустойчивость ТИМ (линейную усадку) определяли при нагревании ТИМ на воздухе в муфельной печи со скоростью нагрева температуры 12 град/мин (Рисунок 2.2) [49].



Рисунок 2.2 – Муфельная печь и тепловая камера

Механизм и макрокинетические параметры пиролиза и ТОД полимерных ТИМ определяли по ТГ, ДТГ и ДСК кривым разложения, полученным с помощью приборов Mettler и Du Pont 9900 при нагревании образцов (3-4 мг) со скоростью 5, 10, 20 град/мин в потоке аргона и на воздухе (50 мл/мин) (Рисунок 2.3).

Для установления физического механизма разложения пенокомпозита и расчета кинетических параметров использована методология, описанная в работе [50].



Рисунок 2.3 – Установка Du Pont 9900 для проведения термического анализа

На установке «огневая печь» были проведены испытания огнестойкости 7 систем ограждающих легких деревянных каркасных конструкций с различной комби-

нацией обшивок (облицовочных плит) и ТИМ: полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» и базальтоволокнуистой теплоизоляции «Rockwool Light» (Рисунок – 2.4).

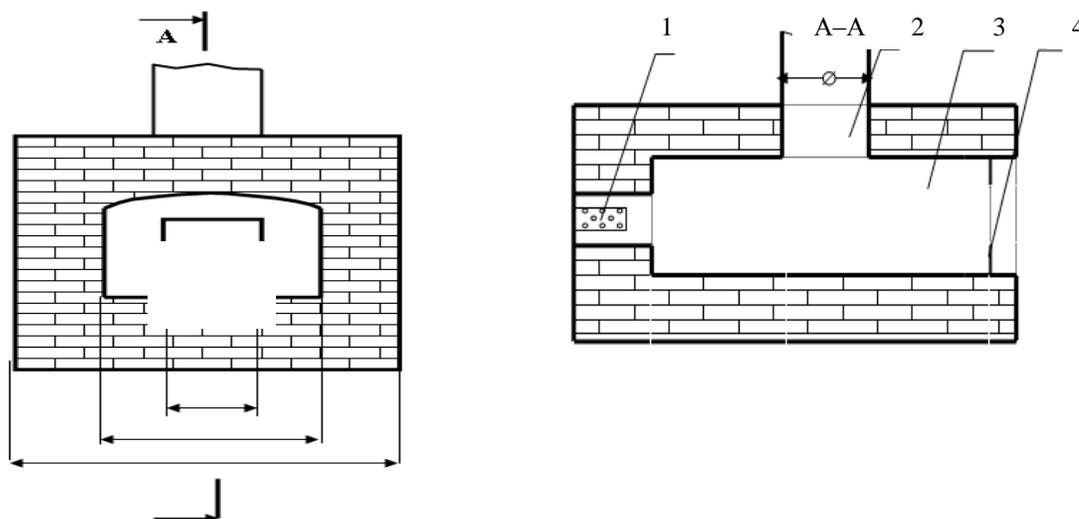


Рисунок 2.4 – Схема маломасштабной огневой установки: 1– газовая горелка; 2 – вытяжной трубопровод; 3 – огневая камера; 4 – проем для установки испытуемых образцов

Корпус малой огневой печи размером 1030 × 1200 × 905 мм выполнен из красного кирпича. Внутри печи расположена огневая камера с габаритами 500 × 390 × 400 мм. На лицевой стороне печи в кирпичной кладке, для сообщения с огневой камерой в проем прямоугольной формы, размером 370 × 300 мм устанавливается испытуемый образец ЛДКрК. С тыльной стороны в кирпичной кладке печи вмонтирована газовая горелка, а также трубопровод с принудительной подачей воздуха, на котором расположен регулирующий кран подачи воздуха для обеспечения нормального горения пламени. В верхней части печи находится вытяжной трубопровод с регулирующей заслонкой (Рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Вид маломасштабной «Огневой печи»

В камере с помощью специально регулируемой газовой горелки устанавливали стандартный температурно–временной режим пожара в соответствии с ГОСТ 30247.0 и ГОСТ 30247.1–94 [51,52]:

$$T = 345 \lg (8\tau + 1) + T_0, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где T и T_0 – текущая и начальная температура в огневой камере; τ – время, мин.

Изменение плотности теплового потока в огневой камере печи при стандартном температурном режиме пожара определяли с помощью датчика Карно.

Показания температуры в печи и в соответствующих контрольных точках на подвергаемой огневому воздействию и необогреваемой поверхностях конструкции, а также внутри неё регистрировались автоматически в процессе испытания, с помощью прибора ИРТМ.

Предел огнестойкости ограждающей конструкции определяли по признакам EI: времени потери целостности (E) и теплоизолирующей способности (I – время достижения критической максимальной температуры $180 \text{ } ^\circ\text{C}$ на необогреваемой стороне конструкции). Температура начала разложения и обугливания древесины и материалов на ее основе $270 \text{ } ^\circ\text{C}$. Схема установки термодпар на исследуемых фрагментах ограждающих легких деревянных каркасных конструкций представлена на рисунке 2.6.

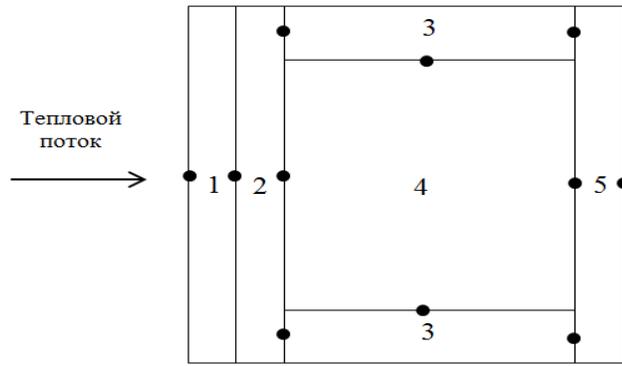


Рисунок 2.6 – Облицовочные плиты со стороны огневого воздействия; 3 – деревянные стойки; 4 – теплоизоляция; 5 – облицовочная плита на обратной стороне конструкции;
● - локация спаев термопар T_n

Для расчета теплопередачи в ограждающей ЛДКрК по разработанной модели с полимерной теплоизоляцией карбонизирующего типа использован метод конечных элементов (МКЭ) с привлечением программного комплекса Ansys Mechanical.

ГЛАВА 3. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Изучению пожароопасных свойств древесины и материалов на ее основе, посвящено достаточно большое количество работ. С 60–70–х годов прошлого столетия получили большой размах исследования, посвященные изучению пожарной опасности и закономерностей процессов горения твердых горючих материалов, используемых в качестве конструктивных в строительной индустрии, а также разработке эффективных способов снижения их пожарной опасности. Большой вклад в развитие данного направления внесли такие отечественные и зарубежные ученые как Абдуррагимов И.М., Асеева Р.М., Баратов А.Н., Бахман Н.Н., Берлин А.А., Кодолов В.И., Леонович А.А., Романенков И.Г., Серков Б.Б., Халтуринский Н.А., Хрулев В.М., Di Blasi, Parker W.J., Tran H.C., Hilado C.J., Tewarson A., Драйздейл Д., De Ris J., Roberts A.F. и многие другие.

Согласно Федерального закона №123 классификация строительных материалов по пожарной опасности основана на таких свойствах и опасных факторах пожара (ОФП) как горючесть, воспламеняемость, способность распространять пламя по поверхности, дымообразующая способность и токсичность продуктов горения. Показатели пожарной опасности используют при расчете динамики нарастания ОФП на начальной стадии развития пожара в помещениях, а также критической продолжительности пожара по условию достижения каждым из ОФП предельно допустимых значений в зоне пребывания людей.

Следует отметить, что современная база экспериментальных данных, используемых в моделировании динамики развития пожара и наступления опасных факторов пожара с участием древесины ограничена. Очевидна необходимость определения пожароопасных характеристик материалов и конструкций на основе

древесины в зависимости от многочисленных внешних и внутренних факторов. Используемые пожароопасные характеристики древесины в моделировании и прогнозировании пожарной опасности объектов с наличием деревянных конструкций представлены в большей степени усреднёнными значениями. До последнего времени не учитывались физико–химические и теплофизические показатели самой древесины, имеющие широкие численные расхождения в зависимости от ее разновидности, химического состава, соотношения основных компонентов целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы и экстрактивных веществ [53].

При строительстве малоэтажных деревянных каркасных зданий в основном используются хвойные породы древесины (ель, сосна, лиственница). Они применяются для возведения несущего каркаса здания. В несущий каркас входят такие конструкции как колонны, стойки, балки, половые лаги. Для возведения каркаса кровельной конструкции используются стропильные конструкции. Лиственные породы древесины в большинстве случаев применяются для внутренней и внешней отделки здания. Осина широко применяется для отделки саун и бань, дуб используется для напольного покрытия, и т.д. Как правило, древесину, обрабатывают антисептиком, пропиточными составами, лаками и красками, чтобы улучшить эстетические свойства древесины и защитить ее от влаги и гниения. Для внутренней и внешней отделки на малоэтажных объектах очень часто используются отделочные облицовки на основе древесины вагонка, имитация бруса, блок – хаус, обрезная доска, плиты OSB и т.п.

В целом натуральная древесина и многие материалы на ее основе относятся к классу горючих, относительно легко воспламеняющихся материалов, с быстрым распространением пламени по поверхности, образующие большого количества токсичного дыма (Г4, В3, Д3, Т3, РП3).

За рубежом методологии оценки пожарной опасности строительных материалов важное место отводится характеристикам тепловыделения. Так, например, пожарную опасность деревянных элементов строительных конструкций предложено классифицировать по максимальной скорости тепловыделения, общему тепловыделению

и по скорости нарастания интенсивности тепловыделения до максимального значения. Этот показатель названный, FIGRA (Fire Growth Rate) коррелирует со временем достижения общей вспышки в помещении и отражает скорость развития пожара.

Показатель FIGRA принят в качестве классификационного параметра в средне-масштабном методе по европейскому стандарту EN–13823 [54] и является основным в крупномасштабном методе по международному стандарту ISO 9705 [55]. В отечественной практике из-за отсутствия стандартизованного оборудования и методов испытания на тепловыделение, применение характеристик тепловыделения для целей классификации и сертификации материалов пока ограничено. Они введены только в требования правил пожарной безопасности АП-25 в авиастроении. В теории процессов нарастания ОФП, предложенной профессором Ю.А. Кошмаровым, важная роль отводится параметрам скорости тепловыделения. Применение стандартного метода оценки характеристик тепловыделения строительных материалов позволяет использовать надежные численные значения скорости тепловыделения для прогнозирования наиболее жестких (критических) условий воздействия ОФП на людей. Таким образом, исследование характеристик тепловыделения при горении древесных материалов в различных условиях внешнего теплового воздействия является весьма важной и актуальной задачей.

В настоящей работе с помощью стандартного калориметра OSU, марки HRR3 (США) впервые определены характеристики тепловыделения в процессе горения древесины при воздействии теплового потока интенсивностью 20, 35 и 52 кВт/м², типичного для реальных пожаров в помещениях различных зданий. Для испытания было подготовлено по 3 образца, каждой разновидности древесины. Образцы располагали вертикально относительно радиационной панели и перпендикулярно к оси волокон древесины.

В ходе испытаний через реакционную камеру продувается воздух с заданным расходом 40 л/с (0,04 м³/с). Под действием внешнего радиационного теплового потока образец древесины в реакционной камере начинает разлагаться. Образующиеся

парогазовые продукты термодеструкции материала воспламеняются нижней и дожигаются верхними запальными горелками. Выделяющееся при этом тепло повышает температуру потока воздуха, омывающего на выходе из дымохода горячие спаи пятиспайной термопары. С помощью компьютеризованной автоматической системы сбора и обработки данных, температура отходящих продуктов горения в дымоходе установки замеряется один раз в секунду.

По окончании эксперимента по полученным данным на основе предварительно проведенной калибровки прибора по известным характеристикам тепловыделения при горении метана автоматически рассчитывается максимальная скорость тепловыделения в период испытания и общее тепловыделение за определенный интервал времени.

В качестве основных характеристик тепловыделения использованы следующие показатели:

- время начала тепловыделения τ_{ign} с момента воздействия внешней тепловой энергии (соответствует времени задержки воспламенения);
- максимальная (пиковая) скорость тепловыделения $\text{СТВ}_{\text{макс}}$
- время достижения пикового значения скорости тепловыделения $\tau_{\text{макс}}$;
- общее тепловыделение за определенное время ОТВ;
- скорость нарастания интенсивности тепловыделения $\Delta\text{СТВ}/\Delta\tau$ (FIGRA);
- эффективная теплота сгорания $Q_{\text{эф}}$, которая дает возможность оценить коэффициент полноты сгорания η .

Расчет скорости выделения тепла СТВ ($\text{кВт}/\text{м}^2$) осуществляется по формуле:

$$\text{СТВ} = K_h (V_0 - V_1)/S, \quad (3.1)$$

где K_h – термический коэффициент установки, $\text{кВт}/\text{мВ}$; V_0 , V_1 — термо-ЭДС дифференциальной многоспайной термопары, мВ; S — площадь испытываемого образца, м^2 .

На рисунках 3.1 и 3.2 в качестве показательных представлены кривые изменения скорости тепловыделения при горении образцов древесины дуба и сосны с

влажностью 4,3 и 6,0 % соответственно во время испытаний на калориметре OSU при воздействии внешнего радиационного теплового потока плотностью 20 кВт/м^2 . Как видно из рисунка, изменение скорости тепловыделения в ходе эксперимента характеризуется ярко выраженной двухстадийностью процесса, связанной с двумя видами горения древесины — газо- и гетерофазным.

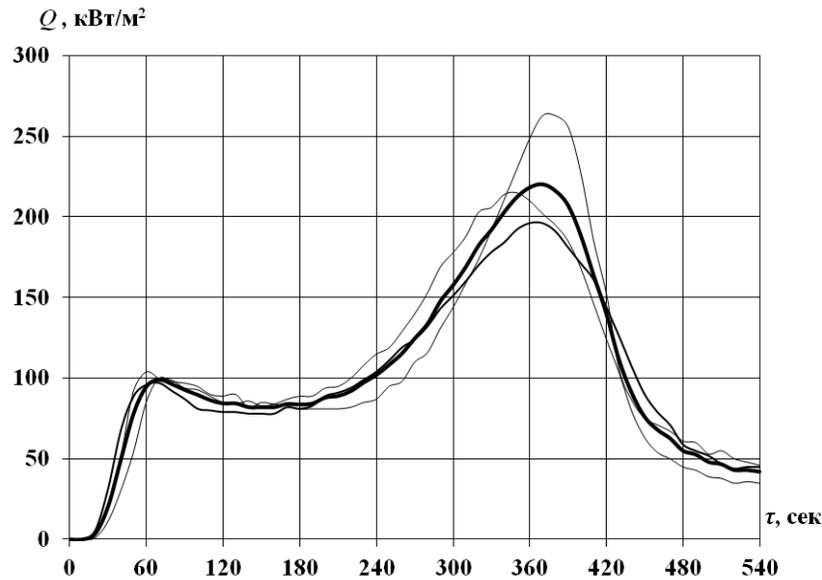


Рисунок 3.1 – Зависимость скорости тепловыделения при горении древесины дуба (3 образца) с влажностью 4,3 % при воздействии теплового потока плотностью 20 кВт/м^2

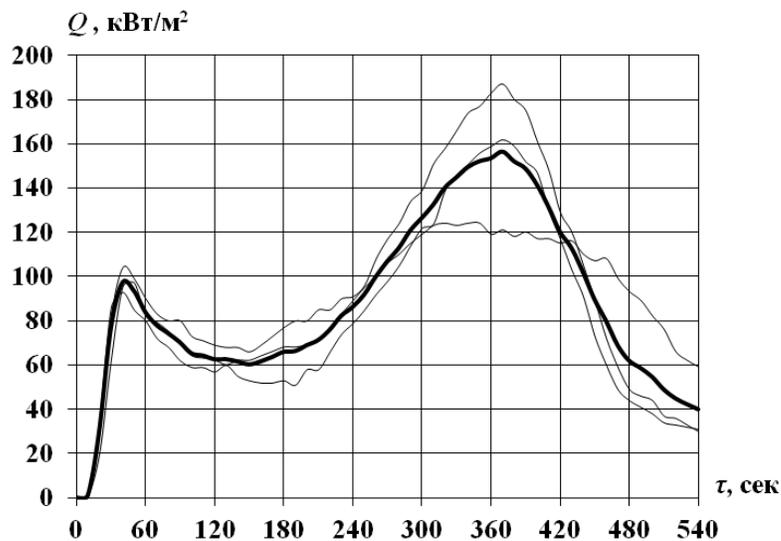


Рисунок 3.2 – Зависимость скорости тепловыделения при горении древесины сосны (3 образца) с влажностью 6,0 % при воздействии теплового потока плотностью 20 кВт/м^2

На двухстадийность процесса тепловыделения при горении древесины влияет термическая толщина используемого образца.

Понятие «термически толстый (тонкий) материал» возникло из общего представления о взаимосвязи условий переноса тепла внутрь образца с размерами последнего. Если в рассматриваемых условиях внешнего теплового воздействия глубина прогрева, δ , меньше физической толщины материала L (т. е. $\delta/L < 1$), то этот образец проявляет себя как термически толстый. Промежуточное поведение материала между термически толстым и термически тонким наблюдается при соотношении $\delta/L \approx 1$ [56].

Рассмотрим подробно происходящий процесс тепловыделения при горении образцов древесины.

Начальный этап нагрева древесины связан с выделением физически сорбированной влаги, сушкой древесины и нагревом ее до воспламенения. Продолжительность стадии до воспламенения древесины незначительна и существенно зависит от теплофизических свойств древесины и плотности внешнего теплового потока. Для термически толстых образцов решением одномерного уравнения теплопроводности получена следующая функциональная зависимость времени задержки воспламенения t_{ign} (с) [56]:

$$\tau_s = \frac{\pi \lambda \rho c (T_s - T_0)^2}{4 q_e^2} \quad (3.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м×К; ρ – плотность, кг/м³; c – удельная теплоемкость материала, Дж/кг×К; T_s и T_0 – температура поверхности в момент воспламенения и окружающей среды соответственно, °С; q_e – плотность внешнего радиационного теплового потока, кВт/м².

Результаты показывают, что при $q_e = 20$ кВт/м² время задержки воспламенения

образцов дуба составляет 20–25 с, сосны — 10 с.

При дальнейшем нагреве происходит воспламенение древесины и наблюдается значительное возрастание скорости тепловыделения, связанное с активным термоокислительным разложением и горением продуктов разложения основных составляющих древесного комплекса. Термоокислительное разложение древесины имеет ярко выраженный экзотермический характер и сопровождается как выделением летучих горючих продуктов разложения, так и образованием остатка. Максимальное значение 1-го пика СТВ соответствует активному образованию кокса на поверхности древесины. Дальнейшая интенсификация пламенного горения древесного материала приводит к постепенному наращиванию толщины обуглероженного слоя и замедлению выхода горючих продуктов термодеструкции. Уменьшение скорости поступления горючих продуктов разложения древесины в газовую фазу в определенный момент приводит к переходу из режима газофазного пламенного горения древесины в режим гетерогенного горения образующегося кокса. Этот период соответствует появлению 2-го пика на кривых тепловыделения. Он характеризуется окислительными процессами коксового слоя, обладающего высокими энергетическими показателями.

Наличие двух пиков на кривых с более высокой интенсивностью тепловыделения на второй стадии для всех разновидностей древесины типично. Однако, внимательное рассмотрение древесины разных пород, выявляет их заметные различия в динамике тепловыделения.

Например, максимальная скорость тепловыделения, регистрируемая для 2-го пика, у образцов древесины сосны меньше, чем у образцов древесины дуба, что связано со структурой и свойствами кокса. Указанная характеристика при горении древесины дуба составляет 228 кВт/м^2 за 362 с, сосны — 159 кВт/м^2 при $q_e = 20 \text{ кВт/м}^2$.

При проведении испытаний по определению влияния внешнего теплового потока на характеристики тепловыделения при горении разных пород древесины использовались предварительно высушенные образцы. Результаты определения характеристик тепловыделения при горении разных образцов древесины (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Влияние плотности теплового потока на характеристики тепловыделения при горении разных пород древесины

Образец	ρ , кг/м ³	q_e , кВт/м ²	$\tau_{1всп}$, с	$\tau_{1макс}$, с	СТВ _{1макс} , кВт/м ²	$\tau_{2макс}$, с	СТВ _{2макс} , кВт/м ²	ОТВ _{2мин} / ОТВ _{9 мин} , кВт×мин/м ²
Ель	395	20	10	40	94,8	279	202,1	142,5
		35	9	30	131,2	195	233,2	218,2/851
		52	4	20	143,5	159	256,1	270,2
Сосна	462	20	10	40	98,2	354	159,3	128,8
		35	6	20	129,0	276	203,5	180,6/894
		52	4	20	137	247	247,3	202,0
Лиственница	568	35	17	30	136	300	274	185/1011
Береза	573	20	23,3	63	104,9	284	321,9	149,3
		35	10	53	157,7	215	400,5	279,9/1285
		52	5	40	199,0	184	459,6	377,2
Дуб	629	20	20	67	100,9	362	227,7	127,1
		35	13,6	33	131,3	281	245,1	198,0/1035
		52	10	30	161,6	246	312,0	261,6

Образцам древесины хвойной породы присущи меньшее время воспламенения, меньшие значения максимальной скорости тепловыделения на первой стадии про-

цесса, более быстрое ее достижение по сравнению с образцами лиственной породы. У древесины хвойной породы менее продолжителен участок стабильного процесса тепловыделения между двумя пиками, особенно заметный при низкой плотности теплового потока 20 кВт/м^2 . Продолжительность этого стабильного участка снижается, а интенсивность пиков растет с увеличением плотности внешнего потока с 20 до 52 кВт/м^2 .

Более высокая энергетика при горении лиственных пород древесины (березы, дуба) по сравнению с хвойными, связана с их химическим составом, объемной массой, свойствами образующегося кокса.

Известно, что химический состав древесины хвойных и лиственных пород значительно различается, в частности, - по содержанию основных компонентов материала – целлюлозы, лигнина, экстрактивных веществ и гемицеллюлоз. Объемная масса (кажущая плотность ρ) древесины определяется особенностями строения древесной ткани, межклеточного пространства и структуры материала и является более высокой для древесины лиственных пород.

Различие в значениях $СТВ_{2\text{макс}}$, по-видимому, обусловлено различиями в толщине коксового остатка, пористости кокса, скорости его окисления и экзотермики окисления коксовых остатков.

При увеличении плотности внешнего радиационного теплового потока при горении разных пород древесины в ходе испытаний наблюдается увеличение максимальной скорости тепловыделения (Рисунок 3.3, 3.4). Время достижения максимума скорости тепловыделения снижается.

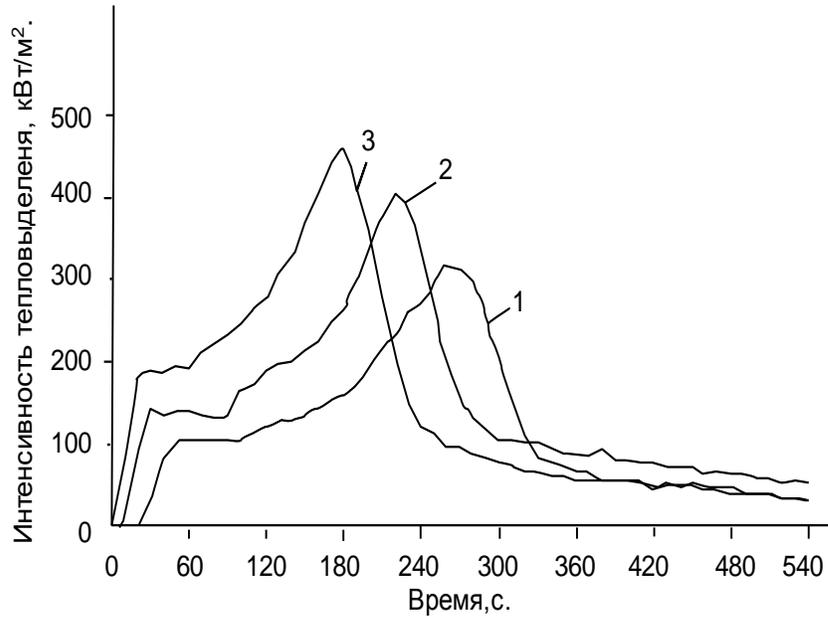


Рисунок 3.3 – Изменение тепловыделения при горении образцов березы в зависимости от плотности внешнего теплового потока: 1 — 20 кВт/м²; 2 — 35 кВт/м²; 3 — 52 кВт/м²

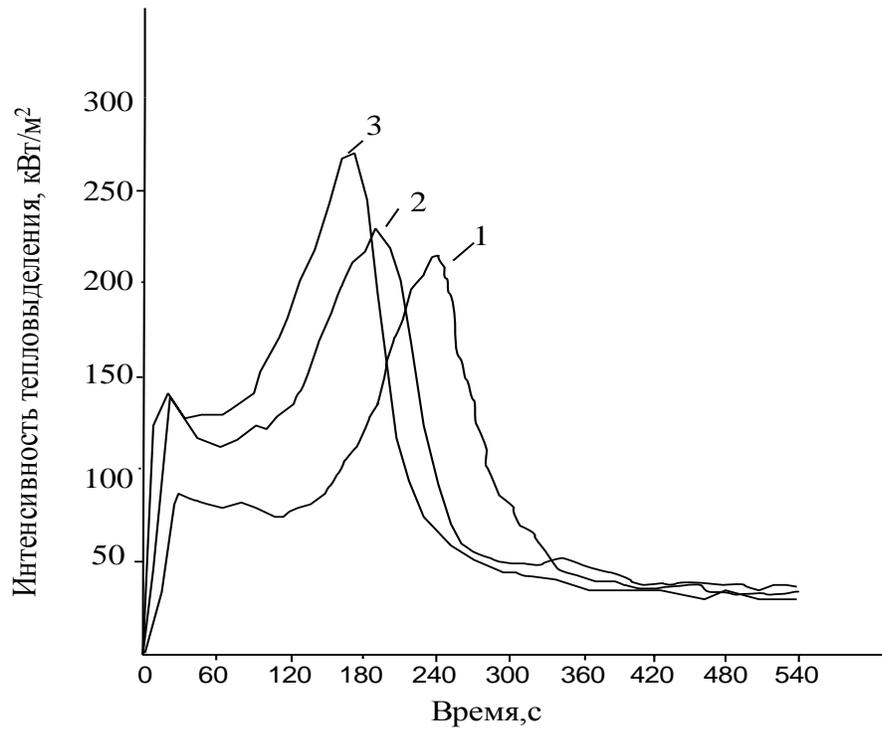


Рисунок 3.4 – Изменение тепловыделения при горении образцов ели в зависимости от плотности внешнего теплового потока: 1 — 20 кВт/м²; 2 — 35 кВт/м²; 3 — 52 кВт/м²

По результатам измерений общего тепловыделения за все время эксперимента (9 минут) и на основе данных о потере массы за этот период рассчитаны значения эффективной теплоты сгорания образцов древесины:

$$Q_{\text{эф}} = \text{OTB}_t / (m_0 - m_k), \quad (3.3)$$

где OTB_t – общее тепловыделение за время испытания (9 минут); m_0 – начальная масса исследуемого образца, г; m_k – масса исследуемого образца по окончании эксперимента, г.

Сравнение со значениями низшей теплоты полного сгорания дает возможность определить коэффициент полноты сгорания древесины при соответствующей плотности внешнего теплового потока (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Эффективная теплота сгорания и коэффициент полноты сгорания при горении образцов древесины разных видов ($q = 35 \text{ кВт/м}^2$)

Разновидность древесины	$Q_{\text{эф}}$, кДж/г	$Q_{\text{н}}^{\text{P}}$, кДж/г	η
Сосна	16,22	19,62	0,83
Ель	19,1	18,9	0,98
Береза	16,18	18,08	0,89
Дуб	15,00	18,66	0,83

Более высокими значениями эффективной теплоты сгорания обладает древесина хвойных пород по сравнению с древесиной дуба.

Древесина березы занимает особое положение по этим показателям, что также согласуется с другими характеристиками (скоростью тепловыделения на основных стадиях горения). Можно полагать, что сказанное связано с особенностями

структуры и химическим составом березы (большим количеством экстрактивных веществ).

На рисунке 3.5 показано влияние влажности древесины W на динамику тепловыделения в ходе ее горения при внешнем тепловом потоке 35 кВт/м^2 .

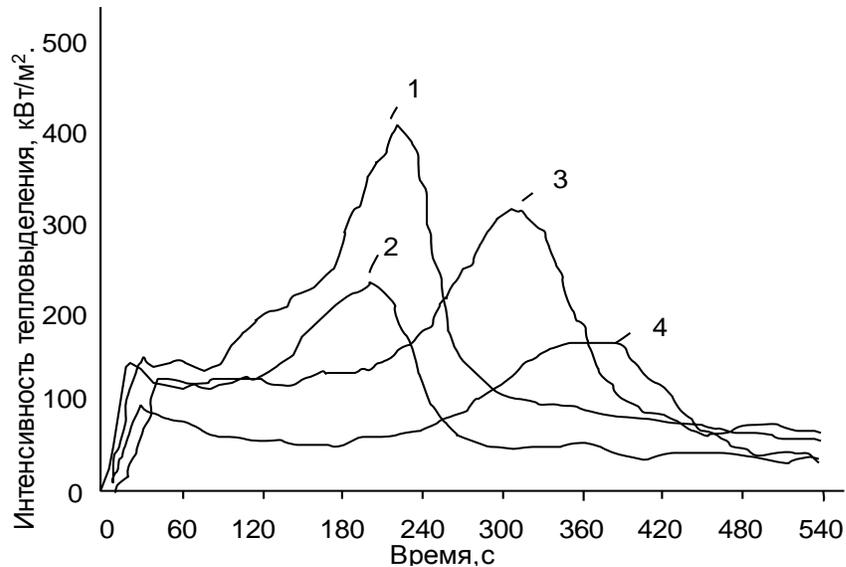


Рисунок 3.5 – Влияние влажности W на тепловыделение при горении образцов древесины ($q_e = 35 \text{ кВт/м}^2$): (1,3 – образцы березы с влажностью 5 и 14 %; 2,4 – образцы ели с влажностью 4,5 и 14 %)

При повышении влажности древесины независимо от ее разновидности наблюдается снижение скорости тепловыделения в ходе испытаний; наряду с этим время достижения максимального значения скорости тепловыделения увеличивается.

Существенное влияние влажности древесины на динамику тепловыделения при ее горении указывает на то, что на первых этапах нагрева происходит неполное улетучивание влаги из пор древесины.

Представляло интерес сравнить характеристики тепловыделения при горении древесины в условиях радиационного теплового воздействия $q_e=35 \text{ кВт/м}^2$ с наличием и без локального пилотного источника (ЛИП) зажигания (в режиме

самовоспламенения). Результаты испытаний при горении вертикально расположенных образцов древесины различных пород представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Влияние ЛИП на характеристики тепловыделения при горении образцов древесины

Образец	$\tau_B, \tau_{CB}^*,$ с.	$Q_{T\dot{V}_{9\text{мин}}}/ Q_{T\dot{V}_{2,9\text{мин}}}^*,$ кВт×мин/м ²
Осина	10/20*	993/930
Лиственница	20/30*	1011/955
Дуб	20/40*	1354/1218
Береза	20/24*	1285/1235

Примечание: * - отсутствует ЛИП.

Для всех исследуемых образцов древесины возникновение пламенного горения в случае использования дополнительного локального источника поджига – пламенной горелки наблюдается быстрее, чем в режиме самовоспламенения. При возрастании объемной массы древесины увеличивается общее тепловыделение при горении древесины за 9 мин.

Второй пик на кривой скорости тепловыделения при горении древесины связан с окислительными процессами углистого слоя и постепенным его выгоранием.

После достижения максимального значения скорости тепловыделения на этом этапе происходит активное выгорание кокса древесины, что выражается снижением скорости тепловыделения. Конечная стадия процесса горения древесины соответствует почти полному выгоранию карбонизованного слоя.

Присутствие локальной пламенной горелки для исследуемых пород древесины вызывает более быстрое возникновение пламенного горения древесины и нарастание скорости тепловыделения до максимального значения на начальной стадии. Таким образом, ЛИП оказывает влияние в большей степени на период индукции (время воспламенения или самовоспламенения образца) и в меньшей степени на дальней-

шее развитие процесса тепловыделения при горении одного и того же древесного материала.

Как показано ранее, что весь процесс горения и изменения наблюдаемой скорости тепловыделения можно разделить на этапы пламенного горения древесины и тлеющего горения образующегося коксового слоя.

Это позволяет определить скорость нарастания интенсивности пламенного и тлеющего горения (FIGRA) древесины и оценить влияние вида древесины на эти процессы (Таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Параметры FIGRA для разных этапов горения древесины при воздействии разных внешних тепловых потоков

Образец	ρ , кг/м ³	q_e , кВт/м ²	Пламенный этап FIGRA, кВт/м ² ×с	Этап тления FIGRA, кВт/м ² ×с
Ель	395	20	3,16	1,04
		35	9,37	0,89
		52	9,41	1,15
Сосна	462	20	2,97	-
		35	9,21	-
		52	9,48	0,93
Лиственница	568	35	10,46	0,88
Береза	573	20	2,64	1,27
		35	3,66	1,78
		52	5,68	2,04
Дуб	630	20	2,14	0,77
		35	6,76	0,86
		52	8,08	1,01

Как показывают результаты, представленные в таблице, при плотности теплового потока $q_e = 20$ кВт/м² образцы ели характеризуются наиболее высоким значением FIGRA пламенного горения, по сравнению с древесиной сосны и лиственными разновидностями березы и дуба. Скорость нарастания интенсивности тепловыделения при горении древесины дуба самая низкая (2,14 кВт/м²с). С увеличением плотности теплового потока с 35 до 52 кВт/м² у образцов ели и сосны наблюдаются близкие значения FIGRA и их небольшой рост при изменении q_e от 35 до 52 кВт/м². Это означает, что в таком случае при $q_e = 52$ кВт/м² становится значителен вклад чисто термического процессов деструкции древесины в образование летучих горючих продуктов распада материала, протекающего с поглощением тепла, и изменением состава летучих.

Хвойные разновидности древесины образуют коксовый слой приблизительно с близкими значениями скорости нарастания СТВ при тлеющем горении (0,88 – 1,15 кВт/м²с).

Следует отметить особый характер поведения при горении древесины березы. На этапе пламенного горения у нее наблюдаются относительно низкие значения скорости нарастания интенсивности тепловыделения по сравнению с хвойными видами и образцами дуба. Однако на этапе тлеющего горения образовавшегося кокса обнаруживается самый высокий темп роста скорости тепловыделения. По-видимому, этот эффект в значительной степени обусловлен образованием кокса с низкой объемной плотностью на первом этапе горения и, соответственно, с развитой площадью поверхности, доступной кислороду воздуха на этапе тлеющего горения. Необходимо учесть также повышенное содержание в химическом составе и структуре обуглероженного продукта углерод-водородных фрагментов. По-сути, продукт представляет собой так называемый полукокс. Известно, что энтальпия окисления березового угля 5850 Дж/г в 1,2 – 1,3 раза выше, чем соснового (4867 Дж/г)[57].

Образцы дуба при пламенном горении образуют плотный кокс с более высокой объемной плотностью, чем береза и хвойные виды древесины. В результате на этапе

тлеющего горения наблюдаются самые низкие значения FIGRA при $q_e = 20 - 35$ кВт/м². При тепловом потоке 52 кВт/м² эффект сглаживается из – за того, что в этих жестких условиях с окислительным процессом начинают конкурировать чисто термические реакции разложения карбонизованного вещества.

Анализ характера обугливания древесины разных видов при действии внешнего теплового потока в интервале 20 – 52 кВт/м² приводит к выводу, что скорость обугливания древесины зависит от плотности теплового потока и изменяется со времени его воздействия [58].

$$B \approx q_e^{0,5} / \rho\tau^{0,3} \quad (3.4)$$

При пятиминутном испытании в калориметре OSU при действии теплового потока постоянной плотности (20 – 52 кВт/м²) самую высокую скорость обугливания показывают образцы ели (от 0,79 до 1,27 мм/мин), самую низкую образцы дуба (от 0,53 до 0,85 мм/мин). Отметим, забегаая вперед, что при 60 минутной экспозиции деревянных элементов ограждающих конструкций в огневой печи по стандартному режиму пожара (средняя плотность теплового потока 92,6 кВт/м²) скорости обугливания древесины ели будут достигать 0,64 мм/мин, а дуба – 0,43 мм/мин. При этом толщина обугленного слоя на поверхности хвойной древесины составит 33 – 39 мм, а на поверхности береза или дуба – 26,6 и 25,8 мм соответственно.

Можно продемонстрировать возможности использования, полученных в работе характеристик тепловыделения при горении древесины. Они позволяют, например, предсказать влияние разновидности древесины на наступление общей вспышки (τ) в помещении размером 3,6×2,4×2,4 м с проемом 0,8×2,0 м при воздействии стандартного режима пожара в условиях крупномасштабного метода ISO 9705. Расчет проведен по уравнению Остмана-Нассбаума (Ostman–Nussbaum), установленному по данным круговых испытаний большого числа облицовочных материалов с целью корреляции результатов мало – и крупномасштабных огневых испытаний:

$$\tau = \left(\frac{t_{ign} a \sqrt{\rho}}{A} \right) + b, \text{ с.}, \quad (3.5)$$

где, t_{ign} – время задержки воспламенения образцов при $q_e = 20 \text{ кВт/м}^2$ в конкалориметрическом тесте, с; ρ – плотность древесины, кг/м^3 ; A – общее тепловыделение за период пламенного горения при $q_e = 52 \text{ кВт/м}^2$ (соответствует первому пику на кривой скорости тепловыделения $OTB_{2\text{мин}}$), Дж/м^2 ; a и b – константы. $a = 2,76 \times 10^6 \text{ Дж/}(\text{кг м})^{1/2}$; $b = - 46 \text{ с}$. Значения констант даны с учетом облицовки 3-х стен и потолка помещения комнатного теста, обеспечивают высокий коэффициент корреляции ($R = 0,98$) с результатами конкалориметрии.

В рассматриваемых условиях ISO 9705 при облицовке материалами из хвойной древесины ели или сосны общая вспышка наступит через 1,3- 2,1 мин, в случае применения древесины березы и дуба – через 3,3 и 4,56 мин соответственно. Быстрее начинает прогорать и обугливаться хвойная древесина, образуя на поверхности коксовый слой большей толщины, чем древесина лиственных пород.

По характеристикам тепловыделения проверено влияние на пожарную опасность древесины двух огнезащитных систем: 1 - пропиточного состава КСД-А (марка - 1) и 2 - вспучивающегося пленкообразующего состава МПС на основе модифицированных полисахаридов крахмала.

Анализ полученных результатов показал, что по сравнению с пропиточным составом «КСД-А» состав на основе МПС обнаруживает более высокую эффективность огнезащитного действия, благодаря образованию толстого вспененного коксового слоя с высокими теплоизолирующими свойствами. При этом можно отметить, что нанесение состава МПС на поверхность древесины сосны и ели приводит к снижению общего тепловыделения $OTB_{2\text{мин}}$ в 1,8 и 3,2 раза соответственно. При нанесении же на поверхность образцов дуба и березы общее тепловыделение за этот период снижается в 3,8 и 9,3 раза по сравнению с образцами необработанной древесины соответственно. В меньшей степени на этом показателе сказывается разновидность древесины при использовании пропиточного состава «КСД-А»: значение $OTB_{2\text{мин}}$

снижается всего в 1,5–2 раза. Огнезащитная обработка древесины снижает темпы роста скорости тепловыделения (FIGRA) как на этапе пламенного горения, так и тлеющего горения коксового слоя (см. Таблицу 3.5).

Полученные параметры тепловыделения по значению $СТВ_{max}$ и времени его достижения на стадии пламенного горения (τ_{max}) были использованы для расчета ОФП по полевой модели критической продолжительности пожара $\tau_{кр}$ (достижения в рабочей зоне $T_{кр} = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$ на выходе из помещения размерам $3,6 \times 2,4 \times 2,4 \text{ м}$). Расчеты показали, что значения $\tau_{кр}$ существенно ниже времени общей вспышки.

Таблица 3.5 – Влияние огнезащитной обработки древесины на характеристики тепловыделения при $q_e = 35 \text{ кВт/м}^2$

Образец	$\tau_{\text{в}}$ с	$\tau_{1\text{max}}$ с	СТВ _в кВт/м ²	СТВ _{1max} кВт/м ²	τ_{min} с	СТВ _{min} кВт/м ²	$\tau_{2\text{max}}$ с	СТВ _{2max} кВт/м ²	ОТВ _{2мин} кВт×мин/м ²	FIGRA кВт/м ² с	
										пламя	тление
Ель	9	30		131,2			195	233,2	218,2	9,37	0,89
Ель КСДА	10	33	6,0	83,5	176,6	53	360	156,9	115,2	3,3	0,56
Ель МПС	30	65	32,15	45,0	150	43,4	415	164,5	68,8	0,37	0,45
Сосна	6	20		129,0			276	203,5	180,6	9,21	-
Сосна КСДА	10	22,5	30	88,4	130	61,7	354	163,7	128,5 (180,6)	4,6	0,46
Сосна МПС	30	80	44,0	63,4	120	56,2	419	169,5	99,1	0,39	0,38
Береза	10	53		157,7			215	400,5	279,9	3,66	1,78
Береза КСДА	20	70	44	90,8	150	94,9	320	262,3	154,8 (279,9)	0,94	0,98
Береза МПС	30	-	-	-	210	67,3	406	273	30,0	-	1,04
Дуб	13,6	33		131,3			281	245,1	198	6,76	0,86
Дуб КСДА	20	40	-	103,1	120	73,1	376	171,3	138,8 (198,0)	2,74	0,38
Дуб МПС	50	105	20,0	55,3	160	42,1	352,5	167,3	51,6	0,44	0,65

Результаты исследования характеристик тепловыделения деревянных элементов ограждающих ЛДКрК приводят к выводу, что при разработке мероприятий направленных на обеспечение пожарной безопасности зданий нельзя использовать усредненные показатели для древесины т.к., для разных видов и пород они существенно различаются.

ГЛАВА 4. ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ

Поведение ограждающих легких деревянных каркасных конструкций при тепловом или огневом воздействии зависит от природы материала каркаса, облицовок и теплоизоляции, а также условий воздействия. Полимерные пенопласты значительно отличаются от монолитных невспененных материалов по своим физическим и физико-химическим свойствам из-за гетерофазной морфологической структуры. Пенопласты имеют более низкое значение тепловой инерции ($\lambda \rho s$) по сравнению с монолитными материалами. Поэтому, при соблюдении одинаковых условий нагрева, тепло аккумулируется в поверхностном слое и температура поверхности ТИМ увеличивается очень быстро [59,60,61].

Представляло интерес сравнить поведение ТИМ органической и неорганической природы при динамическом нагреве на воздухе со скоростью 12 град/мин от 25 до 900°C, выяснить их формоустойчивость и определить линейную усадку. Для сравнения формоустойчивости разных ТИМ выбраны образцы полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» с плотностью $\rho = 140 \text{ кг/м}^3$ и промышленных образцов самозатухающего пенополистирола ПСБ – С 25 ($\rho = 15 \text{ кг/м}^3$) и ППС – 10 ($\rho = 15 \text{ кг/м}^3$), а также базальтовой волокнистой теплоизоляции Rockwool Light ($\rho = 36 \text{ кг/м}^3$). Исходный размер образцов пенопластов был 25×15×15 мм., Rockwool Light 50×50×50 мм (Рисунок 4.1).

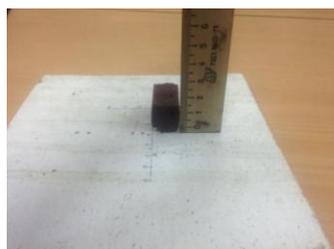


Рисунок 4.1 – Измерение геометрических размеров теплоизоляции до испытания

По мере повышения температуры нагрева определяли размеры и потерю массы образцов в результате разложения. На рисунке показано изменение вида и размеров образцов полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» в процессе испытания (Рисунок 4.2).

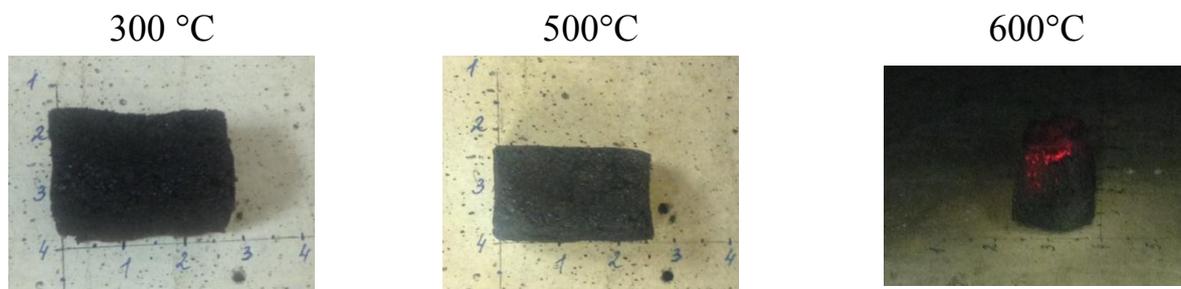


Рисунок 4.2 – Термоусадка полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» при динамическом нагреве в муфельной печи со скоростью нагрева 12 град/мин на воздухе

На рисунке 4.3 показано изменение вида и размеров образцов органической теплоизоляции «Rockwool scandic light» в процессе испытания.

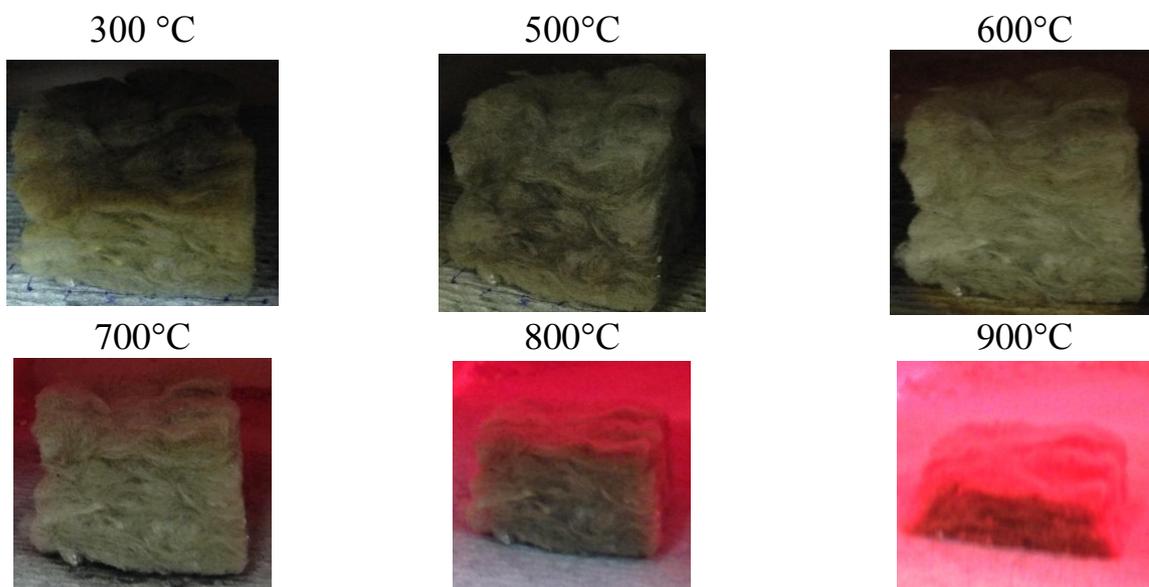


Рисунок 4.3 – Термоусадка базальтоволоконистой теплоизоляции Rockwool Light.

На рисунке 4.4 приведены результаты определения линейной усадки исследуемых образцов ТИМ в сравнении с литературными данными [62, 63] для образ-

цов эластичного ППУ* ($\rho = 30 \text{ кг/м}^3$), минеральной стекловолокнистой* ($\rho = 12 \text{ кг/м}^3$) и базальтовой плит* ($\rho = 38 \text{ кг/м}^3$).

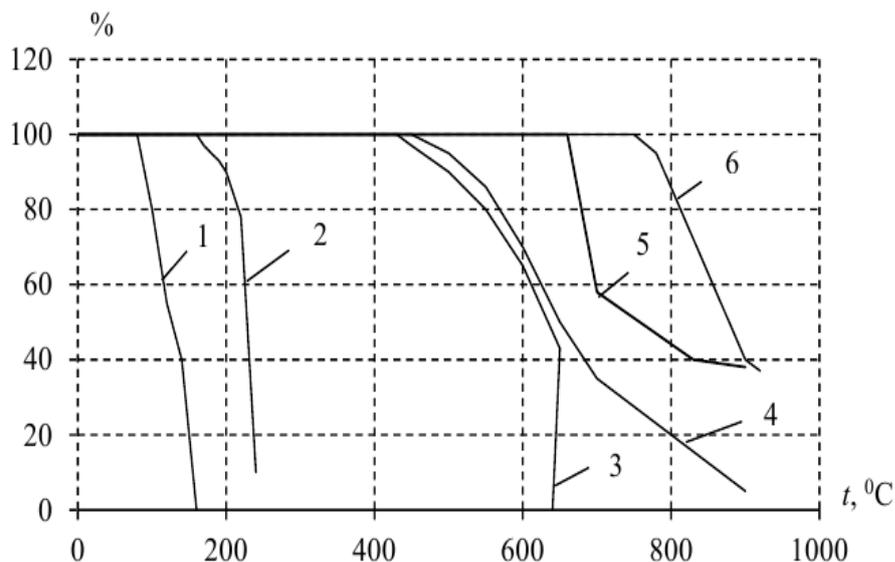


Рисунок 4.4 – Влияние температуры на термоусадку ТИМ: 1. ПСБ – С25 и ППС -10; 2 – ППУ* ($\rho = 30 \text{ кг/м}^3$); 3 – стекловолокнистая плита* ($\rho = 12 \text{ кг/м}^3$); 4 - пенокомпозит «PENOCOM» ($\rho = 140 \text{ кг/м}^3$); 5* – базальтовая волокнистая теплоизоляция ($\rho = 38 \text{ кг/м}^3$); 6 – Rockwool Light ($\rho = 36 \text{ кг/м}^3$)

Установлено, что плавление и усадка пенополистирола самозатухающего ПСБ – С 25 и ППС – 10 наблюдаются при 80 – 110 °C, ППУ* – со 170 °C. Усадка стекловолокнистой теплоизоляции начинается при температуре 430 °C, а базальтовой теплоизоляции 650 °C (при 700 °C её усадка составляет - 42 %, а при 900 °C - 62 %). При этом стекловолокнистая теплоизоляция теряет 6 % массы к 310 °C за счет разложения связующего и далее сохраняет массу постоянной, а базальтовая к моменту плавления теряет 3 % массы и 6 % к 1000 °C. Образец Rockwool Light Scandic представляет собой наиболее тугоплавкий ТИМ. Его усадка начинается при температуре выше 750 °C. От базальтоволокнистой теплоизоляции (рисунок 4.4., кривая 5), он отличается, по-видимому, более высоким суммарным содержанием оксидов кремния и алюминия и более низким содержанием оксидов щелочноземельных металлов (Са и Mg). Усадку минеральной теплоизоляции можно объяснить переходом волокон из кристаллического состояния в аморфное. Используемый образец пенокомпозита «PENOCOM» не плавится. Происходит его усадка и коксование, она начинается

при температуре выше 470 - 480 °C. Влияет и частичное «выгорание» пенококса при нагревании на воздухе, к 600 °C усадка достигает 30 %. В ограждающей конструкции при испытании при стандартном режиме пожара в огневой печи концентрация кислорода меньше атмосферной и процесс уменьшения толщины (усадки) полимерной теплоизоляции «PENOCOM» должен быть более медленным. По формоустойчивости при нагреве пенокомпозит «PENOCOM» превосходит стекловолоконистую теплоизоляцию.

Уменьшение массы в результате термического разложения полимерного пенокомпозита «PENOCOM» при сохранении его объема означает уменьшение плотности и изменение пористости ТИМ на этом этапе теплового воздействия. Последующая усадка ТИМ в результате пиролиза (выгорания) пенококса приводит к дальнейшему снижению его плотности и увеличению пористости.

Когда ТИМ плавится или претерпевает усадку, в ограждающих конструкциях появляется свободное пространство, которое будет влиять на теплопередачу. И этот фактор влияния следует учитывать.

В малоэтажном строительстве в ЛДКрК пенополистирол самозатухающий применяется очень часто. Поэтому было решено наряду с инновационным ТИМ «PENOCOM» изучить дополнительно механизм и определить макрокинетические параметры разложения пенополистирола в воздушной и инертной средах. Подход к установлению механизма пиролиза и термоокислительной деструкции полимерных теплоизоляционных материалов пониженной горючести одинаков. Он основан на термогравиметрическом анализе разложения образцов (3 - 4 мг) в динамических условиях нагрева от 25 до 800 °C с постоянной скоростью 5,10,20 град/мин., в потоке азота или воздуха (50 мл/мин).

Для установления физического механизма разложения пенокомпозита и расчета кинетических параметров использована методология, описанная в работе [50].

В качестве примера представлены ТГ и ДТГ кривые термоокислительной деструкции (ТОД) исследуемого образца пенокомпозита, полученные при нагревании с постоянной скоростью подъема температуры 5 - 20 град/мин (Рисунок 4.5).

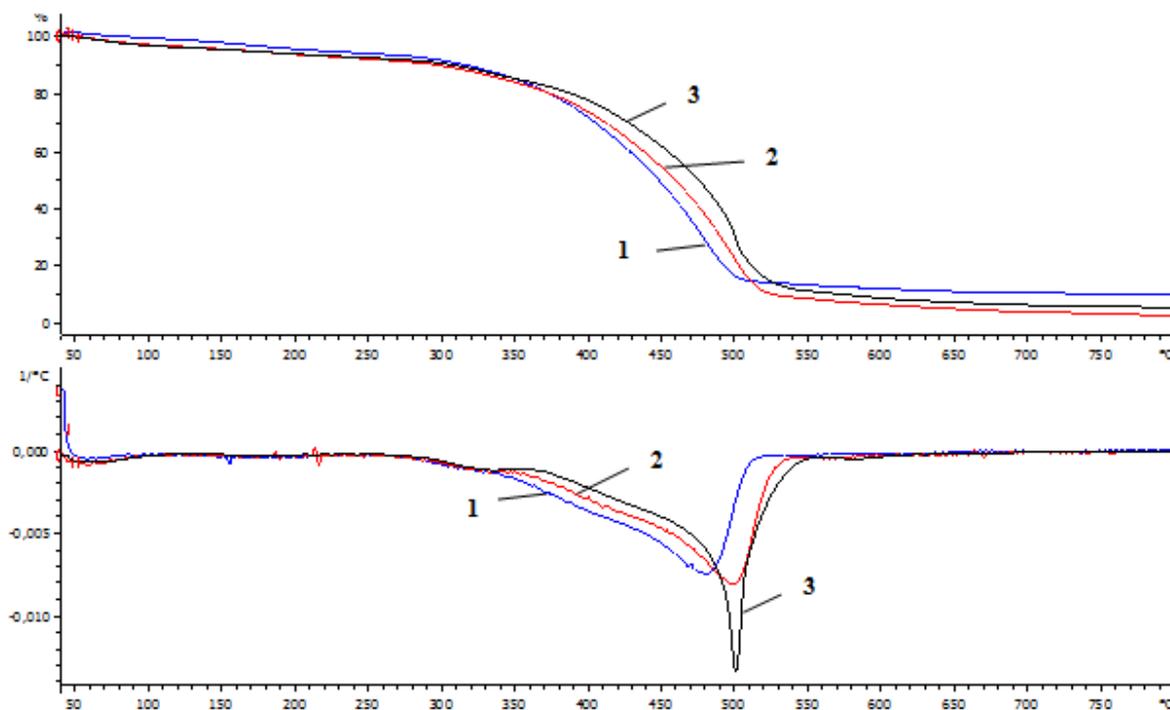


Рисунок 4.5 – ТГ и ДТГ кривые разложения пенокомпозиата “PENOCOM” в потоке воздуха при разной скорости нагрева: 1 – 5 град/мин; 2 – 10 град/мин; 3 – 20 град/мин

Можно заметить, что с увеличением скорости нагрева происходит закономерное смещение кривых в сторону более высоких температур. Незначительные потери массы (3 – 4%) при нагревании до 110 – 120°С обусловлены испарением влаги. Собственно, процесс термоокислительного разложения начинается выше 250 – 260°С, и на всем протяжении протекает с выделением тепла, показывая наибольший экзотермический эффект на последнем этапе в интервале 450 – 530°С. Его мы связываем с окислением продукта разложения с повышенным содержанием углерода (пенококса). По-видимому, кислород воздуха ускоряет не только деструкцию пенокомпозиата на начальных низкотемпературных стадиях, но и его карбонизацию. При достижении температуры 800°С наблюдается практически полная потеря массы образца.

В отсутствие кислорода в окружающей среде при скорости нагрева 20 град/мин пиролиз пенокомпозиата осуществляется в две стадии: в интервале температур 260-430°С и 430-775°С соответственно. При нагревании до 800°С остается 40% кокса.

Расчет эффективных кинетических параметров разложения веществ по ТГ и ДТГ кривым, полученным в динамических условиях нагрева при постоянной скорости повышения температуры, основан на уравнении:

$$d\alpha/dT = A \exp(-E/RT) f(\alpha)/\beta \quad (4.1)$$

или после разделения переменных:

$$d\alpha/f(\alpha) = (A/\beta) \exp(-E/RT) dT \quad (4.2),$$

где α - степень конверсии, т.е. доля прореагировавшего вещества на рассматриваемой стадии разложения; T - температура, К; A - предэкспоненциальный множитель; E - энергия активации; β - скорость нагрева, град/мин; $f(\alpha)$ - функция, определяющая физический механизм разложения, индивидуальный закон скорости разложения вещества от степени конверсии.

$$\alpha = (m_o - m_t)/(m_o - m_k) \quad (4.3),$$

где m_o , m_t , m_k - масса вещества в начальный, текущий и конечный момент времени разложения. Интеграл левой части уравнения (2) обозначают символом $g(\alpha)$ и называют интегрированной функцией конверсии.

Функции $f(\alpha)$ или $g(\alpha)$ для гетерогенных реакций согласно [64] описывают физическую способность молекулярных частиц или функциональных групп вступать в контакт друг с другом, отражают трансляционный характер процесса. В настоящее время установлено 18 функций конверсии. Они подразделены на несколько групп по механизму, контролирующему кинетику гетерогенных процессов термического разложения веществ [48,50]. Выделены группы, отражающие диффузионный процесс (D); реакции на границе раздела фаз (B); зарождение ядер зародышей (нуклеация) по закону случая и рост зародышей (R); реакции со степенным законом изменения конверсии (P).

Интегрирование правой части уравнения (2) представляет значительные трудности. Предложены различные приближенные решения [48,50]. Нами использована наиболее точная аппроксимация Горбачева [50] и, таким образом, применено уравнение: в координатах $\log [g(\alpha)/T^2] - 1/T$ для оценки кинетических параметров.

$$g(\alpha) = \{ART^2/\beta (E + 2RT)\} \exp (-E/RT) \quad (4.4);$$

Для реалистичного описания кинетики разложения пенокомпозита “PENOCOM” необходимо определить соответствующий механизм гетерогенной реакции разложения, т.е. функцию $g(\alpha)$. Каждую стадию разложения пенокомпозита в рассматриваемых температурных интервалах мы анализировали как целую ТГ кривую с α от 0 до 1.

Относительно простой и удобный метод определения функции $g(\alpha)$ был разработан Criado [65]. Им было показано, что приведённая скорость разложения – отнесённая к скорости полураспада вещества (при $\alpha = 0,5$), не зависит от кинетических параметров процесса разложения и скорости нагрева, а зависит только от механизма разложения.

Приведенная скорость $V = (T/T_{0,5})^2 (d\alpha/dt) / (d\alpha/dt)_{0,5}$ может быть определена по ДТГ кривой по соотношению расстояний соответствующих точек от базовой линии, так как величина $(T/T_{0,5})^2$ близка к 1.

Для выяснения механизма основных стадий термоокислительного и термического разложения пенокомпозита мы воспользовались табулированными значениями приведённых скоростей при $\alpha = 0,75$, а также значениями α , соответствующими максимальной приведённой скорости разложения и имеющими диагностический характер [50].

При рассмотрении ДТГ кривой термоокислительного разложения пенокомпозита, полученной при скорости нагрева 10 град/мин можно отметить её сложный характер (Рисунок 4.6). ДТГ кривая позволяет выделить в виде гауссианов 4 стадии скорости потери массы, перекрывающиеся друг друга в той или иной степени. Максимумы выделенных пиков на кривой ДТГ соответствуют температуре 343°C, 411°C, 456° и 498°C. Значения степени конверсии при максимальной приведенной скорости потери массы на всех выделенных стадиях близки к теоретической величине $\alpha_{\text{макс}} = 0,70$ [50]. Поэтому уверенно можно считать, что все стадии ТОД пенокомпозита (явные и скрытые) осуществляются по диффузионному механизму D3 в сферической геометрии. Подтверждением этого вывода служат

рассчитанные значения приведенных скоростей потери массы $(d\alpha/dt)_{0,75}/(d\alpha/dt)_{0,5}$ для первой и четвертой, самой интенсивной стадии ТОД пенокомпозита.

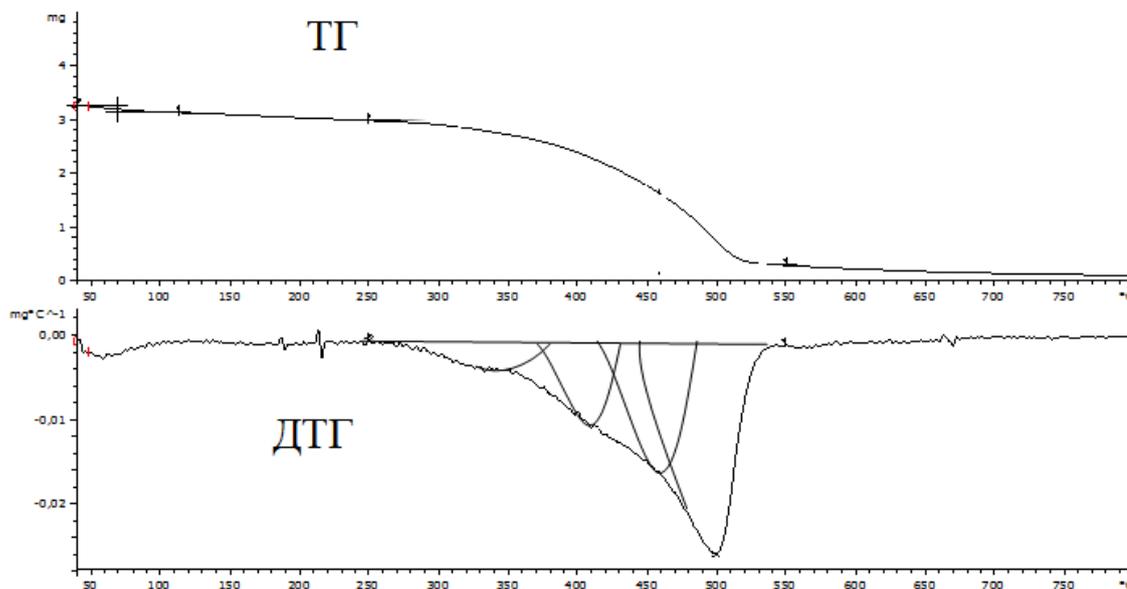


Рисунок 4.6 – ТГ и ДТГ кривые термоокислительного разложения пенокомпозита “PENOCOM” при его нагревании со скоростью 10 град/мин

На первой стадии ТОД в интервале 245-400°C приведенная скорость потери массы $(d\alpha/dT)_{0,75}/(d\alpha/dT)_{0,5} = 7,0 \text{ мм}/6,2 \text{ мм} = 1,129$, т.е. близка к теоретическому значению 1,13 для механизма D3. На четвертой стадии ТОД в интервале 438-536°C имеем $(d\alpha/dT)_{0,75}/(d\alpha/dT)_{0,5} = 58\text{мм}/50\text{мм} = 1,137$, что также соответствует теоретическому значению 1,13 для механизма D3. Таким образом, интегральная функция конверсии ТОД пенокомпозита описывается уравнением: $g(\alpha) = [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$.

Наблюдаемый полихроматический характер ТОД пенокомпозита ‘PENOCOM’, по-видимому, обусловлен особенностями морфологической структуры пенокомпозита, последовательным включением в процесс окисления открытых макро-, микрочеек, затем замкнутых микрочеек. И наконец, образовавшегося пенококса с большой площадью поверхности. На рисунке 4.7 (а, б) представлены анаморфозы в координатах зависимости $\log [g(\alpha)/T^2] - 1/T$ первой и четвертой стадий ТОД пенокомпозита по механизму D3 (Рисунок 4.7).

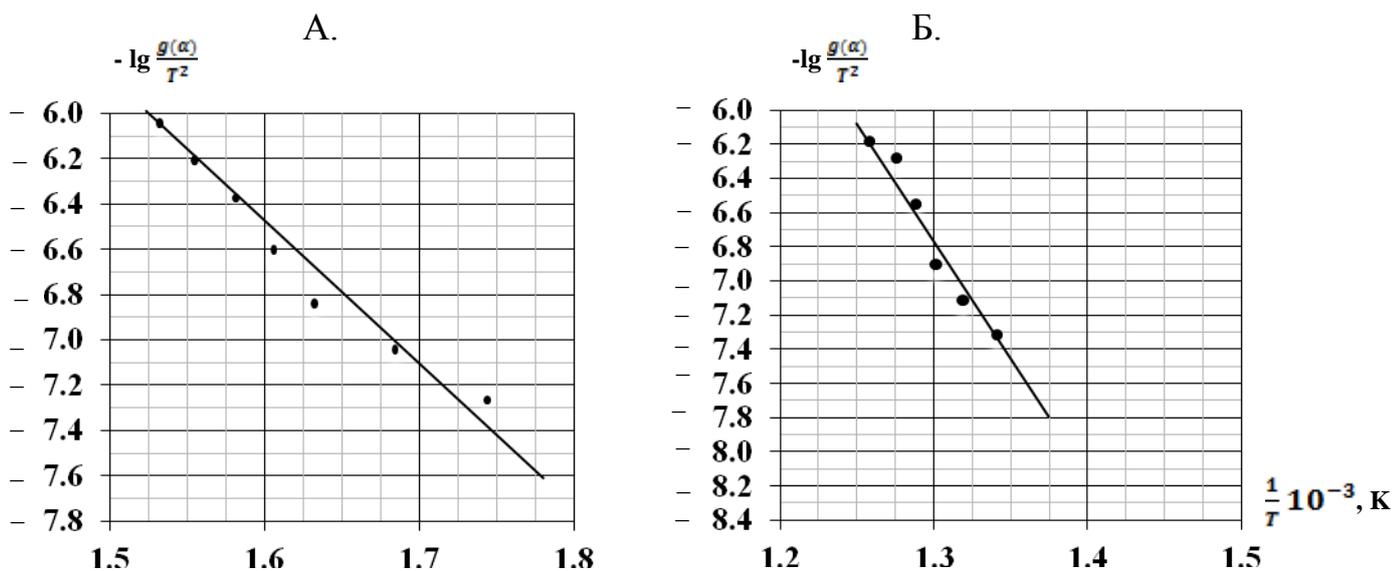


Рисунок 4.7 – Зависимость функции $\log[g(\alpha)/T^2]$ от $1/T$ для I-ой (а) и IV-ой стадии (б) термоокислительного разложения пенокомполита «PENOCOM» при скорости нагрева 10 град/мин

Приведенные анаморфозы позволяют по тангенсу угла наклона рассчитать энергию активации ТОД пенокомполита и затем – предэкспоненциальный множитель: $E_1 = 122,38$ кДж/моль; $A_1 = 1,9 \times 10^9$ мин⁻¹ и $E_4 = 254,9$ кДж/моль; $A_4 = 1,07 \times 10^{18}$ мин⁻¹.

Метод мультиплетной скорости нагрева дает значения энергии активации для первой и четвертой стадий ТОД пенокомполита ($E_1 = 120 \pm 3$ кДж/моль и $E_4 = 253,6 \pm 3$ кДж/моль), практически совпадающие с указанными выше.

Совершенно другие закономерности наблюдаются при разложении пенокомполита «PENOCOM» в инертной среде (Рисунок 4.8).

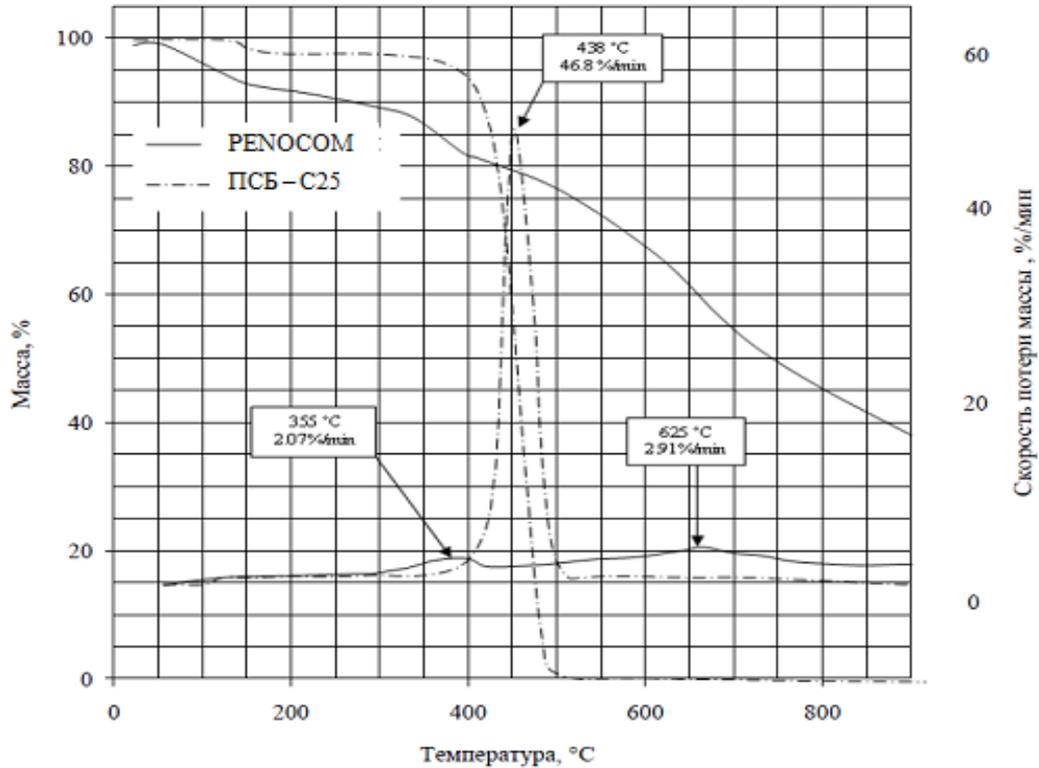


Рисунок 4.8 – ТГ и ДТГ кривые разложения «PENOCOM» и ПСБ – С25 в аргоне, 20 град/мин

Аналогичный подход к определению физического механизма по значениям степени конверсии при максимальной приведенной скорости разложения и приведенной скорости при $\alpha = 0,75$ привел к следующему заключению. На первой стадии в интервале 260–430°C имеем $\alpha_{\text{макс}} = 0,62$ и значение приведенной скорости $(d\alpha/dt)_{0,75} / (d\alpha/dt)_{0,5} = 1,0$, что согласуется с теоретическими значениями $\alpha_{\text{макс}} = 0,63$ и 1 для механизма R(n=1) нуклеации и росту ядер по закону случая. Интегрированная функция конверсии описывается уравнением:

$$G(\alpha) = [-\ln(1-\alpha)]^{n-1} \quad (4.5)$$

Вторая стадия термического разложения пенокомпозиата при нагревании его со скоростью 20 град/мин в интервале 430–775 °C также протекает по механизму R(n=1). Обработка графических зависимостей в координатах $\log[g(\alpha)/T^2] - 1/T$ с учетом контролирующего механизма разложения приводит к следующим кинетическим параметрам: $E_1 = 78,3 \pm 3 \text{ кДж/моль}$; $A_1 = 4,7 \times 10^{19} \text{ мин}^{-1}$ и $E_2 = 72,3 \pm 3 \text{ кДж/моль}$; $A_2 = 4,3 \times 10^{15} \text{ мин}^{-1}$ (Рисунок 4.9).

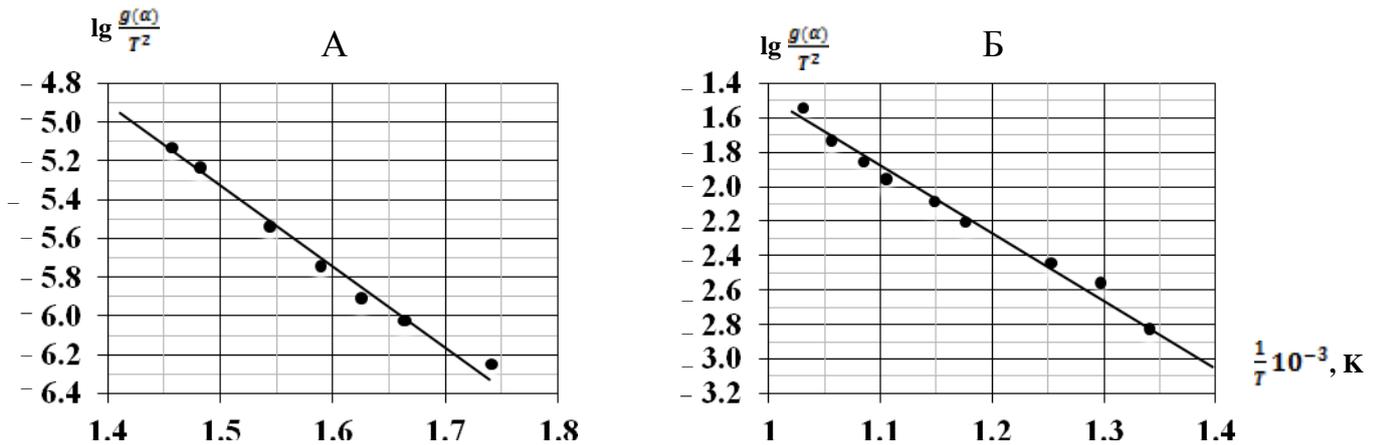


Рисунок 4.9 – Зависимость функции $\log[g(\alpha)/T^2] - 1/T$ для 1–ой (а) и 2–ой (б) стадий термического разложения пенокомпозиата «PENOCOM» при скорости нагрева 20 град/мин

Сравнение кинетических параметров и механизма разложения пенокомпозиата «PENOCOM» в разных атмосферных средах дает основание полагать, что в полимерной матрице с сетчатой структурой конденсированные ароматические зародыши – предшественники графитовой структуры формируются выше 430°C. На образование полимерного углеродного продукта в значительной мере влияет повышенный энтропийный фактор, характеризующий подвижность и возможность контакта реагирующих фрагментов макромолекул.

Термический анализ приведен для двух промышленных образцов самозатухающего пенополистирола: ПСБ – С25 (ГОСТ15588 - 86) и ППС – 10 Хабаровского завода «стройматериалы». Это образцы отличались не только по объемной плотности, но и по содержанию антипиренов разной природы. Согласно ГОСТ 15588 образцы ПСБ – С25 содержит в качестве антипирена тетрабромпаракилол.

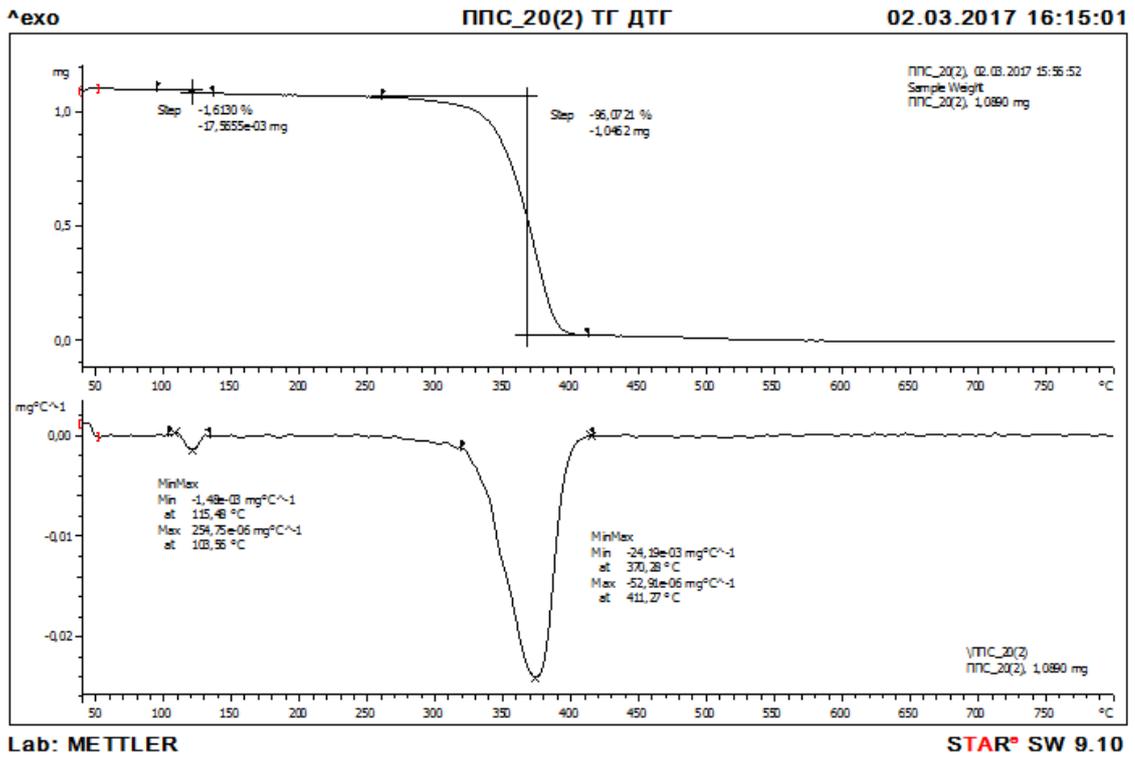


Рисунок 4.10 – ТГ и ДТГ кривые разложения ППС – 10 на воздухе, при скорости нагрева 20 град/мин

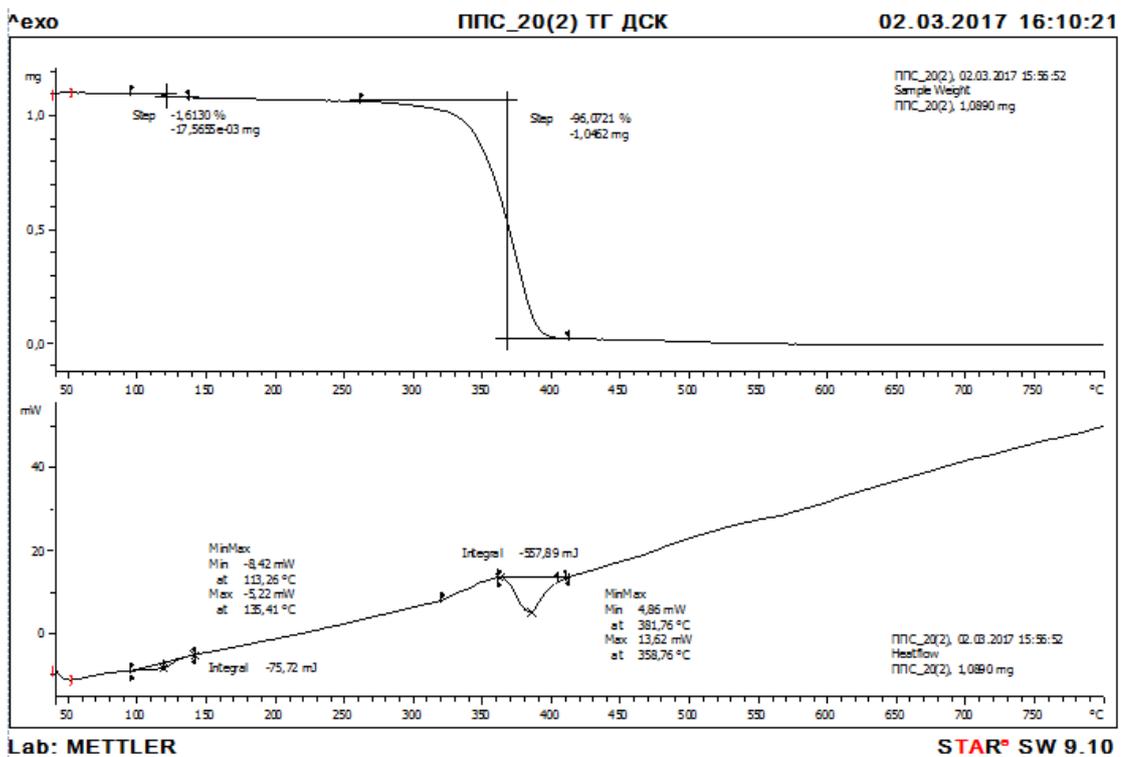


Рисунок 4.11 – ДСК кривые разложения ППС – 10 на воздухе, при скорости нагрева 20 град/мин

На рисунке 4.11 в качестве примера показаны ТГ, ДТГ и ДСК кривые ТОД образца пенополистирола ППС – 10, полученные при скорости нагрева 20 град/мин на воздухе. Рассмотрение кривых приводит к выводу, что разложение ППС – 10 происходит только после плавления ТИМ в интервале 85 – 135 °С и перехода его в жидкое состояние. Теплота плавления в расчете на 1 г., вещества составляет $\Delta H_m = 69,5$ Дж/г. Само разложение ППС – 10 протекает в одну стадию в интервале 260 – 411 °С с максимальной скоростью потери массы 44 %/мин при 370 °С. Этот процесс является эндотермическим с энтальпией газификации $\Delta H_g = 533,25$ Дж/г.

Пенополистирол самозатухающий ПСБ – С25 также разлагается на воздухе в одну стадию после плавления. По сравнению с образцом ППС – 10 при той же скорости нагрева 20 град/мин на воздухе эндотермический процесс ТОД смещается в сторону немного более высокой температуры. Он осуществляется в интервале 265 – 420 °С с максимальной скоростью потери массы при температуре $T = 381,82$ °С (рисунок – 4.12).

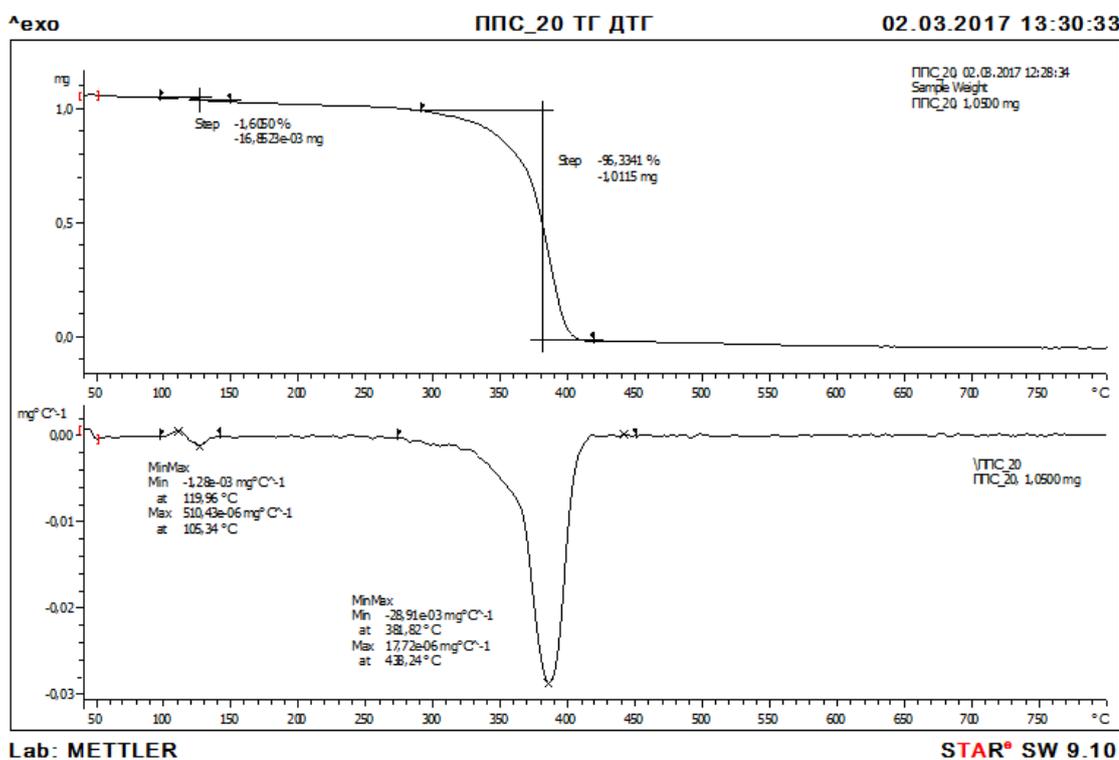


Рисунок 4.12 - ТГ и ДТГ кривые разложения ПСБ – С25 на воздухе при скорости нагрева 20 град/мин

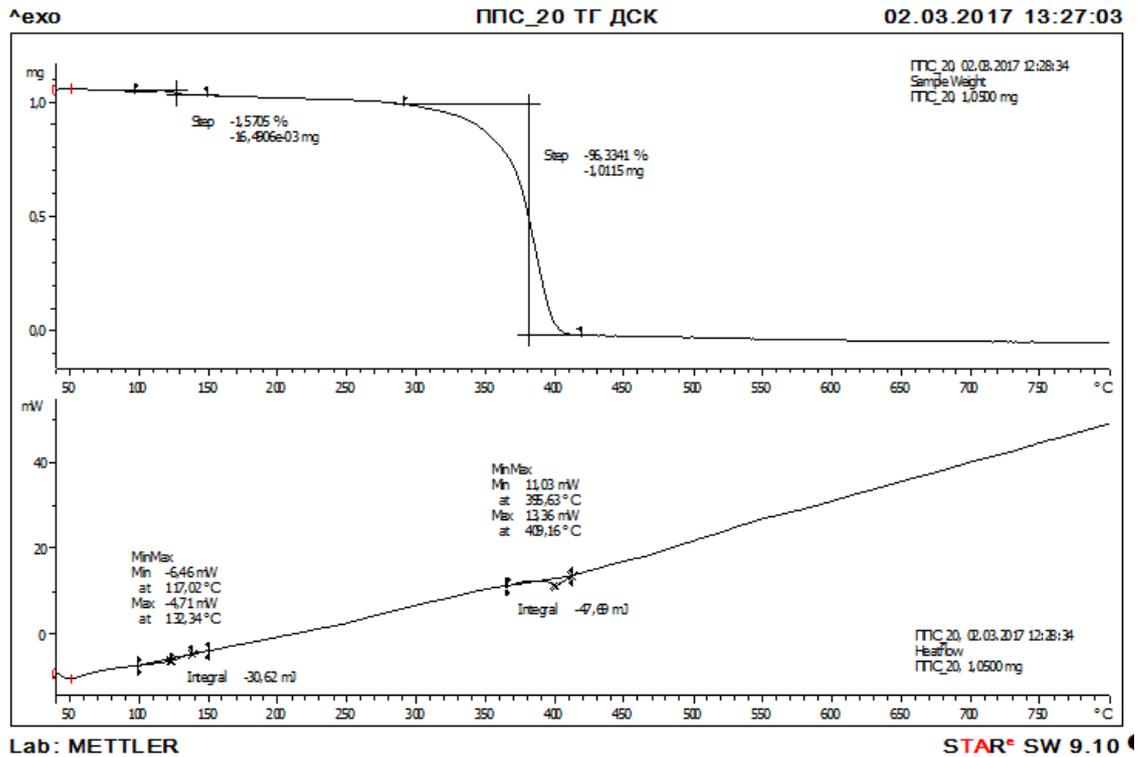


Рисунок 4.13 – ДСК кривые разложения ПСБ – С25 на воздухе, при скорости нагрева 20 град/мин

Использование подхода, аналогичному применяемому для пенокомпозита «PENOCOM», привело к выводу, что ТОД образцов пенополистирола ПСБ – С25 и ППС – 10 осуществляется по механизму нуклеации и росту ядер по закону случая и первому порядку реакции (R1). Интегрированная функция конверсии описывается уравнением $g(\alpha) = [-\ln(1-\alpha)]^{n=1}$. Однако исследуемые образцы отличаются по своим и макрокинетическим параметрам: ПСБ – С25 характеризуется эффективной энергией активации $E = 108,9$ кДж/моль и $\log A = 15,87$ мин⁻¹, а ППС – 10 имеет $E = 166,4$ кДж/моль и $\log A = 13,47$ мин⁻¹.

На рисунке 4.14 показаны графические зависимости в координатах $\log[g(\alpha)/T^2] - 1/T$ для расчета макрокинетических параметров с учетом механизма.

В инертной среде ПСБ – С25 сохраняет одностадийный, эндотермический характер разложения. Процесс пиролиза протекает лишь при более высокой температуре по сравнению с ТОД в интервале 360 – 510 °С с максимальной скоростью потери массы 46,8 %/мин при 438 °С (Рисунок 4.8)

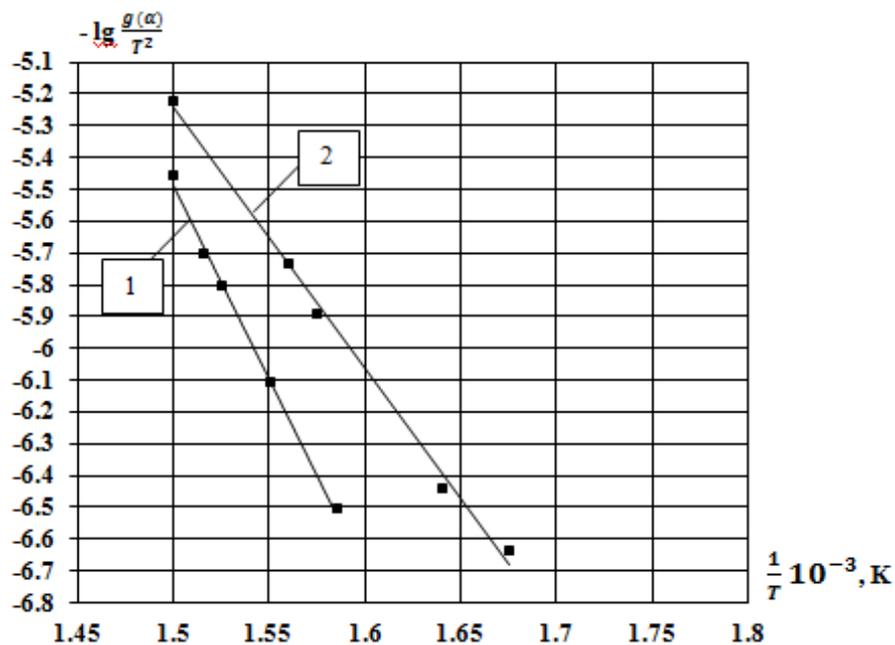


Рисунок 4.14 – зависимость функции $\log[g(\alpha)/T^2]$ от $1/T$ для термоокислительного разложения:
 1. ПСБ – С25; 2. ППС – 10 при скорости нагрева на воздухе 20 град/мин

Пиролиз протекает по механизму R1 – нуклеации и роста ядер, соответствует пиролизу порядку реакции. Расчет макрокинетических параметров разложения ПСБ – С25 и учет механизма по ТГ и ДТГ кривым, полученные в динамических условиях нагрева 20 град/мин дал следующие значения: $E = 241,7$ кДж/моль и $\log A = 17,76$ мин⁻¹.

По методу мультиплетной скорости нагрева при разных скоростях нагрева 10 и 20 получено близкое значение энергии активации разложения: $E = 232,1$ кДж/моль. Таким образом, этот результат подтверждает правильность вывода о механизме и порядке реакции пиролиза ПСБ – С25.

В отличие от неплавкого трудногоряемого карбонизирующегося пенокомпози-та «PENOCOM» образцы пенополистирола самозатухающего легко плавятся и разлагаются полностью с образованием большого количество токсичных веществ. Деполимеризация макромолекул полистирола по закону случая, которую может инициировать и ускорять кислород воздуха, приводит к образованию помимо большого количества оксида углерода таких вредных веществ, как стирол, бензол, галогенированные насыщенные углеводороды и чрезвычайно опасный по токсичности фосген и его производные [30]. Полученные результаты сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Механизм и макрокинетические параметры разложения ТИМ

ТИМ	среда	Интервал температур/ T_{\max} , °C	Механизм	E , кДж/моль	$\text{Log } A$, мин ⁻¹	Порядок реакции
ПСБ-С25	воздух	260-420/381,8	R(1)	198,9	15,87	1
ПСС-10	воздух	260-420/370,3	R (1)	166,36	13,47	1
РЕНОСОМ	воздух	245-400/343	D 3	122,38	8,28	1/3
РЕНОСОМ	воздух	433-536/498	D3	254,9	17,03	1/3
ПСБ-С25	аргон	330-500/438	R(1)	241,7	17,76	1
РЕНОСОМ	аргон	260-430/355	R(1)	78,3	18,67	1
РЕНОСОМ	аргон	430-775/625	R(1)	72,3	14,63	1

Таким образом, следует подчеркнуть, что при расчетах и проектировании ЛДКрК с применением полимерной теплоизоляции необходимо использовать более точные эффективные кинетические параметры разложения материала с учетом механизма их разложения.

ГЛАВА 5. ОГНЕСТОЙКОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ ЛЕГКИХ ДЕРЕВЯННЫХ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Известно, что огнестойкость строительных конструкций зависит от вида материалов, геометрических размеров и конфигурации сечения несущего элемента, узлов сочленения, наличия элементов усиления, величины механических нагрузок, условий огневого воздействия (пожара) и многих других факторов [66, 67, 68, 69]. Функции ограждающих конструкций и частей сооружений сводятся к предотвращению распространения пожара в соседние с очагом пожара помещения и ограничению воздействия на людей опасных факторов пожара. Поэтому ограждающие конструкции должны иметь фактический предел огнестойкости не ниже требуемого значения. Последнее рассматривается как требуемый период времени сохранения целостности конструкции (критерий E), её теплоизолирующей способности (критерий I), а также ограниченного радиационного излучения от необогреваемой поверхности конструкции (критерий W) и дымогазонепроницаемости (критерий S).

Термические и физические свойства материалов отдельных элементов всей системы в целом должны в значительной степени определять огнестойкость и пожарную опасность строительных деревянных конструкций. Обеспечение и повышение необходимого уровня пожарной безопасности строительных объектов может быть реализовано за счет применения в деревянном домостроении инновационных материалов с высокими пожарно-техническими характеристиками.

В настоящей главе приведены результаты маломасштабных испытаний при стандартном температурном режиме пожара огнестойкости ограждающих легких деревянных каркасных конструкций с разной комбинацией высококачественных современных, облицовочных и инновационных теплоизоляционных материалов. Исследуемые образцы моделировали фрагменты ненесущих ограждающих конструкций каркасного деревянного дома (стен, перегородок).

В диссертационной работе для испытания огнестойкости образцов применяли маломасштабную огневую печь с размерами огневой камеры $0,5 \times 0,39 \times 0,4$ м. В камере с помощью специально регулируемой газовой горелки устанавливали стандартный температурно-временной режим пожара в соответствии с ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94 [51,52]:

$$T = 345 \lg(8\tau + 1) + T_0, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.1)$$

где, T и T_0 – текущая и начальная температура в огневой камере, τ - время, мин.

Показания температуры в печи и в соответствующих контрольных точках на подвергаемой огневому воздействию и необогреваемой поверхности, а также внутри образцов регистрировались автоматически в ходе испытания прибором ИРТМ.

Исследуемые образцы, представляли собой трехслойные или 4-х слойные системы. Деревянные стойки сечением 150×50 мм были изготовлены из древесины сосны или ели. Образцы с площадью поверхности 370×300 мм, подвергаемой огневому воздействию, устанавливали в вертикальном положении (Рисунок 5.1.).



Рисунок 5.1 – Вид маломасштабной «Огневой печи» перед началом эксперимента

Изменение средней плотности теплового потока в маломасштабной огневой печи при горении пропан-бутановой газовой смеси в ходе нарастания температуры по стандартному режиму пожара определяли с помощью датчика полного потока (датчик Гордона). Полный тепловой поток, действующий на приемник датчика при стандартном режиме пожара определялся по формуле:

$$Q = \frac{U}{k}, \quad (5.2)$$

где, Q – полный тепловой поток в огневой печи, кВт;

U – термо-э.д.с, создающийся в приемнике полного теплового потока, мкВ;

k – переводной коэффициент приемника полного теплового потока, мкВ×м²/кВт.

Результаты измерения температуры по стандартному режиму пожара и нарастанию плотности теплового потока в огневой камере представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерения температуры и теплового потока при горении пропан-бутановой смеси в огневой печи

q_e кВт/м ²	17	21	23	26	32	38	39	46	52	57	63	73	90
τ , мин	2	2,5	3	4	5	7	10	15	20	30	40	45	58
$T_{печ}$, °С	318	350	400	450	518	608	650	700	750	808	850	905	1000

На рисунке 5.2 показана кривая, соответствующая изменению температуры по стандартному режиму пожара и нарастанию плотности теплового потока в огневой камере.

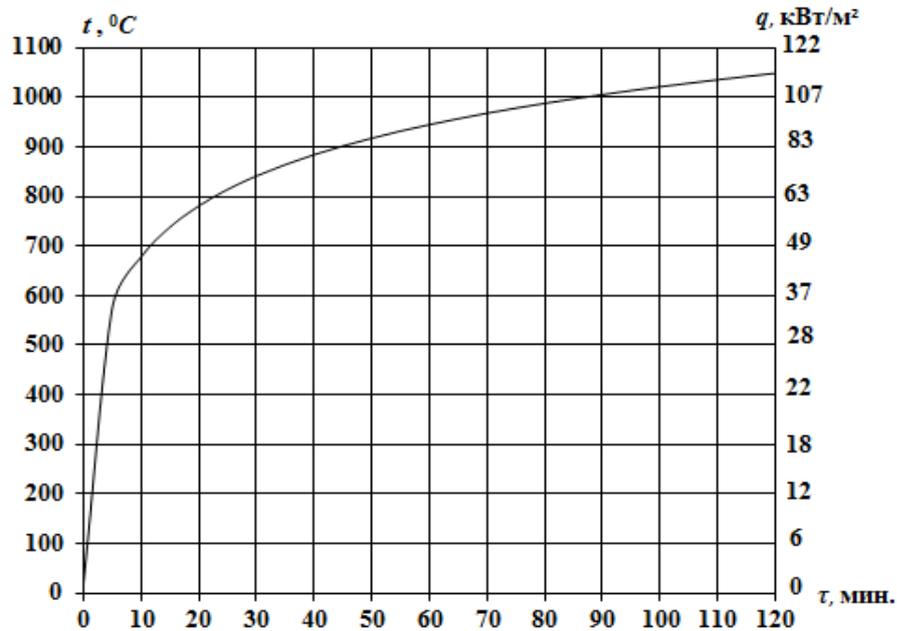


Рисунок 5.2 –Изменение температуры и теплового потока в огневой печи при стандартном режиме пожара

Результаты приводят к выводу, что плотность теплового потока в огневой печи при стандартном режиме пожара возрастает со временем τ по степенному закону: $q''_e = 17,2 \tau^{0,4}$. Полученная степенная зависимость плотности теплового потока от времени в маломасштабной огневой печи согласуется с зависимостью, установленной в стандартных крупномасштабных испытаниях для мгновенной: $q''_e = 25,2 \tau^{0,4}$ и средней плотности теплового потока за весь период испытания: $q''_e = 18\tau^{0,4}$ [58].

5.1. Определение фактического предела огнестойкости ограждающих ЛДКрК и вклад в огнестойкость составляющих элементов

Предел огнестойкости ограждающих конструкций определяли по признакам EI: времени потери целостности (E) и теплоизолирующей способности (I – времени достижения критической максимальной температуры 180 °С на необогреваемой стороне конструкции). Проведены испытания в огневой печи семи вариантов фрагментов ЛДКрК с различными вариантами их конструкторского исполнения. Оценивалось влияние материалов теплоизоляции и облицовки. Вклад в общую огнестойкость конструкции каждого слоя оценивали по температурным кривым, в предположении достижения на обогреваемой стороне древесины или полимерной теплоизоляции температуры 270 °С. Использован также расчетный метод оценки вкладов в соответствии с рекомендациями [70, 17,18]. Таким образом, фактический предел огнестойкости ограждающих конструкций равен сумме временных вкладов составляющих элементов: $\Pi_{\phi} = \Sigma \tau_i$. Схема установки термодпар на исследуемых фрагментах ограждающих легких деревянных каркасных конструкций представлена на рисунке 5.1.1

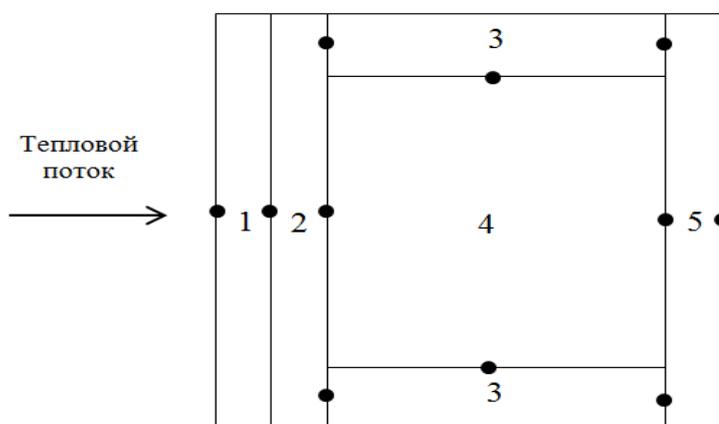


Рисунок 5.1.1 – Облицовочная плита со стороны огневого воздействия; 3 – деревянные стойки; 4 – теплоизоляция; 5 – облицовочная плита на обратной стороне конструкции;
● - локация спаев термодпар T_n

В качестве первой ограждающей конструкции была испытана 3-х слойная система I, включающая элементы: OSB, утеплитель Rockwool и OSB (Таблица 5.1.1).

Таблица 5.1.1–Характеристика элементов ограждающей конструкции системы I

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м ³
Система I			
OSB	0,37×0,3×0,009	0,62	620
Утеплитель «Rockwool scandic»	0,255×0,3×0,1	0,268	35
OSB	0,37×0,3×0,009	0,62	620
Каркас: сосна (0,025)	0,3×0,1×0,025	0,348	464

Фактический предел огнестойкости ограждающей деревянной конструкции системы I по результатам температурных измерений составил 42 минуты (рисунок 5.1.2).

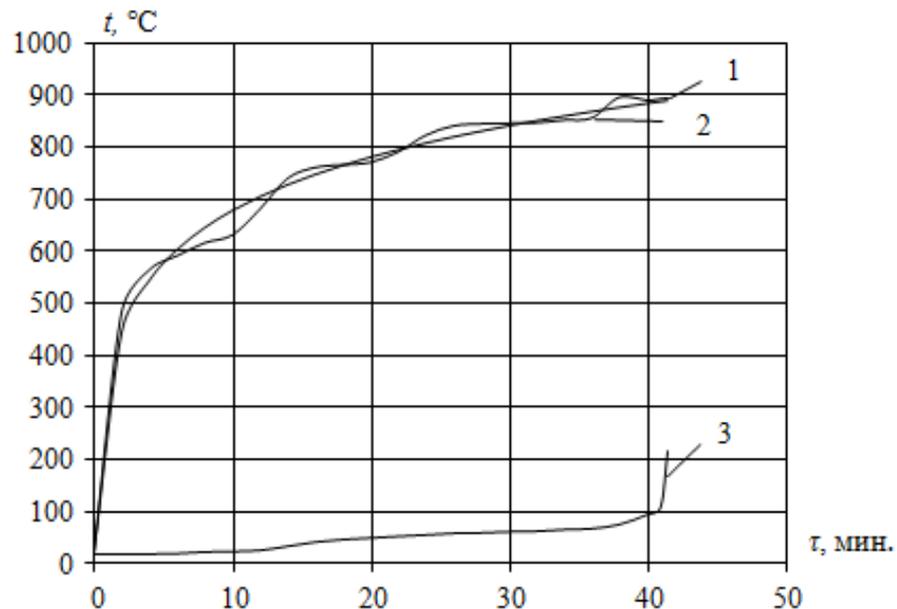


Рисунок 5.1.2 – Динамика изменения температуры в огневой печи и контрольных точках на поверхности элементов конструкции (система I): T_1 – стандартный режим пожара; T_2 – на обогреваемой поверхности OSB; T_3 – на необогреваемой поверхности конструкции

Расчет вклада отдельных элементов в огнестойкость этой ограждающей конструкции проведен в соответствии с EN 1995-1-2 Eurocode 5 [17] и рекомендацией [18]. Метод расчета основан на рассмотрении направления теплопередачи в ограждающей конструкции и последовательной оценке времени потери теплоизолирующей способности каждого слоя, учете соседних слоев на теплопередачу и влияния узлов соединения в конструкции. Указанный учет осуществляют с помощью ввода соответствующих поправочных коэффициентов в базовые значения теплоизолирующей способности каждого элемента. Предел огнестойкости конструкции в целом равен сумме вкладов отдельных элементов, характеризующихся временем потери их теплозащитных свойств. Базовые значения защитных свойств элементов конструкции в зависимости от их толщины, а также поправочные коэффициенты в [17,18] были рассчитаны методом конечных элементов и согласованы с результатами крупномасштабных стандартных испытаний. В результате для каждого материала конструктивного элемента представлены расчетные формулы.

В технической рекомендации по проектированию деревянных зданий и сооружений [17] расширен список материалов, используемых в качестве элементов ограждающих конструкций, по сравнению с Eurocode 5 [18]. В частности, приведены данные для OSB плит и базальтового утеплителя. Это обстоятельство позволило рассчитать огнестойкость ограждающей конструкции системы I и вклады в неё используемых конструктивных элементов. Ниже представлены используемые расчетные зависимости, заимствованные из [18] и полученные с их помощью.

Базовое значение времени огнезащиты первого элемента – OSB плиты рассчитывали по формуле: $t_{\text{prot},0,1} = 23(h_1 / 20)^{1,1} = 23(9 / 20)^{1,1} = 9,56$ мин.

Позиционные коэффициенты для этого слоя: $k_{\text{pos,exp},1} = 1$ (с обогреваемой стороны нет других слоев); $k_{\text{pos,unexp},1} = 0,5 h_1^{0,15} = 0,5 \times 9^{0,15} = 0,7$.

Вклад в предел огнестойкости конструкции первого слоя OSB плиты составляет $9,56 \times 1 \times 0,7 = 6,69$ мин.

Базовое значение второго слоя конструкции – теплоизоляции Rockwool Scan-dic рассчитывали по формуле:

$$t_{\text{prot},0,2} = 0,3 h_2^{[(0,75 \log \rho) - \rho/400]} = 0,3 \times 100^{[(0,75 \times \log 36) - 36/400]} = 41,4 \text{ мин.}$$

Позиционные коэффициенты для второго слоя - теплоизоляции:

$$k_{\text{prot},\text{exp},2} = 1 - 0,6 \times (t_{\text{prot},1} / t_{\text{prot},0,2}) = 1 - 0,6 \times 6,69/41,4 = 1 - 0,162 = 0,838.$$

$$k_{\text{prot},\text{unexp},2} = 1 \text{ (необогреваемая сторона теплоизоляции – плита OSB).}$$

Таким образом, вклад теплоизоляции в огнестойкость конструкции равен: $41,4 \times 0,838 = 34,69$ мин.

Наконец, базовое значение последнего слоя ограждающей конструкции – OSB плиты: $t_{\text{ins},0,3} = 16 (h_3 / 20)^{1,4} = 16 (9 / 20)^{1,4} = 5,23$ мин.

Коэффициент позиции последнего слоя:

$$k_{\text{ipos},\text{exo},3} = 0,5 \sqrt{(t_{\text{prot},0,3} / \sum t_{\text{prot},1,2})} = 0,5 \sqrt{5,23 / (6,7 + 34,7)} = 0,5 \times 0,35 = 0,126.$$

Вклад в огнестойкость ограждающей конструкции OSB плиты составит время: $5,23 \times 0,126 = 0,66$ мин.

Таким образом, расчетный предел огнестойкости конструкции с соответствующими вкладами её элементов равен:

$$P_{\phi} = \sum \tau_i = (6,7)_{\text{OSB}} + (34,7)_{\text{R-WOOL}} + (0,7)_{\text{OSB}} = 42,1 \text{ мин.}$$

Это значение практически не отличается от фактического, хотя не учтен вклад металлического узла соединения, отрицательно сказывающемся на огнестойкости ограждающей конструкции в целом. Таким образом, при наличии в качестве первого элемента конструкции горючей плиты OSB главный вклад в огнестойкость конструктивной системы I (82 %) вносит теплоизолирующий слой. Наименьший вклад – последний элемент ограждающей конструкции.

Во II и III системах 4-х слойных ограждающих ЛДКрК в качестве теплоизоляции использовали полимерный пенокомпозит «PENOCOM» такой же толщины 100 мм, как и в I первой системе. Однако в качестве первого облицовочного слоя дополнительно использовали горючую сосновую древесину (имитацию бруса), а в III системе – для сравнения два слоя негорючих гипсокартонных листов. Каркас был выполнен из древесины сосны. Стойки деревянного каркаса второй системы были изготовлены из одинарных брусков толщиной 0,025 м. В III изготовлены из двух брусков толщиной 0,025 м, скрепленных по высоте стойки четырьмя металлическими саморезами на равном расстоянии друг от друга. Таким образом, в III

конструкции с негорючими ГКЛ облицовками для увеличения сечения стоек используются металлические элементы узлов соединения.

На рисунке 5.1.3 приведены результаты измерений легкой ограждающей конструкции II. Так как на обеих стойках динамика изменения температуры была практически одинаковой, на рисунке 5.1.3 показано изменение температуры только на одной из них.

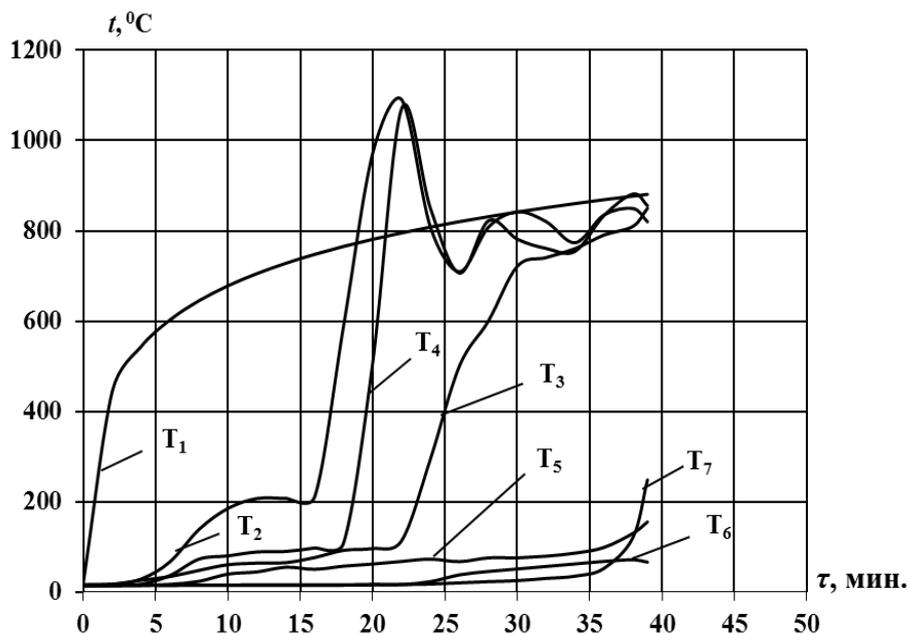


Рисунок 5.1.3 - Динамика изменения температуры в контрольных точках образца № 2 при стандартном режиме пожара (T_1): T_2 – на тыльной стороне отделочного материала «имитация бруса»; T_3 – на тыльной стороне плиты OSB; T_4, T_5 – температура в центре стойки со стороны огневой экспозиции и на необогреваемой поверхности; T_6 – на тыльной стороне «PENOCOM» теплоизоляции; T_7 – на необогреваемой стороне конструкции

Анализ результатов температурных измерений дает возможность оценить фактический предел огнестойкости ограждающей деревянной конструкции системы II, равный 38,5 мин, со следующими вкладами её элементов:

$$P_{\phi} = 38,5 \text{ мин} = \sum \tau_i = (17)_{\text{брус}} + (6)_{\text{OSB}} + (15,5)_{\text{PC+OSB}} = 38,5 \text{ мин.}$$

Здесь предел огнестойкости конструкции определен по принятому критерию – температуре 180 °C на необогреваемой поверхности последнего слоя – OSB облицовки.

Однако следует отметить некоторые особенности поведения исследуемой системы конструкции при стандартном режиме пожара. Прежде всего, за весь период 38,5 минут испытания температура на тыльной поверхности «PENOCOM» теплоизоляции не поднялась выше 66 °С. Поэтому повышение температуры на необогреваемой стороне конструкции нельзя объяснить передачей тепла к последнему элементу – плите OSB только через «PENOCOM» теплоизоляцию. Первая облицовочная сосновая доска к 17 минуте потеряла свою огнезащитную способность и начала полностью сгорать. В результате дополнительного выделения теплоты температура на её поверхности достигла почти 1100 °С. Можно полагать, что сосновая облицовка разрушилась к моменту начала обугливания плиты OSB под нею. Огнезащитная способность OSB горючей облицовки не превышает 6 мин, после чего она сгорает. Начало обугливания деревянных стоек отмечено на 19 мин испытания (T_4), но к окончанию опыта внешние поверхности стоек и облицовочная плита сохранили свою целостность (T_5).

Результаты испытания фрагментов конструкции системы III позволяют сделать вывод, что и в этом случае огнезащитная и теплоизолирующая способность «PENOCOM» материала полностью не реализованы из-за наличия другого канала теплопередачи. По-видимому, его проявление связано с небольшой толщиной деревянных стоек и неблагоприятным соотношением толщины стоек и размера саморезов – металлических узлов соединения [17]. В результате обугливания стоек на границе с теплоизоляцией могли возникнуть зазоры, которые привели к снижению фактического предела огнестойкости ограждающей конструкции.

На рисунке 5.1.4 показана динамика изменения температуры в огневой печи и контрольных точках на поверхности ограждающей конструкции и её элементов исследуемой системы III. Предел огнестойкости ограждающей деревянной конструкции определяли по времени от начала испытания.

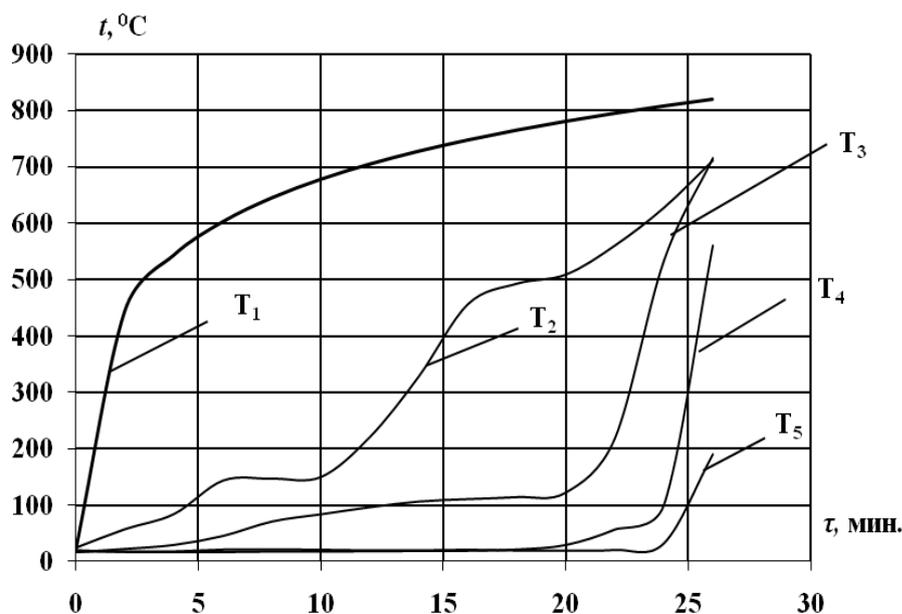


Рисунок 5.1.4 - Динамика изменения температуры в печи и центре поверхности ограждающей конструкции III и её элементов: T_1 – температура в печи; T_2 – на тыльной стороне ГКЛ №1; T_3 – на тыльной стороне ГКЛ №2; T_4 – на тыльной стороне «PENOCOM» изоляции; T_5 – на необогреваемой поверхности конструкции

На основании указанных выше температурных критериев теплоизолирующей способности элементов и ограждающей конструкции в целом фактический предел огнестойкости системы равен $\Pi_{\phi} = 26$ мин. Вклад в огнестойкость ограждающей конструкции её элементов соответственно оценивается как:

$$\Pi_{\phi} = \sum \tau_i = (13)_{\text{ГКЛ}\text{№}1} + (9,5)_{\text{ГКЛ}\text{№}2} + (2,5)_{\text{РС}} + (1)_{\text{OSB}} = 26 \text{ мин.}$$

Относительно небольшой вклад «PENOCOM» теплоизоляции указывает на то, что её теплозащитная способность не реализуется в полной мере. Слой теплоизоляции сохраняет свою форму, за период испытания не наблюдается обугливание по всей его толщине. Можно сделать вывод, что основная теплопередача в изучаемой ограждающей конструкции за гипсокартонными плитами происходит в направлении деревянных стоек по зазорам между брусками. При визуальном осмотре образцов видны зазоры порядка 1-1,5 мм, которые образованы из-за некачественной подгонки поверхности брусков и их скрепления. Металлические узлы соединения приводят к локальному прогреву и увеличивают тепловой поток в

этом направлении, что существенно снижает предел огнестойкости конструкции. После окончания испытания отмечено обугливание плит OSB со стороны стоек, что подтверждает влияние канала теплопередачи через зазоры. В последующих испытаниях использованы конструкции с цельными стойками из досок толщиной 50 мм.

Представляло интерес выяснить влияние на огнестойкость ограждающих деревянных конструкций негорючих облицовочных слоев с более высокими пожарно-техническими свойствами, а именно стекломагнезитовых листов (СМЛ).

В системе IV ограждающие ЛДКрК включали слой СМЛ, теплоизоляцию Rockwool Scandic Light и плиту OSB. В таблице приведены данные о составляющих элементах конструкции (Таблица 5.1.2).

Таблица 5.1.2 – Характеристика элементов ограждающей конструкции IV

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м ³
Система IV			
СМЛ №1	0,37×0,3×0,01	0,884	796
Утеплитель «Rockwool scandic»	0,255×0,3×0,15	0,402	35
OSB	0,37×0,3×0,009	0,62	620
Каркас: ель (0,05)	0,3×0,15×0,05	0,79	351

Вводные данные для расчета предела огнестойкости СМЛ элемента ограждающей конструкции отсутствуют. Поэтому фактический предел огнестойкости конструкции IV системы в целом и вклады отдельных элементов в него определены экспериментально по температурным измерениям (Рисунок 5.5).

На рисунке 5.1.5 обозначены номера температурных измерений в окружающей среде печи, а также на поверхности элементов конструкций, подвергаемых нагреву и с обратной их стороны.

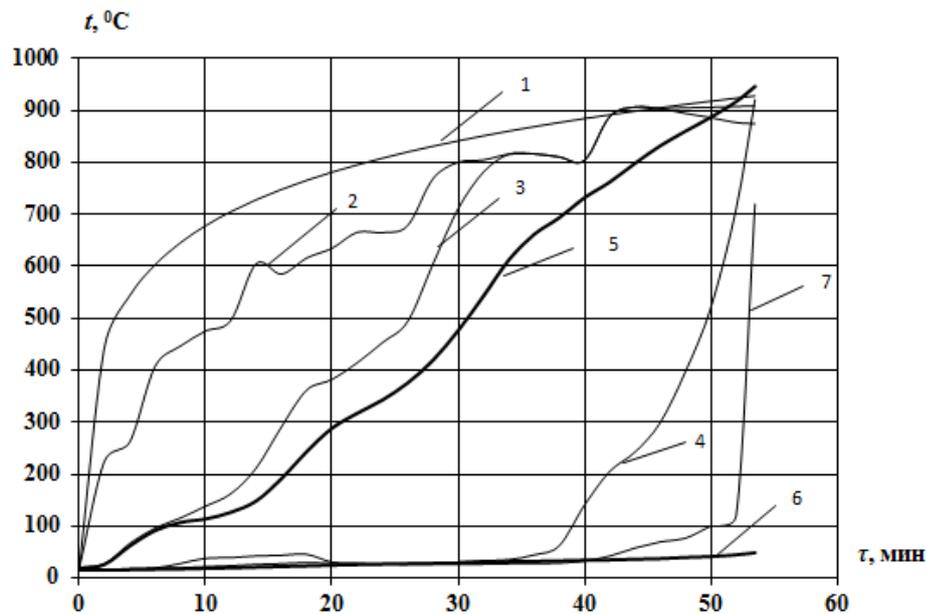


Рисунок 5.1.5 - Динамика изменения температуры в печи и центре поверхности ограждающей конструкции IV её элементов: 1 - температура в печи; 2 – температура на поверхности СМЛ; 3 – температура на тыльной поверхности СМЛ; 4 – температура на обогреваемой поверхности OSB; 5 – температура на поверхности стойки; 6 - температура на необогреваемой поверхности стойки 7 – температура на тыльной поверхности OSB

По температурным измерениям фактический предел огнестойкости этой ограждающей конструкции составил 52 мин. Вклады отдельных элементов конструкции в общий фактический предел её огнестойкости (считая от начала испытания) составляют соответственно:

$$\Pi_{\phi} = \sum \tau_i = (15)_{\text{СМЛ}} + (30)_{\text{R-Wool}} + (7)_{\text{OSB}} = 52 \text{ мин.}$$

Полученные результаты показывают важное влияние на теплопередачу и прогрев ограждающей конструкции теплофизических свойств первого элемента и особенно теплоизолирующего слоя. Следует отметить, что наличие негорючего, неразрушающегося при огневом воздействии стекломгнезитового элемента существенно повышает общий предел огнестойкости ограждающей конструкции, защищает стойку деревянного каркаса от обугливания. Стойка сохраняет свою целостность свыше 52 мин (Рисунок 5.5, кривая 7). Таким образом, специфика комбинации разных элементов и их материальных характеристик в ограждающей каркасной деревянной конструкции определяют предел её огнестойкости.

Представляло интерес в этом плане сравнить пределы огнестойкости исследуемых ограждающих каркасных деревянных конструкций с литературными данными об огнестойкости конструкции, близкой по комбинации сочетания негорючих материалов и OSB плиты.

Так, по результатам крупномасштабных стандартных испытаний деревянная каркасная конструкция, включающая колонны сечением 140×38 мм из хвойной древесины С16 сорта, лист гипсовой штукатурки толщиной 12,5 мм, стекловолоконистую теплоизоляцию с толщиной 140 мм и теплопроводностью 0,035 Вт/м×К, 11 мм плиту OSB, по признакам EI показала предел огнестойкости 31 мин. Учитывая, что стекловолоконистая теплоизоляция уступает по формоустойчивости базальтовой теплоизоляции Rockwool Light Scandic, понятен более низкий предел огнестойкости полученный в работе [32].

В системах ограждающих деревянных конструкций с V по VII использовали полимерную теплоизоляцию «PENOCOM» одинаковой толщины, но с разной плотностью: 43,7; 83 и 140 кг/м³. V и VI конструкции были 4-х слойными, включали по 2 облицовочных слоя СМЛ со стороны огневого воздействия и OSB плиту на необогреваемой стороне. VII система ограждающей ЛДКрК была трехслойной, отличалась от предыдущих систем наличием СМЛ облицовок, как с обогреваемой, так и необогреваемой стороны. Результаты огневых испытаний по стандартному режиму пожара всех исследуемых конструкций обобщены в таблице 5.1.3.

Таблица 5.1.3 – Огнестойкость ограждающих ЛДКрК различных систем

№ системы	№ слоя	Элементы конструкции ($\delta = \text{м}; \rho = \text{кг/м}^3$)	$P_{\phi} = \sum \tau_i$ мин.	Вклад в огнестойкость, (мин)			
				τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
1	2	3	4	5	6	7	8
I	1	OSB (0,009)	42,1	6,7	34,7	0,7	-
	2	R-wool (0,01; $\rho = 0,036$)					
	3	OSB (0,009)					
	-	Каркас: сосна (0,025; $\rho = 464$)					

1	2	3	4	5	6	7	8
II	1	Имитация бруса (0,02)	38,5	17	6	12,5	3
	2	OSB (0,009)					
	3	«PENOCOM» (0,01; $\rho = 90$)					
	4	OSB (0,009)					
	-	Каркас: сосна (0,025; $\rho = 400$)					
III	1	ГКЛ (0,009)	26	13	9,5	2,5	1
	2	ГКЛ (0,009)					
	3	«PENOCOM» (0,01; $\rho = 43,7$)					
	4	OSB (0,009)					
	-	Каркас: сосна (2×0,025; $\rho = 464$)					
IV	1	СМЛ (0,01)	52	15	30	7	-
	2	R-wool (0,015; $\rho = 0,036$)					
	3	OSB (0,009)					
	-	Каркас: ель (0,05; $\rho = 464$)					
V	1	СМЛ (0,006)	97,2	21,6	4	70,7	0,9
	2	СМЛ (0,006)					
	3	«PENOCOM» (0,15; $\rho = 83$)					
	4	OSB (0,009)					
	-	Каркас: сосна (0,05; $\rho = 497$)					
VI	1	СМЛ (0,006)	110,3	15,9	12,1	82	0,3
	2	СМЛ (0,01)					
	3	«PENOCOM» (0,15; $\rho = 43,7$)					
	4	OSB (0,009)					
	-	Каркас: ель (0,05; $\rho = 411$)					
VII	1	СМЛ (0,006)	95	13	75	7	-
	2	«PENOCOM» (0,15; $\rho = 140$)					
	3	СМЛ (0,006)					
	-	Каркас: сосна (0,05; $\rho = 497$)					

На рисунках 5.1.6, 5.1.7 и 5.1.8 показаны послойно температурные кривые соответствующих реперных точек. Сравнение огнестойкости двух 4-х слойных ограждающих деревянных каркасных конструкций с полимерной теплоизоляцией

(системы V и VI) и одной 3-х слойной (системы VII) приводит к следующим выводам.

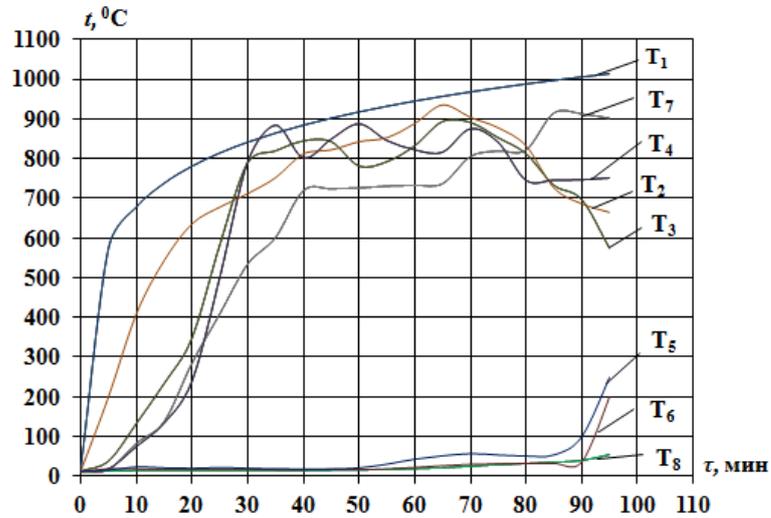


Рисунок 5.1.6 - Динамика изменения температуры в огневой печи (T_1) и контрольных точках на поверхности элементов конструкции системы V: T_2 и T_3 – на обогреваемой и тыльной стороне СМЛ1; T_4 – на тыльной стороне СМЛ 2 (обогреваемая сторона теплоизоляции «PENOCOM»); T_5 – на тыльной стороне «PENOCOM» (обогреваемая сторона OSB); T_6 – на необогреваемой стороне конструкции; T_7 – на обогреваемой стороне стойки; T_8 – на необогреваемой стороне стойки

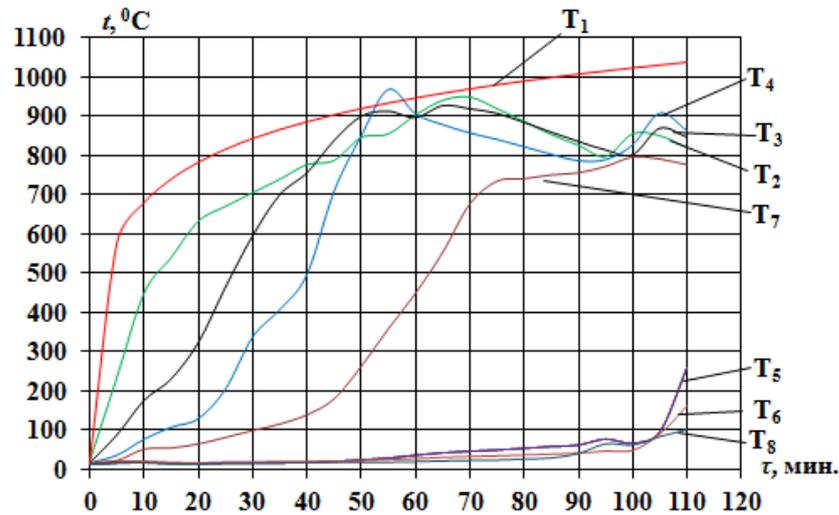


Рисунок 5.1.7 - Динамика нарастания температуры в огневой печи (T_1) и на поверхности элементов конструкции системы VI: T_2 - обогреваемой стороне СМЛ 1; T_3 – на тыльной стороне СМЛ1 (обогреваемая сторона СМЛ 2); T_4 – на поверхности теплоизоляции (тыльной стороне СМЛ 2); T_5 – на тыльной стороне теплоизоляции «PENOCOM» (нагреваемой поверхности OSB); T_6 – на необогреваемой стороне OSB; T_7 - на обогреваемой стороне стойки; T_8 - на внешней поверхности стойки

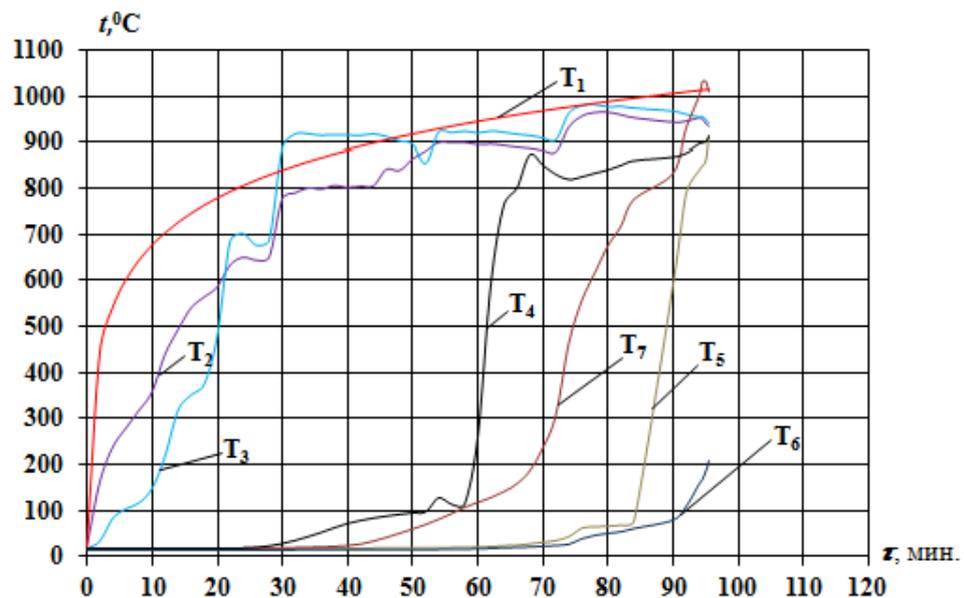


Рисунок 5.1.8 - Динамика прогрева элементов ограждающей деревянной конструкции системы VII при стандартном режиме пожара (T_1): T_2 и T_3 – температура на обогреваемой и тыльной поверхности СМЛ1 (обогреваемая сторона теплоизоляции «PENOCOM»); T_4 – температура внутри утеплителя «PENOCOM» на расстоянии 75 мм; T_5 – на необогреваемой стороне «PENOCOM»; T_6 - на необогреваемой стороне СМЛ2; T_7 – температура на поверхности стойки со стороны утеплителя

Фактический предел огнестойкости образца ограждающей конструктивной системы V (Рисунок 5.1.6) равен $P_{\phi} = 97,2$ мин. По аддитивному методу он включает следующие вклады элементов ограждающей конструкции:

$$P_{\phi} = \sum \tau_i = (21,6)_{\text{СМЛ1}} + (4)_{\text{СМЛ2}} + (70,7)_{\text{РС}} + (0,9)_{\text{OSB}} = 97,2 \text{ мин.}$$

Таким образом, вклад двух негорючих облицовок СМЛ в теплоизолирующую способность рассматриваемой ограждающей деревянной каркасной конструкции составляет 26,3 %, а теплоизоляции из полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» – 72,7 %. На тыльной стороне теплоизоляции температура $270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается только через 96,3 мин после начала испытания. Плита OSB мало влияет на общую огнестойкость конструкции по признаку теплоизолирующей способности. До окончания испытания она полностью сохраняла свою целостность. Относительно небольшое участие облицовочных плит на необогреваемой стороне конструкции

согласуется с наблюдениями, представленными в рекомендациях по проектированию несущих ограждающих ЛДКрК [18].

В четырехслойной ограждающей конструкции системы VI использована теплоизоляция почти вдвое меньшей плотности (Рисунок 5.1.7). Фактический предел огнестойкости этой ограждающей конструкции достигает 110,3 мин. По аддитивному методу он представляет сумму вкладов отдельных элементов конструкции:

$$P_{\phi} = \sum \tau_i = (15,9)_{\text{СМЛ1}} + (12,1)_{\text{СМЛ2}} + (82)_{\text{РС}} + (0,3)_{\text{OSB}} = 110,3 \text{ мин.}$$

В данном случае вклад двух слоев СМЛ в предел огнестойкости конструкции возрастает и составляет 25,3 %, а пенокомпозита «PENOCOM» – 74,3 %. Как и прежде, вклад облицовочной плиты OSB в огнестойкость используемой ограждающей деревянной каркасной системы невелик. Облицовочная плита OSB за весь период испытания оставалась целой. Температура 270 °C на поверхности ТИМ со стороны огневого воздействия достигалась лишь на 51-ой минуте, с необогреваемой стороны была ниже 100 °C к концу испытания. Сравнение температурных измерений этих четырехслойных конструкций показывает явную тенденцию к увеличению положительного влияния на предел огнестойкости теплоизоляции с низкой плотностью. Её вклад возрастает, несмотря даже на увеличение толщины СМЛ и системы в целом. Применение двух слоев негорючих, неразрушающихся облицовочных плит СМЛ, увеличение их толщины приводит к увеличению фактического предела огнестойкости ограждающих деревянных конструкций. При этом можно заметить, что чем меньше вклад облицовочных слоев конструкций со стороны огневого воздействия в общий предел огнестойкости, тем более значимую роль играет в огнезащите ТИМ. Этот вывод согласуется с результатом испытания образца трехслойных конструкций с полимерной теплоизоляцией «PENOCOM» системы VII.

На рисунке 5.1.8 представлена динамика прогрева элементов системы VII деревянной каркасной конструкции при стандартном режиме пожара. Фактический предел огнестойкости этой ограждающей деревянной конструкции равен 95 мин и включает следующие вклады её элементов:

$$P_{\phi} = \sum \tau_i = (13)_{\text{СМЛ1}} + (75)_{\text{РС}} + (7)_{\text{СМЛ2}} = 95 \text{ мин.}$$

Действительно, уменьшение толщины и эффективности первого слоя огнезащиты конструкции приводит к увеличению роли теплоизоляции, а также негорючей облицовки на необогреваемой стороне конструкции по сравнению с OSB. Обугливание деревянной стойки со стороны утеплителя начинается на 71 минуте. К концу испытания, судя по фотографии стойки, толщина обугленного слоя со стороны теплоизоляции равна ~15 мм. В среднем скорость обугливания стойки в этих условиях составляет: $15 \text{ мм} / (95 - 71) \text{ мин} = 0,62 \text{ мм/мин}$, т.е. меньше, чем при прямом воздействии огня на древесину сосны (0,8 мм/мин).

Если учесть изменение средней плотности теплового потока в огневой камере при стандартном режиме пожара, то можно сделать вывод, что исследуемые образцы ограждающих ЛДКрК с пределом огнестойкости 95 – 110 мин., к концу испытания подвергаются действию теплового потока выше 100 кВт/м^2 . Такие потоки характерны для развитой стадии пожара.

Сравнение фактических пределов огнестойкости ограждающих деревянных конструкций с базальтоволокнутой и полимерной теплоизоляцией «PENOCOM» (система IV – VII) подтверждает перспективность применения пенокомпозиата «PENOCOM» в строительстве деревянных каркасных зданий и сооружений. Высокая огне- и теплозащитная эффективность конструкций с трудногорючей полимерной теплоизоляцией «PENOCOM» несомненно, обусловлена ее формоустойчивостью при повышенных температурах и образованием пенококса с низким коэффициентом теплопроводности.

5.2. Теплофизические и теплозащитные свойства ограждающих ЛДКрК и составляющих ее элементов

Для понимания поведения строительных конструкций при пожаре и обеспечения возможности прогнозирования их поведения и проектирования с учетом

нормативных требований необходимо знание основных свойств материалов всех элементов конструкций.

В настоящей диссертационной работе акцент сделан на применение современного облицовочного материала и инновационного ТИМ, а именно СМЛ и полимерного пенокомпозита «PENOCOM». Теплофизические и теплозащитные свойства этих материалов при тепловом воздействии в широком температурном диапазоне неизвестны.

Поэтому сделана попытка оценить, прежде всего, теплопроводность этих материалов, используя результаты температурных измерений ограждающих деревянных каркасных конструкций при стандартном режиме пожара. Измерение температуры на поверхности элементов конструкции позволяет определить плотность тепловых потоков, поступающих на поверхность элементов и оценить коэффициент теплопроводности используемых материалов.

Для определения коэффициентов теплопроводности СМЛ и полимерного пенокомпозита использованы температурные измерения в контрольных точках ограждающей конструкции системы VII (Рисунок 5.1.7).

Оценка коэффициентов теплопроводности СМЛ проведена в предположении квазистационарности теплового режима газовой среды в огневой печи маломасштабной установки в начальной стадии развития стандартного режима пожара. Это означает, что теплообмен СМЛ происходит с газовой средой, температура которой изменяется во времени по линейному закону, т.е. с постоянной скоростью подъема температуры [71].

В качестве примера приведен расчет плотности теплового потока и коэффициентов теплопроводности СМЛ.

Тепловой поток от газовой среды пожара к поверхности СМЛ конструкции переносится конвекцией и излучением:

$$q_{\Sigma}'' = q''_{\text{конв}} + q''_{\text{л}} = \alpha (T_{\text{печи}} - T_{\text{w1}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{печи}}^4 - T_{\text{w1}}^4), \text{ Вт/м}^2 \quad (5.2.1)$$

Здесь α - коэффициент теплоотдачи принят равным $15 \text{ Вт/м}^2 \times \text{К}$; $T_{\text{печи}}$ и T_{w1} , К – температура газовой среды в огневой печи и на обогреваемой поверхности

СМЛ (соответствует T_2); $\varepsilon = 0,6$ – степень черноты среды для $Bu \leq 1$; $\sigma = 5,669 \times 10^{-8}$ Вт/м²×К – константа Стефана-Больцмана.

По значениям суммарного теплового потока на обогреваемую поверхность СМЛ, установленным для определенного момента времени стандартного пожара, рассчитываем коэффициент теплопроводности СМЛ ($\delta = 0,006$ м; $\rho = 1057$ кг/м³):

$$\lambda_{\text{СМЛ1}} = q_{\Sigma}'' \delta / (T_{w1} - T_{w2}), \text{ Вт/м} \times \text{К} \quad (5.2.2)$$

Например, при $\tau = 2$ мин и $T_{\text{cp}} = (T_{w1} + T_{w2}) / 2 = 161 + 35 / 2 = 98$ °С - средней температуре между температурой на обогреваемой и необогреваемой поверхностях СМЛ, коэффициент теплопроводности СМЛ будет равен:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Sigma 2} &= [15(677 - 434) + 0,6 \times 5,669 \times 10^{-8} (677^4 - 434^4)] \times 0,006 / (434 - 308) = \\ &= [3585 + (6977,8 - 1206,7)] \times 0,006 / 126 = 56,5 / 126 = 0,456 \text{ Вт/м} \times \text{К}. \end{aligned}$$

В таблице 5.2.1 приведены значения коэффициента теплопроводности СМЛ, рассчитанные аналогичным образом при повышении температуры в процессе развития стандартного пожара. Далее пиролиз и обугливание теплоизоляции влияют на T_{w2} .

Таблица 5.2.1 – Температурная зависимость коэффициента теплопроводности СМЛ при стандартном режиме пожара

τ , мин	0	2	4	6	8	16	18	20
T_{cp} , °С	20	98	161	192	218	446	470	530
λ_{Σ} , Вт/м·К	0,14 – 0,32 [72,73,74]	0,456	0,521	0,472	0,486	0,647	0,609	1,09

Уменьшение рассчитанного значения коэффициента теплопроводности СМЛ после 4-х минутного развития пожара обусловлено замедлением скорости подъема температуры на этом этапе.

Для оценки теплопроводности теплоизоляции «PENOCOM» с плотностью 140 кг/м^3 использовано уравнение нестационарной теплопроводности и краевые условия на обогреваемой и необогреваемой стороне этого элемента конструкции при толщине $0,075 \text{ м}$. Приняты следующие допущения:

1. На границе между элементами конструкции (слоем СМЛ1 и поверхностью теплоизоляции) имеется идеальный контакт, соблюдается условие равенства температур $T_{3(x-0)}(\tau) = T_{3(x+0)}(\tau)$.

2. До температуры начала разложения в пенокомпозите не происходят физико-химические превращения, форма и объем этого элемента конструкции практически не изменяются. Пенокомпозит рассматривается как пористый материал с неразлагающимся каркасом.

3. Теплопроводность и излучение играют преобладающую роль в переносе тепла в слое теплоизоляции.

Расчет коэффициентов теплопроводности пенокомпозита «PENOCOM» проведен за период стандартного пожара $6 - 12$ мин включительно, когда на поверхности теплоизоляции температура достигает $220 \text{ }^\circ\text{C}$ и далее возможна её трансформация.

Уравнение нестационарной теплопроводности в рассматриваемом слое элемента конструкции с учетом вектора потока можно представить в виде:

$$c' \rho' (1-\varphi) \frac{\partial T}{\partial \tau} = - \operatorname{div} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \operatorname{div} q_R, \quad (5.2.3)$$

где c' и ρ' – удельная теплоемкость и плотность каркаса полимерного пенокомпозита; φ - пористость материала: $\rho' (1-\varphi) = \rho_o = 140 \text{ кг/м}^3$; q_R'' – лучистый тепловой поток: $q_R'' = \varepsilon \sigma (T_3^4 - T_4^4)$.

Удельная теплоёмкость пенокомпозита практически не зависит от его плотности и соответствует теплоемкости каркаса: $c = c' = 1600 \text{ Дж/кг} \times \text{К}$. Преобразуя приведенное выше уравнение, получим:

$$\lambda \frac{\Delta T}{\delta} = q_R'' - c \rho_o \delta (T_3 - T_4) / \Delta \tau = q'', \quad (5.2.4)$$

откуда $\lambda = q'' \delta / \Delta T$.

При средней температуре слоя теплоизоляции $T_{cp} = (106 + 19)/2 = 62,5$ °С коэффициент теплопроводности пенокомпозита равен $\lambda^{62,5} = 0,0417$ Вт/м К. Это значение согласуется со значениями, полученными стандартным методом определения теплопроводности пенокомпозита «PENOCOM» при 20 – 50 °С [46].

При увеличении средней температуры рассматриваемого слоя теплоизоляции «PENOCOM» в условиях стандартного пожара её коэффициент теплопроводности растет следующим образом: $\lambda^{69} = 0,0675$; $\lambda^{84,5} = 0,1319$; $\lambda^{119} = 0,3075$ Вт/м×К.

После пиролиза полимерного пенокомпозита «PENOCOM» в интервале 270 – 470 °С ТИМ преобразуется в пенококс. Коэффициент теплопроводности пенококса можно оценить, используя формулу Дульнева [71]:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda' (1 - \varphi)^{1,5} + \lambda'' \varphi^{0,25}, \quad (5.2.5)$$

где, λ' – коэффициент теплопроводности углеродного каркаса; λ'' – коэффициент теплопроводности газа (воздуха) в порах; φ – пористость ТИМ.

Если принять λ' аморфного углерода (типа сажи) = 0,067 Вт/мК и пористость пенококса 0,90 – 0,95, то коэффициент теплопроводности пенококса при комнатной температуре будет в пределах 0,025 – 0,030 Вт/мК. Литературные данные о коэффициенте теплопроводности пенококсов из разных субстанций ограничены. В предельном случае терморасширенного графита с коэффициентом вспучивания 200 – 400, $\lambda = 0,030$ Вт/мК. В работе [75] пенококс из древесины сосны при комнатной температуре имел $\lambda = 0,045$ Вт/мК, при 100 °С $\lambda = 0,058$ Вт/мК, а в интервале 200 – 1000 °С $\lambda = 0,070$ Вт/мК.

В работе [76] используется показатель коэффициента теплопроводности древесного кокса с объемной плотностью 200 кг/м³ - $\lambda = 0,030$ Вт/мК. Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности пенококса из древесины сосны $\lambda = 0,0687$ Вт/мК, $C_p = 1$ Дж/г×К получены в работе [77].

Коэффициент теплопроводности пенококса, образующегося при горении вспучивающегося покрытия на основе полипропилена и фосфорсодержащих добавок, имел значение $\lambda = 0,045$ Вт/мК [78,79].

Влияние температуры на изменение коэффициента теплопроводности пенококса из полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» можно определить по формуле:

$$\lambda(T) = \lambda_{\text{ПК}}^{20} \left(\frac{T+273}{293} \right), \text{ Вт/мК} \quad (5.2.6)$$

На рисунке 5.2.1 показана зависимость теплопроводности от температуры для пенококса с пористостью $\varphi = 0,95$. Эта зависимость представлена следующим уравнением:

$$\lambda = 0,0301 + 0,102 \times 10^{-3} (T - 273) \quad (5.2.7)$$

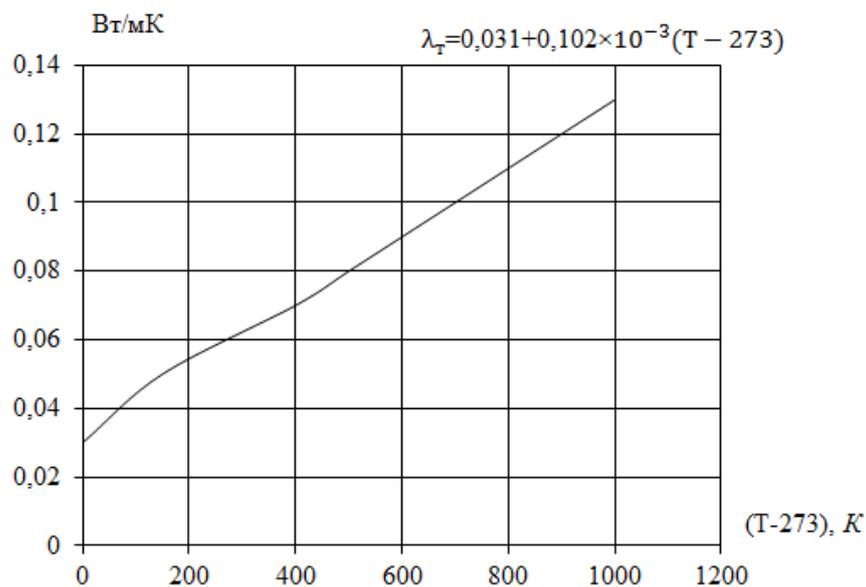


Рисунок 5.2.1 – График зависимости теплопроводности от температуры для пенококса «PENOCOM» с пористостью $\varphi = 0,95$

Согласно Своду Правил СП.50.13330.2012 (введены в действие 2013.07.01), о тепловой защите зданий, с целью повышения уровня безопасности людей в зданиях и сооружениях, а также гармонизацией нормативных требований с международными документами важным параметром является приведенное сопротивление теплопередаче R_0^{np} , которое характеризует усредненную по площади плотность теплового потока через фрагмент теплозащитной оболочки здания. Численно равно отношению разности температур по разные стороны фрагмента к усредненной по площади плотности теплового потока через фрагмент.

Приведенное термическое сопротивление ограждающих конструкций и составляющих элементов может быть рассчитано с учетом толщины и коэффициента теплопроводности каждого слоя:

$$R_t^{np} = \delta_{\text{слоя}} / \lambda_{\text{слоя}}; \quad (5.2.8)$$

$$R_{\text{констр.}}^{np} = \sum R_i^{np}, \text{ м}^2 \times \text{°C/Вт} \quad (5.2.9)$$

Изменение коэффициентов теплопроводности элементов конструкций в зависимости от температуры объясняет в определенной степени причину различия в пределах огнестойкости исследуемых ограждающих деревянных конструкций. Воспользуемся результатами настоящей работы и температурными зависимостями λ разных материалов указанных в Eurocode 5 и рекомендациях по проектированию ограждающих деревянных каркасных конструкций [63].

При комнатной температуре приведенное термическое сопротивление ограждающей деревянной каркасной конструкции системы VII: СМЛ ($\delta = 0,006 \text{ м}$) - PENOCOM ($\delta = 0,15 \text{ м}$) - СМЛ ($\delta = 0,006 \text{ м}$); $P_{\phi} = 95 \text{ мин}$.

При 20 °C приведенное термическое сопротивление конструкции:

$$R_{20}^{np} = \sum R_{20i}^{np} = \delta_{\text{СМЛ}} / \lambda_{\text{СМЛ}} + \delta_{\text{РС}} / \lambda_{\text{РС}} + \delta_{\text{СМЛ}} / \lambda_{\text{СМЛ}} = 0,006 / 0,26 + 0,15 / 0,039 + 0,006 / 0,26 = 2 \times 0,0230 + 3,846 = 3,892 \text{ м}^2 \times \text{°C/Вт}$$

При 470 °C после образования пенококка ТИМ,

$$R_{470}^{np} = \sum R_{470i}^{np} = \delta_{\text{СМЛ}} / \lambda_{\text{СМЛ}}^{470} + \delta_{\text{РС}} / \lambda_{\text{РС}}^{470} + \delta_{\text{СМЛ}} / \lambda_{\text{СМЛ}}^{470} = 0,006 / 0,609 + 0,15 / 0,070 + 0,006 / 0,609 = 0,0098 + 2,14 + 0,0098 = 2,16 \text{ м}^2 \times \text{°C/Вт},$$

Приведенное термическое сопротивление при повышении температуры уменьшается в 1,8 раз.

$$R_{20} / R_{470} = 3,892 / 2,16 = 1,8 \text{ раз}$$

Расчет конструкции аналогичной системы VII: СМЛ ($\delta = 0,006 \text{ м}$) – базальт «Rockwool Scandic Light» ($\delta = 0,15 \text{ м}$) - СМЛ ($\delta = 0,006 \text{ м}$); приводит к следующим значениям.

При 20 °C приведенное термическое сопротивление конструкции:

$$R_{20}^{np} = 0,006 / 0,26 + 0,15 / 0,035 + 0,006 / 0,26 = 4,33 \text{ м}^2 \times \text{°C/Вт}$$

При 470 °C ,

$$R_{470}^{np} = 0,006/0,609 + 0,15/0,111 + 0,006/0,609 = 2 \times 0,0098 + 1,35 = 1,37 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт},$$

$$R_{20}/R_{470} = 4,33 / 1,37 = 3,16 \text{ раз.}$$

Следовательно при повышении температуры до 470 °С приведенное термическое сопротивление этой конструкции с Rockwool уменьшается в 3,16 раз.

Ограждающая конструкция системы IV: СМЛ ($\delta = 0,01$ м) – базальт «Rockwool Scandic Light» ($\delta = 0,15$ м) - OSB ($\delta = 0,009$ м); $P_{\phi} = 52$ мин, дает следующее значение приведенного термического сопротивления.

При 20 °С приведенное термическое сопротивление конструкции IV:

$$R_{20}^{np} = 0,01 / 0,26 + 0,15 / 0,035 + 0,009/0,12 = 4,398 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}$$

При 470 °С,

$$R_{470}^{np} = 0,01 / 0,609 + 0,15 / 0,111 + 0,009/0,48 = 1,386 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт},$$

$$R_{20}/R_{470} = 4,398 / 1,386 = 3,17 \text{ раз.}$$

Следовательно при повышении температуры до 470 °С приведенное термическое сопротивление этой конструкции примерно такое же, как и для предыдущей конструкции.

Наконец для ограждающей конструкции системы VI:

2СМЛ ($\delta = 0,006 + 0,01$ м) – PENOCOM ($\delta = 0,15$ м, $\rho = 49,7$ кг/м³) - OSB ($\delta = 0,009$ м); $P_{\phi} = 110,3$ мин, имеем:

При 20 °С приведенное термическое сопротивление конструкции VI:

$$R_{20}^{np} = 0,016 / 0,26 + 0,15 / 0,035 + 0,009/0,12 = 4,397 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}.$$

При 470 °С,

$$R_{470}^{np} = 0,006/0,609 + 0,01/0,609 + 0,15/0,070 + 0,009/0,48 = 2,185 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт},$$

$$\text{и } R_{20}/R_{470} = 4,397/2,185 = 2,01 \text{ раз.}$$

Сравним изменение приведенного термического сопротивления при повышении температуры с 20 до 470 °С разных ТИМ отечественного производства с толщиной 150 мм [41].

Базальтоволоконистые ТИМ (марки БЗМ): $\lambda = 0,040 + 0,30 \times 10^{-3}(T - 273)$;

$$\lambda_{20} = 0,040; \lambda_{470} = 0,181 \text{ Вт/мК.}$$

$$R_{20}^{np} = 0,15/0,04 = 3,75 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}.$$

При 470 °С,

$$R_{470}^{np} = 0,15/0,181 = 0,828 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}, \text{ таким образом приведенное термическое}$$

сопротивление уменьшается при повышении температуры в 4,53 раза.

$$R_{20}/R_{470} = 3,75/0,828 = 4,53 \text{ раз}.$$

Для марки АТМ: $\lambda = 0,036 + 0,13 \times 10^{-3}(T - 273)$

$$\lambda_{20} = 0,0386; \lambda_{470} = 0,097 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}.$$

$$R_{20}^{np} = 0,15/0,0386 = 3,89 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}.$$

При 470 °С,

$$R_{470}^{np} = 0,15/0,097 = 1,55 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}.$$

Таким образом, у указанного ТИМ в меньшей степени снижается приведенное термическое сопротивление при повышении температуры. Его положительный эффект увеличивается.

$$R_{20}/R_{470} = 3,89/1,55 = 2,51 \text{ раз}.$$

В случае стекловолнистого ТИМ (марки 75):

$$\lambda_{20} = 0,036; \lambda_{470} = 0,238 \text{ Вт}/\text{мК}.$$

$$R_{20}^{np} = 0,15/0,036 = 4,167 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}$$

При 470 °С,

$$R_{470}^{np} = 0,15/0,238 = 0,63 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт},$$

$$\text{Соответственно, } R_{20}/R_{470} = 4,167/0,63 = 6,61 \text{ раз}.$$

Можно заметить, что при повышении интенсивности теплового воздействия (470 °С) на термостойкие ТИМ на основе базальтовых волокон приведенное термическое сопротивление уменьшается в 2,51 – 4,76 раз, а у менее термостойкой стекловолнистой плиты в 6,6 раз. Эти изменения существенным образом отражаются на огнестойкости ограждающих конструкций в целом по теплоизолирующей способности.

Улучшение теплоизолирующих свойств ТИМ позволяет повысить эффективность, снизить толщину ТИМ в конструкциях. Среди полимерных ТИМ, обладающих самой низкой теплопроводностью и в настоящее время

производимых как за рубежом, так и в РФ, следует отметить жесткие пенополиизоциануратные (ПИР) материалы. Они обладают закрытой пористостью, характеризуется коэффициентом теплопроводности 0,022 Вт/мК. По результатам крупномасштабных испытаний при стандартном режиме пожара конструкции, включающие 11 мм OSB + 60 мм «PIR» пенопласт + 12,5 мм ГКЛ, обеспечивает предел огнестойкости 30 мин. В указанном случае был использован полиизоциануратный пенопласт, производимой английской фирмой Kingspan под маркой Thermawall TW55. При толщине 60 мм значения приведенного термического сопротивления этого материала $R_{20}^{пп} = 2,70$, при 100 мм $R_{20}^{пп} = 4,5$, а при 150 мм будет $R_{20}^{пп} = 0,15/0,022=6,82$. Однако пенополиизоциануратные ТИМ являются самыми дорогими материалами. При термическом разложении выделяют очень токсичные газы, в том числе цианистый водород и другие производные цианидов. Как изменяется их формоустойчивость, теплоизолирующие свойства при повышении температуры, механизм и макрокинетические параметры пиролиза и ТОД не известно. Разрешение этих вопросов требует дополнительного изучения. В этом плане, относительно дешевый, отечественный полимерный пенокомпозит «PENOCOM» имеет больше преимуществ по тепло, огнезащитной эффективности и экологической безопасности. Перспективность его применения в строительстве представляется несомненной.

ГЛАВА 6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ ЛЕГКИХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОЛИМЕРНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ

Мощным современным средством исследования состояния строительных конструкций в условиях самых разнообразных внешних воздействий является математическое моделирование. За последние два десятилетия были разработаны разные модели и программные комплексы расчета для предсказания огнестойкости деревянных легких каркасных конструкций с несущими и ограждающими функциями. В этих моделях в той или иной степени учитывались различные физико-химические и термомеханические явления, определяющие поведение деревянных конструкций при пожаре. Численный расчет разработанных моделей основан на решении дифференциальных уравнений теплопереноса с применением ряда упрощающих допущений [80]. Для расчета были созданы различные программные комплексы на базе метода конечных разностей (по явной или неявной схеме) или метода конечных элементов (МКЭ) [81-85]. Показаны возможности применения для расчета огнестойкости деревянных конструкций программных отечественных комплексов серии «Огнезащита» [40], которые были созданы для теплотехнических расчетов конструкций из стали и железобетона [41]. Широкую известность и популярность в мировом инженерном сообществе получила программная система американской компании ANSYS Inc., использующая МКЭ и многоцелевые расчетные комплексы для разных типов анализа реальных процессов в рассматриваемых материальных объектах.

Как уже ранее было отмечено при расчетах огнестойкости многослойных ЛДКрК можно использовать аддитивный метод с учетом свойств элементов, входящих в конструкции (Component Additive Method - CAM). Метод разработан

Национальным исследовательским комитетом Канады. По этому методу предел огнестойкости определяют как сумму временных вкладов каждого элемента системы (облицовочных слоев, каркаса, ТИМ, узлов соединения). При этом учитывают (с использованием соответствующих коэффициентов) взаимное расположение и типы элементов конструкции, в том числе узлы соединения. Численное моделирование огнестойкости несущих и ограждающих деревянных каркасных конструкций помогает сэкономить трудозатраты – и энергозатраты на проведение огневых испытаний строительных конструкций. Таким образом, можно осуществить рациональный, быстрый подбор элементов конструкций и оптимизацию их размеров (толщины).

Результаты мало- и крупномасштабных испытаний различных систем и элементов легких деревянных каркасных конструкций, подкрепленные анализом результатов математического моделирования, легли в основу стандарта EN 1995 – 1 – 2, Eurocode 5 и более поздней рекомендации [18] для проектирования деревянных каркасных сооружений с требуемым уровнем пожарной безопасности.

В этой главе диссертации представлена модель и результаты расчетов нестационарного прогрева ограждающих деревянных легких каркасных конструкций с облицовочными плитами и ТИМ нового поколения: стекломagneзитовыми плитами и полимерным пенокомпозитом «PENOCOM». Для теплотехнического расчета огнестойкости ограждающих конструкций использован программный комплекс «ANSYS Mechanical». Он позволяет решить спектр задач механики деформируемого твердого тела и теплообмена с учетом нелинейных свойств материалов, пластичности и контактного взаимодействия элементов конструкции. Представляло интерес сравнить результаты теплотехнического расчета огнестойкости ограждающих конструкций при использовании пенокомпозита «PENOCOM» и неорганической теплоизоляции Rockwool Light. Кроме того важно было сравнить результаты расчета с экспериментально полученными при испытании образцов в мало-масштабной печи по стандартному режиму пожара.

Для математического моделирования теплопередачи были выбраны ограждающие конструкции IV – VII системы. Типичная схема теплопередачи через ограждающую каркасную конструкцию показана на рисунке 6.1.

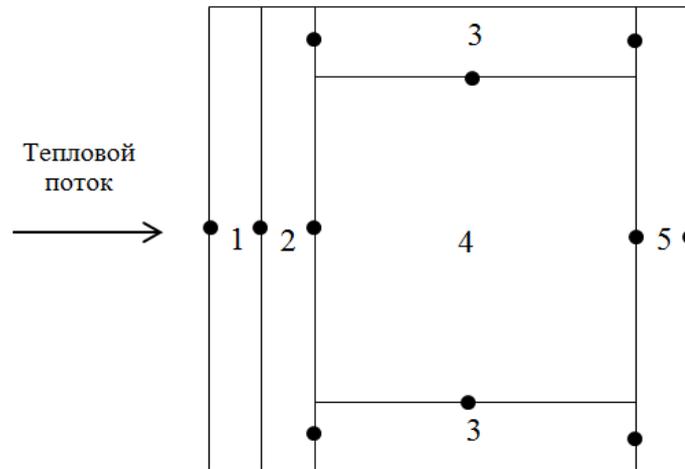


Рисунок 6.1 – Схема теплопередачи. 1,2 - облицовочные плиты со стороны огневого воздействия; 3 – деревянные стойки; 4 - теплоизоляция; 5 - облицовочная плита на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n (точки расчета прогрева)

В общем случае для учета обугливания деревянных элементов каркаса математически теплопередача в системе ограждающей конструкции должна быть представлена в двумерной постановке задачи:

$$C_p \rho (\partial T / \partial t) = \partial / \partial x (\lambda \partial T / \partial x) + \partial / \partial y (\lambda \partial T / \partial y) \pm Q \quad (6.1),$$

где C_p - удельная теплоемкость, ρ - плотность, T – температура, t – время, x , y – пространственные координаты, λ - теплопроводность, Q – изменение внутренней тепловой энергии, обусловленной протекающими в материале элемента конструкции физико-химическими процессами. Указанные показатели зависят от температуры. Начальные и граничные условия рассматриваются по каждому элементу конструкции.

Однако, для анализа теплопередачи в изучаемых нами ограждающих конструкциях с целью оценки их огнестойкости по признакам целостности и теплоизолирующей способности (EI) достаточно использовать

дифференциальные уравнения сохранения энергии и массы в системе в предположении переноса тепла и продуктов разложения в одном направлении.

Рассмотрим возможные физико-химические процессы, протекающие в отдельных элементах изучаемых ограждающих деревянных каркасных конструкциях. Первый слой СМЛ со стороны огневого воздействия является высоко термостойким. Можно полагать, что он не подвергается термическому разложению. В слое минеральной теплоизоляции могут протекать реакции дегидратации и процессы, влияющие на теплопередачу: испарение воды и конденсация, массоперенос пара и воды через пористый материал. Слой полимерной теплоизоляции при нагревании выше определенной температуры (T_{np}) претерпевает разложение с выделением газообразных летучих продуктов и образованием карбонизованного остатка. В этом случае можно рассматривать два варианта расчета теплопередачи через теплоизоляцию:

1. Твердая матрица мгновенно пиролизуется при достижении T_{np} вне зависимости от скорости нагрева. Образующийся кокс не влияет на транспорт продуктов разложения (принцип постоянства давления в к-фазе).

2. Пиролиз твердой матрицы является многостадийным с соответствующими кинетическими параметрами стадий. Выход продуктов пиролиза зависит от давления в пористой среде. Из-за усадки ТИМ разной природы (в результате плавления или «выгорания»), пространство между элементами конструкции и теплоизоляцией становится частично незаполненным, что сказывается на процессе теплопередачи. Усиление переноса тепла через этот слой за счет теплопроводности, конвекции и лучистой энергии должно в принципе снижать огнестойкость ограждающей конструкции в целом. Результирующий лучистый теплообмен в полости между поверхностями элементов конструкции зависит от угловых коэффициентов излучения [41].

В качестве контролирующего параметра обугливания органических элементов ограждающей конструкции (древесины, пенокомпозита “PENOCOM”, OSB) принята температура 270°C [18]. Максимальная температура 180°C на не обогре-

ваемой стороне конструкции использована как реперная точка потери её теплоизолирующей способности.

Уменьшение массы в результате термического разложения полимерного пенокомпозиата “PENOCOM” при сохранении его объема означает уменьшение плотности и изменение пористости ТИМ на этом этапе теплового воздействия. Последующая усадка ТИМ в результате пиролиза (выгорания) пенококса приводит к дальнейшему снижению его плотности и пористости. Текущую пористость пенокомпозиата с учетом степени превращения при разложении (α), количества образующегося коксового остатка (K) и усадки (γ) можно определить по формуле:

$$\varphi = 1 - \{ \rho_o' [1 - \alpha(1 - K)](1 - \varphi_o) \} / \rho'(1 - \gamma) \quad (6.2),$$

где φ_o и ρ_o' - начальные значения пористости и плотности каркаса пенокомпозиата. Так как начальная плотность пенокомпозиата равна $\rho_o = (1 - \varphi_o)\rho_o'$; текущая плотность пенокомпозиата соответствует уравнению:

$$\rho = (1 - \varphi)\rho' = \rho_o [1 - \alpha(1 - K) / (1 - \gamma)] \quad (6.3)$$

Математическая модель тепломассопереноса в ограждающих деревянных легких каркасных конструкциях с указанными выше элементами и полимерным ТИМ включает в себя следующие дифференциальные уравнения:

Уравнение сохранения энергии:

$$(1 - \varphi)\rho'c_p \partial T / \partial t = \partial / \partial x (\lambda \partial T / \partial x) + m''c_p'' \partial T / \partial x - L_v R \quad (6.4)$$

Уравнение массопереноса продуктов термического разложения ТИМ:

$$C_m \partial p / \partial t = \partial / \partial x (\lambda_m \partial p / \partial x) + \partial / \partial x (K_D \partial p / \partial x) + R \quad (6.5)$$

Начальные условия для уравнения сохранения энергии (4) для всех элементов конструкции и уравнения (5):

$$T|_{t=0} = T_0; p|_{t=0} = p_0 \quad (6.6)$$

Граничное условие на обогреваемой поверхности ограждающей конструкции:

$$-\lambda(\partial T / \partial x) = \alpha_f(T_f - T_{смл}) + \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_{смл}^4) \quad (6.7)$$

Граничное условие на необогреваемой стороне ограждающей конструкции:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_c(T_x - T_e) + \varepsilon\sigma(T_x^4 - T_e^4) \quad (6.8)$$

При отсутствии усадочных явлений и плотном соприкосновении поверхности элементов ограждающей конструкции условия на границах между отдельными слоями отвечают равенству температур и плотности тепловых потоков:

$$T|_{x_{гр-0}} = T|_{x_{гр+0}} \quad (6.9)$$

$$-\lambda(\partial T/\partial x)|_{x_{гр-0}} = -\lambda(\partial T/\partial x)|_{x_{гр+0}} \quad (6.10)$$

При усадке теплоизоляции и возникновении пустого пространства между СМЛ и теплоизоляцией со стороны огневого воздействия должны быть включены условия на границе СМЛ и полости, а также на границе полости и поверхности теплоизоляции с учетом угловых коэффициентов излучения поверхностей, ограждающих полость.

В этом случае условие на границе поверхности СМЛ и полости может быть описано уравнением:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_c(T_{смл} - T_c) + F_{12} \varepsilon\sigma(T_{смл}^4 - T_{тим}^4) \quad (6.11)$$

Соответственно, условие на границе полости и поверхности теплоизоляции:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_c(T_c - T_{тим}) - F_{21} \varepsilon\sigma(T_{тим}^4 - T_{смл}^4) \quad (6.12)$$

Рассматриваемой системе ограждающей конструкции присуще свойство взаимности обмена излучением поверхностей с учетом угловых коэффициентов: $F_{21} = F_{12}$ и свойство замкнутости. Последнее состоит в том, что сумма всех угловых коэффициентов излучения на поверхности, ограждающие полость, равна 1 [36].

В приведенных выше уравнениях с граничными условиями приняты следующие обозначения:

φ - пористость; ρ - плотность; λ - коэффициент теплопроводности; c_p - теплоемкость; T - температура; t - время; p - давление; L_v - энтальпия газификации; m'' - массовая скорость фильтрации пиролизного газа; α - степень превращения при пиролизе; $R = d\alpha/dt$ - скорость превращения (газовыделения при

пиролизе); α_i – коэффициент теплообмена; ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана; C_m – емкость пористого материала по отношению к газам пиролиза с молекулярной массой M : $C_m = M \varphi / RT$; λ_m – коэффициент молярного переноса пиролизного газа: $\lambda_m = \varphi k / \nu$, где k , ν – коэффициент газопроницаемости и кинематическая вязкость пиролизного газа; K_D – коэффициент диффузии газа. Размерные характеристики представлены в системе СИ.

На начальном этапе моделирования теплопереноса в ограждающей конструкции с полимерной теплоизоляцией нами принят алгоритм расчета по первому варианту с применением только уравнения нестационарной теплопроводности без тепловых стоков. Важно было выяснить, насколько недооценивается (или переоценивается) по сравнению с экспериментом вклад реальных физико-химических процессов.

Покажем расчет на примере образца трехслойной системы VII ограждающей конструкции со следующей последовательностью слоев (элементов) со стороны огневой экспозиции [86-94]:

$$\text{СМЛ 1} (\delta = 0,006\text{ м}) - \text{“PENOCOM”} (\delta = 0,15\text{ м}; \rho_o = 140 \text{ кг/м}^3) - \text{СМЛ 2} \\ (\delta = 0,006\text{ м})$$

Толщина конструкции $\Delta = 162$ мм. Высота конструкции выбрана, как и в эксперименте - 0,3 м. Стойки каркаса изготовлены из брусков сосны толщиной 0,05 м. В двумерной рабочей плоскости ANSYS Mechanical строится геометрическая модель планируемого образца (Рисунок 6.2).

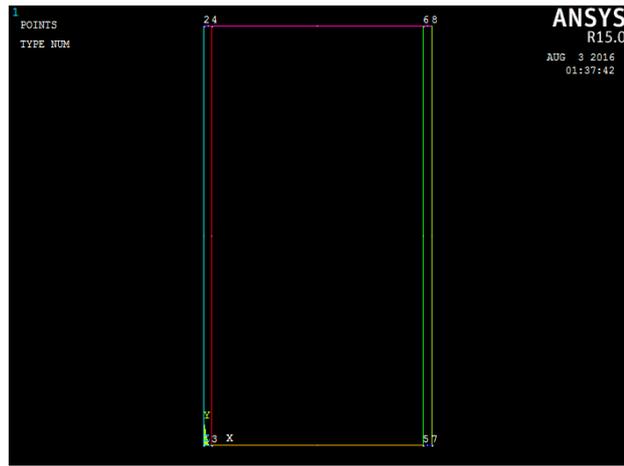


Рисунок 6.2 - Геометрическая модель системы VII в рабочей плоскости ANSYS Mechanical

Геометрическая модель свободно разбивается на сетку конечных элементов с шагом 1мм (Рисунок 6.3).

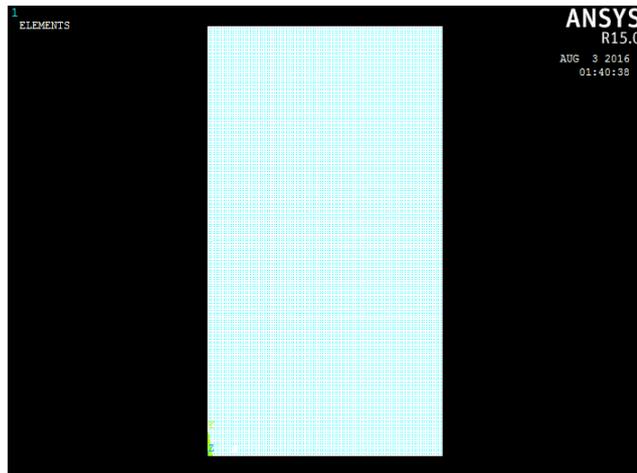


Рисунок 6.3 - Разбиение геометрической модели образца конструкции VII на сетку конечных элементов в ANSYS Mechanical с шагом в 1 мм

При расчете теплопередачи через ограждающую конструкцию приняты теплофизические характеристики СМЛ и пенокомпозита, полученные ранее по экспериментальным результатам до момента начала разложения теплоизоляции. Теплопроводность образующегося далее пенококса принята равной 0,070 Вт/мК [Глава 5]. Коэффициент теплообмена для условий в используемой огневой мало-масштабной печи принят постоянным $\alpha_f = 15 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Показаны результаты расчета динамики изменения температуры на поверхности элементов конструкции VII в сравнении с экспериментальными значениями (Рисунок 6.4).

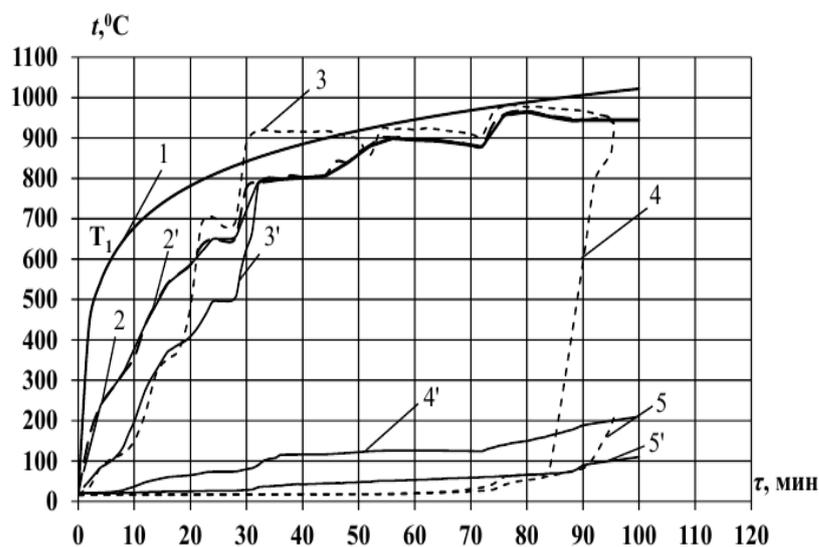


Рисунок 6.4 - Температурно-временные кривые прогрева элементов ограждающей конструкции системы VII при стандартном режиме пожара: 1 – температура в печи; 2 - на внешней поверхности СМЛ №1; 3 – с тыльной стороны поверхности СМЛ №1 (на поверхности теплоизоляции PENOCOM); 4 – на внутренней поверхности СМЛ №2; 5 – на необогреваемой поверхности конструкции (СМЛ №2). 2'; 3'; 4'; 5' - расчет

Как видно экспериментальное значение предела огнестойкости трехслойной ограждающей конструкции по признаку теплоизолирующей способности и целостности равно 95 мин., а по расчету - около 100 мин. Из-за аккумуляции тепловой энергии на поверхности теплоизоляции со стороны огневой экспозиции на 20-й мин., наблюдается резкое увеличение температуры на межфазной границе её с СМЛ 1. Такая динамика в некоторой степени обусловлена, по-видимому, экзотермической реакцией окисления пенококса, которая начинает активно протекать при температуре свыше 450-480 °С. Недоучет теплового эффекта этого процесса приводит к занижению расчетной температурной кривой на рассматриваемом этапе нагрева. Более близкими к расчетным являются значения температуры, фиксируемые на необогреваемой поверхности ограждающей конструкции.

Далее был проведен расчет и анализ 4-х слойной ограждающей конструкции системы V тоже с полимерной теплоизоляцией «PENOCOM» объемной

плотностью 83 кг/м^3 . Общая толщина конструкции $\Delta = 171 \text{ мм}$. Фактический предел огнестойкости конструкции системы V составляет 97,2 мин [т.5.4, Глава 5].

На рисунке 6.5 показаны результаты расчета температуры на поверхности элементов конструкции V, в сравнении с экспериментальными значениями.

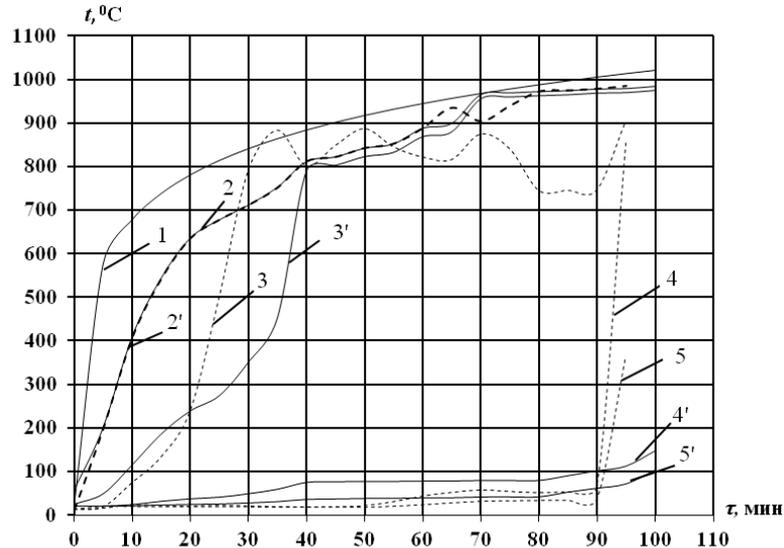


Рисунок 6.5 - Динамика изменения температуры на поверхности элементов конструкции V в зависимости от времени стандартного огневого воздействия: 1- температура в печи; 2- на поверхности СМЛ2; 3 – на поверхности теплоизоляции “PENOCOM” (тыльная сторона СМЛ2); 4 – на поверхности OSB (тыльная сторона теплоизоляции); 5- на не обогреваемой поверхности OSB; 2', 3', 4', 5' – расчет

Расчет показывает, что облицовка ограждающей конструкции двумя слоями СМЛ замедляет нагрев полимерной теплоизоляции, Температура начала её разложения в этом случае достигается почти на 10 минут позже, чем при облицовке одним слоем. Однако общий характер последующего быстрого изменения температуры на межфазной поверхности СМЛ2-теплоизоляция сохраняется. Расчет фиксирует естественную аккумуляцию тепла на поверхности теплоизоляции (одинаковый характер подъема температуры на расчетных кривых 3 и 3' в диапазоне $450-800^\circ \text{C}$). Заметна явная недооценка реальных термохимических процессов, протекающих в полимерной теплоизоляции при стандартном огневом действии на конструкцию. Это приводит к некоторому завышению расчетного предела огнестойкости конструкции по признаку EI. На последующем этапе математи-

ческого моделировании огнестойкости подобной конструкции с полимерной теплоизоляцией «PENOCOM» следует учитывать более сложное её поведение.

Численный расчет прогрева 4-х слойной конструкции системы VI, отличающейся применением полимерной теплоизоляции «PENOCOM» с плотностью $\rho = 43,7 \text{ кг/м}^3$, представлен на 110 минуте (Рисунок 6.6).

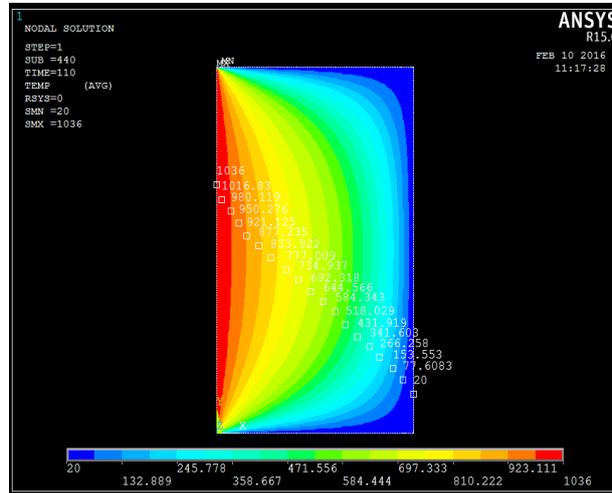


Рисунок 6.6 - Послойный прогрев ограждающей конструкции системы VI в расчетном комплексе ANSYS Mechanical на 110 минуте

Для сравнения с влиянием ТИМ «PENOCOM» по программе ANSYS Mechanical проведен расчет огнестойкости ограждающей деревянной каркасной конструкции IV с теплоизоляцией Rockwool такой же толщины и характеристиками облицовок, как и полимерной системы VII (Рисунок 6.7).

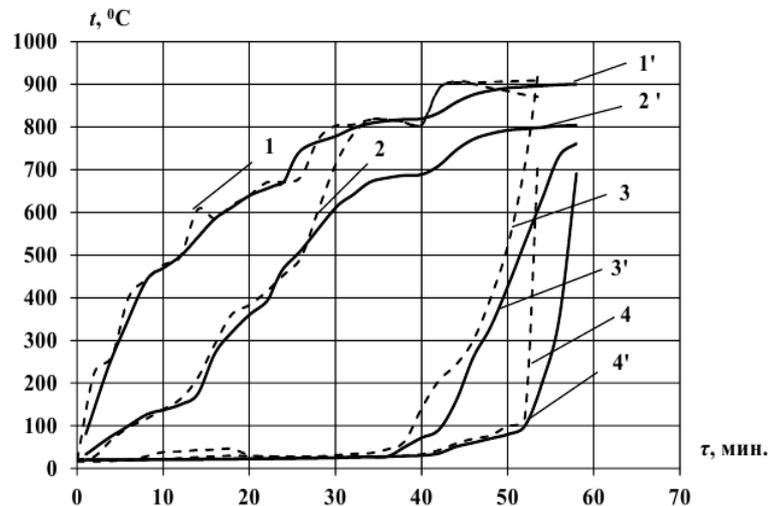


Рисунок 6.7 - Изменение температуры на поверхности элементов конструкции IV в зависимости от времени воздействия пожара: 1 - на внешней поверхности СМЛ со стороны огня; 2 –

на тыльной стороне СМЛ (внешней поверхности теплоизоляции); 3 - на тыльной стороне теплоизоляции (внутренней поверхности OSB); 4 - на необогреваемой поверхности конструкции;
1';2';3';4' – расчет

Наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений температуры на поверхности элементов конструкции. Соответственно, получено удовлетворительное совпадение расчетного (54 мин.) и фактического пределов огнестойкости конструкции (52 мин.), а также индивидуальных вкладов отдельных элементов в предел огнестойкости ограждающей конструкции.

Таким образом, подтверждено, что замена плиты Rockwool Ligth на полимерную теплоизоляцию «PENOCOM» такой же толщины позволяет значительно увеличить предел огнестойкости ограждающей деревянной легкой каркасной конструкции. Этот эффект обусловлен существенным уменьшением приведенного термического сопротивления R^{np} негорючей базальтоволокнистой теплоизоляции выше 400 °C по сравнению с величиной R^{np} полимерной теплоизоляции из-за образования пенококса с низким значением коэффициента теплопроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ тенденций в развитии строительства мало- и среднеэтажных зданий и сооружений с применением ограждающих ЛДКрК привел к выводу о возможности повышения огнестойкости путем применения современных облицовок и инновационных полимерных ТИМ карбонизирующего типа. Выявлена необходимость определения термического поведения и теплофизических свойств указанных материалов в широком интервале температур.

2. Стандартным методом ASTM E 906 впервые определены характеристики тепловыделения при горении древесины российских хвойных и лиственных пород, используемых в качестве элементов деревянных каркасных конструкций. Показано влияние разных факторов на период задержки воспламенения, максимальную скорость тепловыделения, время её достижения, общее тепловыделение при пламенном горении, скорость нарастания интенсивности тепловыделения (FIGRA). Установлено, что обработка древесины огнезащитными составами (КСД-А и МПС) положительно влияет на характеристики тепловыделения: снижает общее тепловыделение и показатель FIGRA как на стадии пламенного, так и тлеющего горения.

3. Установлен многостадийный характер разложения ТИМ «PENOCOM» в инертной среде и на воздухе, определены эффективные кинетические параметры отдельных стадий с учетом выявленного механизма гетерогенных реакций. Показано, что ТОД пенокомпозита осуществляется по диффузионному механизму D3 (с порядком реакции $n=1/3$) на всех стадиях процесса. Пиролиз полимерного пенокомпозита протекает в 2 стадии, сопровождается карбонизацией. Обе стадии осуществляются по механизму нуклеации и роста ядер по закону случая $R(n=1)$. Определена формоустойчивость неорганических и полимерных ТИМ.

4. По результатам маломасштабных огневых испытаний при стандартном режиме пожара 7-ми систем ограждающих ЛДКрК с разной комбинацией облицовочных плит и теплоизоляции по признаку EI определен фактический предел огнестойкости конструкций. Оценен вклад в общую огнестойкость конструктивной системы каждого из составляющих её элементов. Показано, что замена базальтоволокнистой теплоизоляции Rockwool Light толщиной 150 мм на полимерную такой же толщины позволяет увеличить фактический предел огнестойкости ограждающей конструкции при прочих равных условиях почти в 2 раза (с EI 52,5 до EI 110).

5. По измерению температуры на поверхностях элементов ограждающих ЛДКрК в условиях стандартного пожара, рассчитаны значения коэффициентов удельной теплопроводности СМЛ в интервале 20-530°C и ТИМ «PENOCOM» при нагревании до начала его разложения. Оценены значения приведенного термического сопротивления отдельных элементов и в целом ограждающих конструкций $R^{пр}$, (m^2K/W). Высокая эффективность ТИМ "Penosom" в обеспечении огнестойкости ограждающих конструкций по сравнению с Rockwool обусловлена образованием пенококса, приведенное термическое сопротивление которого изменяется при повышении температуры в меньшей степени, чем в случае конструкции с негорючей минеральной теплоизоляцией.

6. Разработана одномерная модель прогрева ограждающих деревянных легких каркасных конструкций с полимерной ТИМ. Численный теплотехнический расчет модели методом конечных элементов с привлечением программного комплекса ANSYS Mechanical показал результаты, согласующиеся с экспериментальными по значению предела огнестойкости конструкций и вкладов в общий предел огнестойкости отдельных элементов, составляющих конструкцию. Подтверждена перспективность применения полимерного ТИМ карбонизирующегося типа для повышения пожарной безопасности и огнестойкости ограждающих ЛДКрК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казейкин, В.С. Проблемные аспекты развития малоэтажного жилищного строительства в России [Текст] / В.С. Казейкин, С.А. Баронин, А.Г. Черных, А.Н. Андросов // М.: Инфра – М, 2011. – 278 с.
2. Мантуров, Д.В. Доклад. Режим доступа: [Электронный ресурс]. – Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://government.ru/news/23390/> (Дата обращения:02.06.2017).
3. Об утверждении Плана разработки и утверждения сводов правил и актуализации ранее утвержденных строительных норм и правил, сводов правил на 2017 г. Режим доступа: [Электронный ресурс]: (утв. Приказом Минстрой России от 14.12.2017 №940/пр): (в ред. от 06.03.2017) // Консорциум кодекс: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2014. – Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://docs.cntd.ru/document/420388785> (Дата обращения:02.06.2017).
4. Демехин В.Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре [Текст] / В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин. – М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2003. – 656 с.
5. Green M. The Case for Tall Wood Buildings: How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmentally Friendly Alternative for Tall Building Structures. [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/CWC-Tall-Walls2.pdf> (Дата обращения 12.12.2016г.)
6. Mid-Rise Wood Construction / Engineering News-Record, April 2015, p.1-12

- [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://www.awc.org/pdf/education/des/ReThinkMag-DES515A-MultistoryWoodConstruction-140210.pdf> (Дата обращения 28.11.2017г.)
7. Good Wood Plaza – самое большое в мире офисное «зеленое» здание из дерева. [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://goodwoodplaza.ru/> (Дата обращения 19.06.2016 г.)
8. Buchanan A., Östman B., Frangi A. Fire resistance of timber structures: a report for the National Institute of Standards and Technology. [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. URL: www.nist.gov/el/fire_research/upload/NIST-Timber-Report-v4-Copy.pdf / (Дата обращения 12.12.2016г.)
9. Barber D., Gerard R. High-rise timber buildings // Fire Protection Engineering, July 1, 2014. [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. http://www.sfpe.org/?page=2014_Q3_1 / (Дата обращения 12.12.2016г.)
10. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году: Статистический сборник. Под общей редакцией А.В. Матюшина. - М.: ВНИИПО, 2016, - 124 с.
11. Асеева Р.М. Тепловыделение древесины различного эксплуатационного возраста [Текст] / Р.М. Асеева, Р.В. Дегтярев, Е.Ю. Круглов, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, Н.И. Тарасов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник.- 2010. - №5 (74). – С. 139-143.
12. Асеева Р.М. Характеристики тепловыделения при горении древесины различных пород и видов [Текст] / Р.М. Асеева, С.Л. Барботько, Е.Ю. Круглов, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Пожаровзрывобезопасность.- 2011. - №7. – С.2-7.
13. Асеева Р.М. Об определении теплот сгорания и тепловыделения при горении полимерных материалов [Текст] / Р.М. Асеева, С.Л. Барботько, Е.Ю. Круглов, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Пожаровзрывобезопасность.- 2012. - №5. – С.25-34.
14. Круглов Е.Ю. Влияние разновидности и продолжительности эксплуатации древесины на время наступления опасных факторов пожара для объектов с дере-

вянными конструкциями [Текст] / Е.Ю. Круглов, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, С.Б. Сивенков // Промышленное и гражданское строительство.- 2012. - №7. – С.56-58.

15. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ (с изменениями на 3 июля 2016 года). [Электронный ресурс] (Распоряжение правительства РФ от 27.12.2010 г. № 2446-р) // Консорциум кодекс: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://docs.cntd.ru/document/902186281> (Дата обращения:02.06.2017)

16. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: (в ред. от 10 июля 2012 г.) // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2013. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

17. EN 1995-1-2-2004 Eurocode 5 – Design of timber structure. Part 1-2. General Structural Fire Design. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.2.2004.pdf> (Дата обращения 09.10.2017.)

18. Fire Safety in Timber Buildings. Technical Guideline for Europe, SP Report. [Электронный ресурс] // Режим доступа: www.jrc.ec.europa.eu (Дата обращения 09.10.2017.)

19. White R. H. Analytical methods for determining fire resistance of timber members [Текст]. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, New York, Springer, 2016, pp. 1979–2011. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_55.

20. White R. H. Fire resistance of wood with members with directly applied protection. Proceedings of 11th International Conference and Exhibition «Fire and Materials 2009». UK, London, Interscience Communications, 2009. 971 p. Available at. [Электронный ресурс] <http://naldc.nal.usda.gov/download/44930/PDF> (дата обращения 19.06.2017).

21. EN – 13381 – 7 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 7. Applied protection to timber members.
- 22 . Just A., Schmid J., Ostman B. Fire protection abilities provided by gypsum plasterboards // World Conference on Timber Engineering, Auckland, 2012, 16.-19 July.
23. EN 12369-1-2001 Wood-based panels. Characteristic values for structural design- Part 1. OSB, particleboards and fibreboards. [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://docs.cntd.ru/document/431950452> (Дата обращения 28.11.2017г.)
24. Российский рынок OSB ориентирован на рост. // Леспроинформ. – 2016. - №2 (116). [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/4312> (Дата обращения 29.12.2016г.)
25. Перспективы рынка стекломagneйных листов / [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. http://www.newchemistry.ru/blog.php?category=blog&id_company=1&n_id=6933&page=1(Дата обращения:02.06.2017г.)
26. Овчаренко Е.Г. Анализ рынка теплоизоляционных материалов в России. [Электронный ресурс] //Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://www.pandia.ru> (Дата обращения:02.06.2017г.)
27. Овчаренко Е.Г. Тенденции в развитии производства утеплителей в России. [Электронный ресурс] //Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=172 (Дата обращения 12.12.2016г.)
28. Теплоизоляционные материалы. [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России // http://www.germostroy.ru/art_298.php (Дата обращения 14.12.2016 г.)
29. Деловая пресса «Перспективы роста рынка теплоизоляции связаны с улучшением инвестклимата» [Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России

http://businesspress.ru/newspaper/article_mId_38_aId_443823.html (Дата обращения 14.12.2016г.)

30. Жуков Д.Д., Красновских М.П. Термическое разложение пенополистирола самозатухающего [Текст] // Современные наукоемкие технологии 2014 г., №4, С.101 – 107

31. Web–site HotWell. SIP technologies. Available at.[Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. www.hotwell.ru (Дата обращения 12.12.2016г.)

32. Fire resistance of Timber frame wall construction. In: PU Europe excellence in insulation.[Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <http://ecotermix.ru/wp-content/uploads/2013/12/Test-PU-Europe.pdf> (Дата обращения 12.12.2016г.)

33. Just A., Schmidt J., König J. Gypsum plasterboards used as fire protection – analysis of a database . SP Report 2010: 29. Stockholm, 2010.

34. Rogers F.E., Ohlemiller T.J. Cellulosic material overall degradation kinetics and reaction heats // Combustion Science and Tehnology, 1980, vol.24., pp.129-137

35. Асеева Р.М. Теплоизоляционные материалы пониженной горючести на основе вторичного целлюлозного сырья [Текст] / Б.Б. Серков / Пожаровзрывобезопасность, 1999, №1. - С.26.

36. Serkov B.B., Aseeva R.M. Flame retardant thermal insulation based on recycled cellulosic products // Proceedings of the second international seminar on fire and explosion hazard of substances and venting of deflagrations, Moscow, Russia, 11-15 August, 1997, pp. 702 – 715.

37. Thermawall TW 55 insulation for Timber and Steel Framing systems. Typical constructions and u-values March 2011.[Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. /www.kingspaninsulation.co.uk

38. Benichou N., Sultan M.A. Thermal properties of lightweight – wood framed construction components at elevated temperatures // Fire and Materials 2005, vol.25, pp.165 – 179.

39. Романенков И.Г. Огнезащита строительных конструкций [Текст] // Левитес И.Г. / М.: Стройиздат, 1991 г. – 320 с.
40. Гаращенко Н.А. Исследование эффективности огнезащиты деревоклееных конструкций. Автореферат диссертации на соискание степени к.т.н., МГСУ, 2007.
41. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций. Под ред . Ю.А. Кошмарова.-ТИМР,2000,-433с.
42. Sultan M. A. Factors affecting fire resistance performance of lightweight frame floor assemblies. Proceedings of 8th International Fire Science and Engineering Conference. Interflam'99 Edinburg, Scotland, 1999, pp. 897–910.
43. Еремина Т.Ю. К вопросу оценки эффективности теплопроводности вспученных составов [Текст] // Бессонов Н.М., Дьяченко П.В. / Пожаровзрывобезопасность, 2000, т.9, №3. - С.15-17
44. Еремина Т.Ю. Модель оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся водосодержащих составов [Текст] / Бессонов Н.М.. // Пожаровзрывобезопасность, 2000, т.9, №3. - С.17-20
45. Шутов Ф.А. Огнестойкие материалы для снижения пожарной опасности малоэтажных объектов из древесины [Электронный ресурс] // Ф.А. Шутов. // Технологии техносферной безопасности. – 2014. - №3 (55). – Режим доступа (<http://ipb.mos.ru/ttb>).
46. Шутов Ф.А. Теплоизоляционные и экологические характеристики огнестойкого полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» [Электронный ресурс] // Ф.А. Шутов., Ярборо Д // Технологии техносферной безопасности. – 2014. - №4 (56). – Режим доступа (<http://ipb.mos.ru/ttb>).
47. Уэндландт У. Термические методы анализа [Текст] // М. Мир. – 1978. С – 526
48. Шестак Я. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твердых неорганических веществ [Текст] / Я. Шестак. – М.: Мир. – 1987. – 456 с.
49. Электропечь сопротивления, камерная лабораторная СНОЛ 6/10, паспорт, техническое описание и инструкция по эксплуатации. г. Истра, 2007 г.

50. Rogers F.E., Ohlemiller T.J. Pyrolysis Kinetics of a Polyurethane Foams by Thermogravimetry. A General Kinetic Method // J. Macromol. Science-Chem. 1981, Vol.15A, N1, pp.169-185
51. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России. <http://docs.cntd.ru/document/9055248/> (Дата обращения 28.11.2017г.)
52. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России. <http://docs.cntd.ru/document/9055248/> (Дата обращения 28.11.2017г.)
53. Сивенков А.Б. Влияние физико-химических характеристик древесины на ее пожарную опасность и эффективность огнезащиты [Текст] / автореферат дис. доктора. техн. наук: 02.00.06 / Сивенков Андрей Борисович. – М., 2015. – 49 с.
54. EN 13823+A1 Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item [Электронный ресурс] : European standards // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. / <https://www.en-standard.eu/csn-en-13823-a1-reaction-to-fire-tests-for-building-products-building-products-excluding-floorings-exposed-to-the-thermal-attack-by-a-single-burning-item/> (Дата обращения 28.11.2017г.)
55. ISO 9705 Fire Tests-Reaction to Fire- Full scale Room Fire Test for Surface Products. International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 1991
56. Асеева Р.М. Горение древесины и ее пожароопасные свойства [Текст] / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Монография. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2010. – 262 с.
57. Thornton W.M. The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds // Philosophical Magazine 2009, v.33,p.193-203
58. Babrauskas V. Wood Char Depth: Interpretation in Fire investigation // Presented at International Symposium on Fire Investigation, United Kingdom, 28 June, 2004.

[Электронный ресурс] // Доступ из локальной сети б – ки Академии ГПС МЧС России. <https://www.doctorfire.com/WoodCharring.pdf> (Дата обращения 28.03.2017г.)

59. Круглов Е.Ю. Термогравиметрический анализ разложения полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» [Текст] / Кобелев А.А., Шутов Ф.А., Асеева Р.М. // Энциклопедический словарь. Все материалы. – 2016. - №6. С. 30 – 34.

60. Kruglov E. Yu. Thermal gravimetric analysis of decomposing polymeric Penocom foamed composite // A.A. Kobelev, F.A. Shutov, R.M. Aseeva. // Polymer Science, Series D, 2017, vol.10, №1, p. 74-78.

61. Drysdale, D.D. (1985a). 'Fire behaviour of cellular polymers'. Cellular Polymers, 4, 405–419.

62. Takeda H. A model to predict fire resistance of non-load bearing wood-stud walls // Fire and Materials 2003, vol. 27, p. 19 - 39.

63. Frangi A., Schleifer V., Fontana M. Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies. Engineering Structures 2010, vol.32, № 4, p. 1184 - 1195.

64. Flynn J.H. Temperature Dependence of the Rate of Reaction in Thermal Analysis. The Arrhenius equation in condensed phase kinetics // Journal of Thermal Analysis 1990, vol.36, pp.1579–1593

65. Criado J.M. Kinetic Analysis of DTG Data from Master Curves // Thermochemica Acta 1978, vol.24, pp. 186–189

66. Асеева Р.М. Оценка огнестойкости ограждающих деревянных каркасных конструкций [Электронный ресурс] / Р.М. Асеева, Е.Ю. Круглов, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков / Технологии техносферной безопасности. – 2015. - № 2 (60) <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/42-02-15.ttb.pdf>.

67. Круглов Е.Ю. // Огнестойкость ограждающих легких деревянных каркасных конструкций с теплоизоляцией из пенокомпозиата «PENOCOM» [Текст] / Е.Ю.Круглов, Ф.А.Шутов, Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.– 2015 г. - №3 – С.63 – 71.

68. Шутов Ф. А. Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций [Текст] / Е. Ю. Круглов, Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – №1. – С. 28 – 37
69. Ройтман В.М. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре [Текст] / Б.Б. Серков, Ю.Г. Шевкуненко, А.Б. Сивенков, Е.Л. Баринаова, Д.Н. Приступок – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – 364 с.
70. Свод правил 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России. <http://docs.cntd.ru/document/456082589> (Дата обращения 28.11.17г.)
71. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / г. Минск, Изд-во Ан Белр., 1961 г.
72. Строительные материалы / [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://stroitelmaterialy.ru/SML.html> (Дата обращения 09.10.2017.)
73. РосМастерСтрой / [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://www.favoright.ru/catalog/steklomagnievuyu_list/steklomagnievuyu_list,_ceny,_hakterakte/](http://www.favoright.ru/catalog/steklomagnievuyu_list/steklomagnievuyu_list,_ceny,_harakterakte/) (Дата обращения 09.10.2017.)
74. МосСтройТрансГаз / [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.all-sml.ru/sml/quality/> (Дата обращения 09.10.2017.)
75. Bobacz D. Behavior of Wood in Case of Fire // VDM Verlaq, - Germany, 2008
76. A.M. Kanury and D.1. Holve. Transient conduction with pyrolysis (Approximate solutions for charring of wood slabs), J. Heat Transfer, 1982.,vol., p. 338 - 343
77. M.U. Alzueta, R. Bilbao, M. Finestra, Energy Fuels 15 (2001) 724–729
78. Гнедин, Е.В. Химические и физические свойства пенококсов и их влияние на горючесть [Текст] / Новиков С.Н., Халтуринский Н.А. // г. Волгоград, 1992 г., 116-119 с.
79. Антонов, А.В. Горение коксообразующих полимерных систем [Текст] /

А.В. Антонов, И.С. Решетников, Н.А. Халтуринский // Усп.хим. т.68., №7 – М.:1999. 663 – 673 с.

80. Круглов Е.Ю. Моделирование теплопередачи в ограждающих деревянных легких каркасных конструкциях при стандартном режиме пожара // Р.М.Асеева, Б.Б. Серков, Ф.А. Шутов// Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» (<http://ipb.mos.ru/ttb>), выпуск №4 (68), 2016 г.

81. Takeda, H. and Mehaffey, J.R., “WALL2D: A Model for Predicting Heat Transfer through Wood–Stud Walls Exposed to Fire”. Fire and Materials 22: 133–140, 1998

82. Takeda H. A model to predict fire resistance of non-load bearing wood-stud walls // Fire and Materials 2003, vol. 27, p. 19-39

83. Collier P.C.R., Buchanan A.H. Fire Resistance of lightweight timber framed walls // Fire technology 2002, vol.38, p.125-145

84. Frangi A., Schleifer V., Fontana M. Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies. Engineering Structures 2010, vol.32, № 4, p. 1184-1195

85. Benichou N., Sultan M.A. Fire Resistance Performance of Lightweight Wood-Framed Assemblies // Fire Technology 2000, vol.36, N 3, p.184-219

86. А.В. Жидков / Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно – элементного моделирования // Нижний Новгород., 2006 г. С.9 – 32.

87. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

88. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютер пресс, 2002. – 224 с.

89. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference / 2013 г. – 952 с.

90. А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук: Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач в пяти частях. Часть

1. Графический интерфейс и командная строка. Средства создания геометрической модели, г. Минск, 2013 г.

91. А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук: Средства отображения и редактирования геометрических компонентов твердотельной модели. Примеры создания твердотельной модели. Примеры создания твердотельных моделей средствами ANSYS для решения физических задач // часть 2, г. Минск, 2013г.

92. А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук: Определение физических констант материалов и конечноэлементное разбиение твердотельной модели. Примеры выполнения этих действий с построенными ранее моделями// часть 3, г. Минск, 2013г.

93. А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук: Ограничения и нагрузки. Разделы Solution и General Postproc главного меню. Примеры постановки краевых задач, их решения и просмотра результатов// часть 4, г. Минск, 2013г.

94. А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк, А.И. Кравчук: Примеры решения связанных задач механики твердого тела// часть 5, г. Минск, 2013г., с.34.

Приложение А
(обязательное)

ПРОТОКОЛЫ ИСПЫТАНИЙ

Протокол

испытания на установке «Огневая печь»

от «28» ноября 2014 г.

Место проведения испытаний: лаборатория кафедры ПБС Академии ГПС МЧС России.

Образец: фрагмент легкой деревянной каркасной конструкции (ЛДКрК) система №1: OSB (0,009) + Теплоизоляционный материал (ТИМ) «Rockwool scandic» (0,01; $\rho = 0,036$) + OSB (0,009).

На испытаниях присутствовали: Круглов Е.Ю.

Основные характеристики элементов ограждающей ЛДКрК

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м ³
OSB	0,37×0,3×0,009	0,62	620
ТИМ «Rockwool scandic»	0,255×0,3×0,1	0,268	36
OSB	0,37×0,3×0,009	0,62	620
Каркас: сосна	0,3×0,1×0,025	0,348	464

Схема расстановки термопар на образце (рис.1):

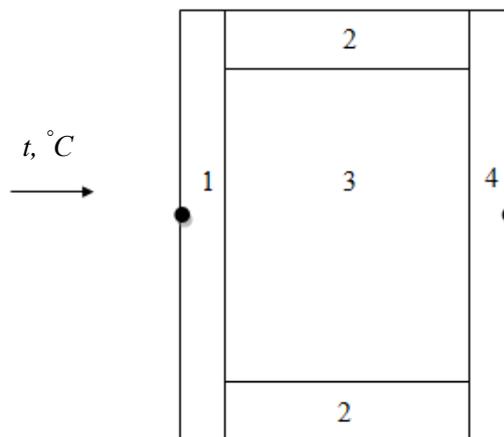


Рисунок 1 – Облицовочная плита со стороны огневого воздействия OSB; 2 – деревянные стойки; 3 – теплоизоляция «R-Wool»; 4 – облицовочная плита OSB на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n .

Цель проведения испытания:

- Определение температур прогрева ЛДКрК при стандартном режиме пожара, согласно схемы расстановки термопар.

Результаты эксперимента на установке «Огневая печь»

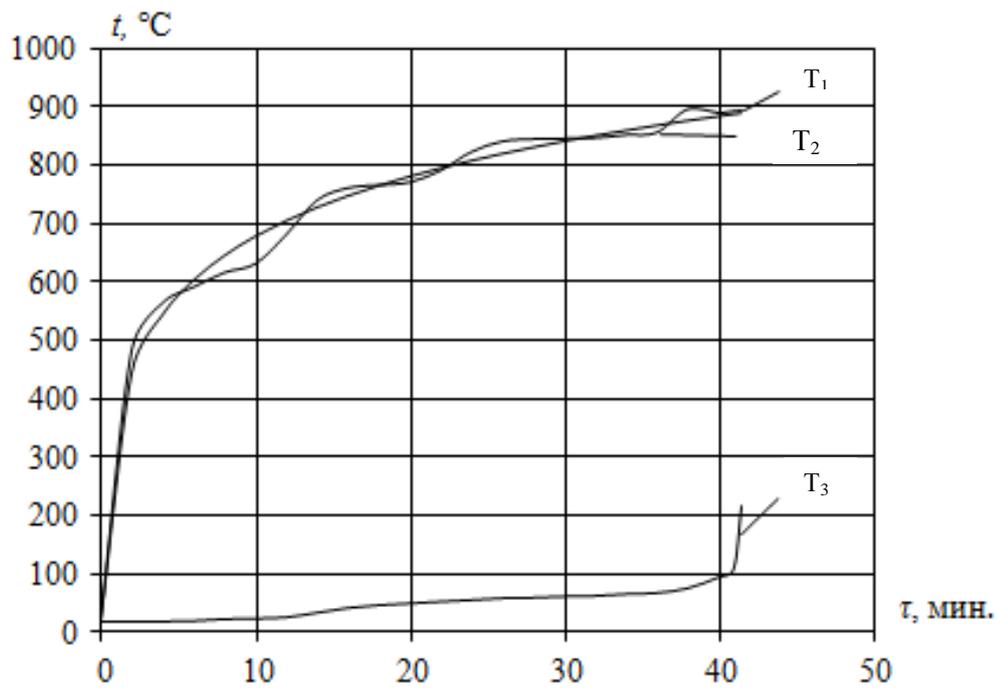


Рисунок 2 – Динамика изменения температуры в огневой печи и контрольных точках на поверхности элементов конструкции (система I): T_1 – стандартный режим пожара; T_2 – на обогреваемой поверхности OSB; T_3 – на необогреваемой поверхности конструкции

Протокол

испытания на установке «Огневая печь»

от «11» декабря 2014 г.

Место проведения испытаний: лаборатория кафедры ПБС Академии ГПС МЧС России.

Образец: фрагмент ЛДКрК система №2: Имитация бруса (0,02) + OSB (0,009) + «PENOCOM» (0,01; $\rho = 90$) + OSB (0,009).

На испытаниях присутствовали: Круглов Е.Ю.

Основные характеристики элементов ограждающей ЛДКрК

Наименование материала	Размеры, м.	Масса, кг	Плотность, кг/м ³
Имитация бруса (сосна)	0,37×0,18×0,02	0,5	375
OSB	0,37×0,3×0,009	0,726	727
ТИМ «PENOCOM»	0,31×0,3×0,1	0,84	90
Каркас: сосна	0,3×0,1×0,025	0,3	400

Схема расстановки термопар на образце (рис.1):

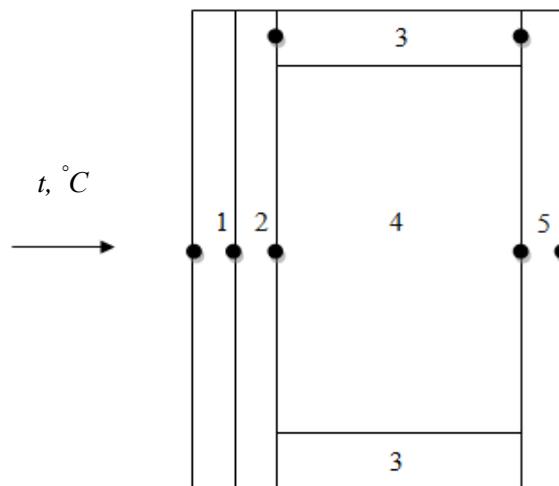


Рисунок 1 – 1 – «Имитация бруса» со стороны огневого воздействия, 2- облицовочная плита OSB; 3 – деревянные стойки; 4 – теплоизоляция «PENOCOM»; 5 – облицовочная плита OSB на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n

Цель проведения испытания:

- Определение температур прогрева ЛДКрК при стандартном режиме пожара, согласно схемы расстановки термопар.

Результаты эксперимента на установке «Огневая печь»

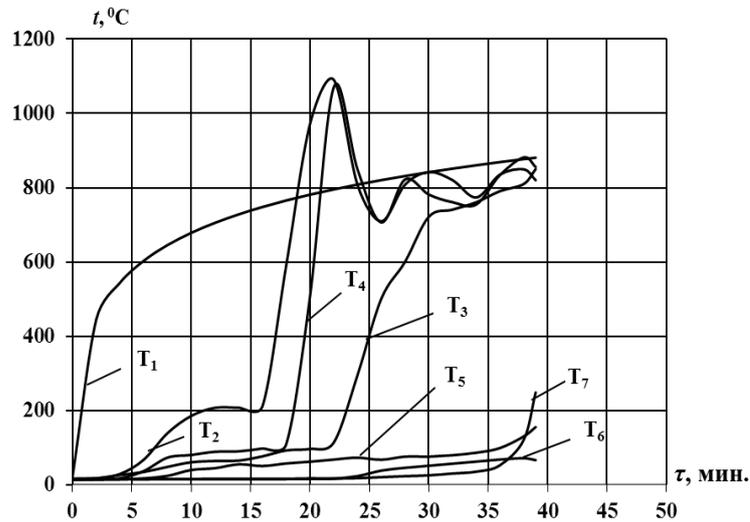


Рисунок 2 - Динамика изменения температуры в контрольных точках образца № 2 при стандартном режиме пожара (T₁): T₂ – на тыльной стороне отделочного материала «имитация бруса»; T₃ – на тыльной стороне плиты OSB; T₄, T₅ – температура в центре стойки со стороны огневой экспозиции и на необогреваемой поверхности; T₆ – на тыльной стороне «PENOCOM» теплоизоляции; T₇ – на необогреваемой стороне конструкции

Протокол

испытания на установке «Огневая печь»

от «12» декабря 2014 г.

Место проведения испытаний: лаборатория кафедры ПБС Академии ГПС МЧС России.

Образец: фрагмент ЛДКрК система №3: 2 листа ГКЛ (0,009) + «PENOCOM» (0,01; $\rho = 43,7$) + OSB (0,009).

На испытаниях присутствовали: Круглов Е.Ю.

Основные характеристики элементов ограждающей ЛДКрК

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м ³
Гипсокартонный лист	0,3×0,37×0,009	1,040	1041
ТИМ «PENOCOM»	0,3×0,27×0,1	0,354	43,7
OSB	0,3×0,37×0,009	0,726	727
Каркас: сосна	0,3×0,1×0,025 (2)	0,696	464

Схема расстановки термопар на образце (рис.1):

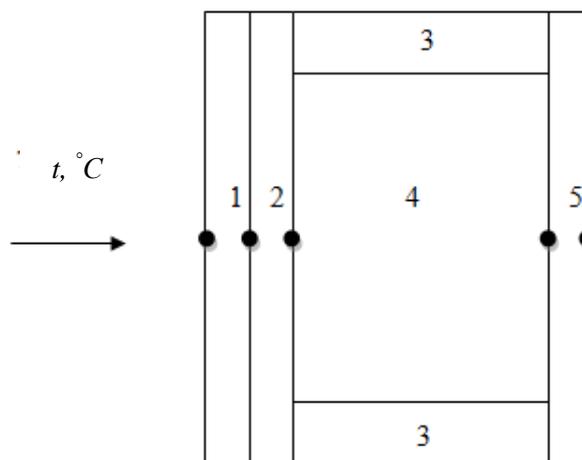


Рисунок 1 – 1,2 – Облицовочная плиты (ГКЛ) со стороны огневого воздействия; 3 – деревянные стойки; 4 – теплоизоляция «PENOCOM»; 5 – облицовочная плита OSB на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n .

Цель проведения испытания:

- Определение температур прогрева ЛДКрК, согласно схемы расстановки термомпар.

Результаты эксперимента на установке «Огневая печь»

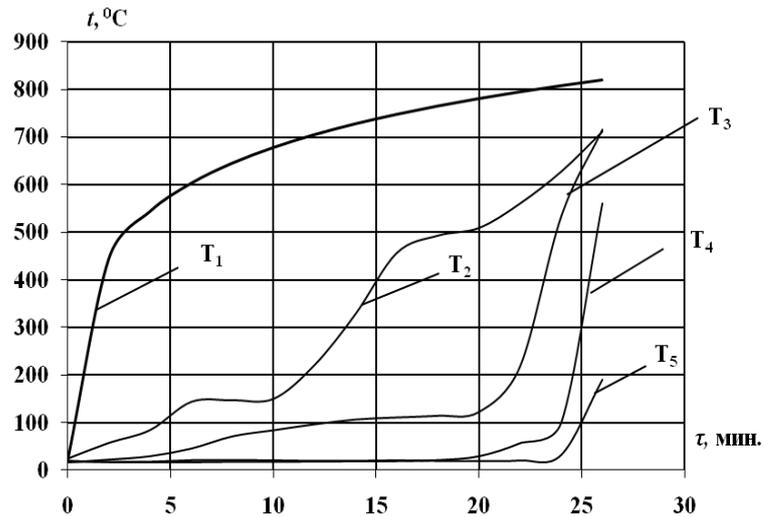


Рисунок 2 - Динамика изменения температуры в печи и центре поверхности ограждающей конструкции III и её элементов: T_1 – температура в печи; T_2 – на тыльной стороне ГКЛ №1; T_3 – на тыльной стороне ГКЛ №2; T_4 – на тыльной стороне «PENOCOM» изоляции; T_5 – на необогреваемой поверхности конструкции

Протокол

испытания на установке «Огневая печь»

от «27» февраля 2015 г.

Место проведения испытаний: лаборатория кафедры ПБС Академии ГПС МЧС России.

Образец: фрагмент ЛДКрК система №4: СМЛ (0,01) + «Rockwool scandic» (0,015; $\rho = 0,035$) + OSB (0,009).

На испытаниях присутствовали: Круглов Е.Ю.

Основные характеристики элементов ограждающей ЛДКрК

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м ³
СМЛ	0,37×0,3×0,01	0,884	796
ТИМ «Rockwool scandic»	0,255×0,3×0,15	0,402	36
OSB	0,37×0,3×0,009	0,62	620
Каркас: ель	0,3×0,15×0,05	1,044	464

Схема расстановки термопар на образце (рис.1):

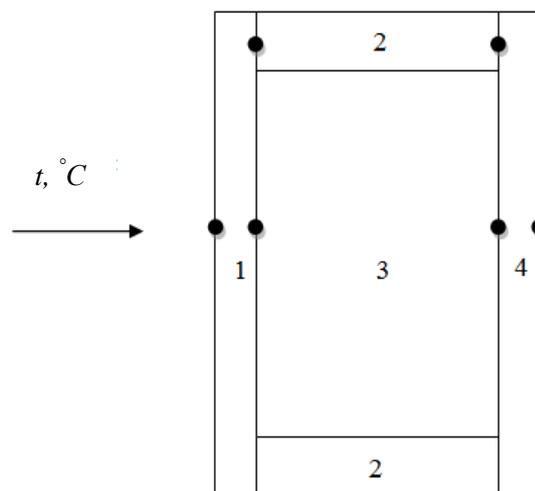


Рисунок 1 – 1 – Облицовочная плита СМЛ со стороны огневого воздействия; 2 – деревянные стойки; 3 – теплоизоляция «Rockwool»; 4 – облицовочная плита OSB на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n .

Цель проведения испытания:

- Определение температур прогрева ЛДКрК, согласно схемы расстановки термопар.

Результаты эксперимента на установке «Огневая печь»

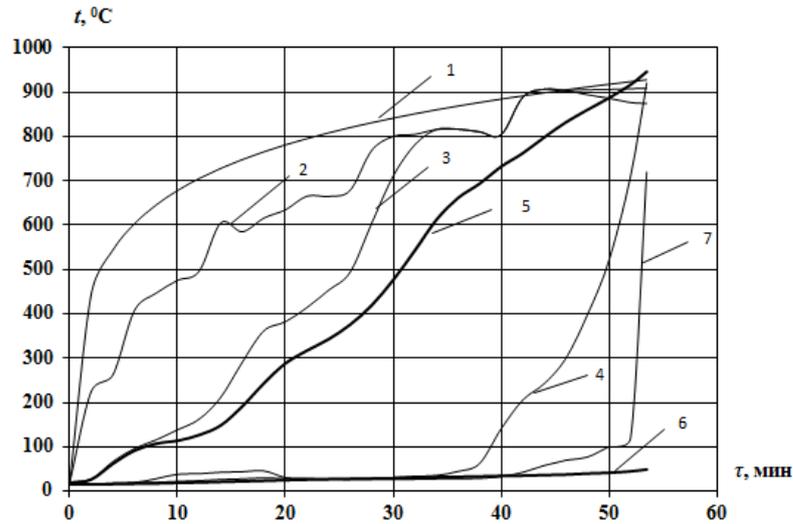


Рисунок 2 – Динамика изменения температуры в печи и центре поверхности ограждающей конструкции IV её элементов: 1 - температура в печи; 2 – температура на поверхности СМЛ; 3 – температура на тыльной поверхности СМЛ; 4 – температура на обогреваемой поверхности OSB; 5 – температура на поверхности стойки; 6 - температура на необогреваемой поверхности стойки 7 – температура на тыльной поверхности OSB

Протокол

испытания на установке «Огневая печь»

от «28» февраль 2015 г.

Место проведения испытаний: лаборатория кафедры ПБС Академии ГПС МЧС России.

Образец: фрагмент ЛДКрК №5: 2 листа СМЛ (0,006) + «PENOCOM» (0,015; $\rho = 83 \text{ кг/м}^3$) + OSB (0,009).

На испытаниях присутствовали: Круглов Е.Ю.

Основные характеристики элементов ограждающей ЛДКрК

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м^3
СМЛ №1	0,3×0,37×0,006	0,65	976
СМЛ №2	0,3×0,37×0,006	0,64	961
ТИМ «PENOCOM»	0,255×0,292×0,15	0,930	83
OSB	0,3×0,37×0,009	0,654	654
Каркас: сосна	0,3×0,15×0,05	1,12	497

Схема расстановки термопар на образце (рис.1):

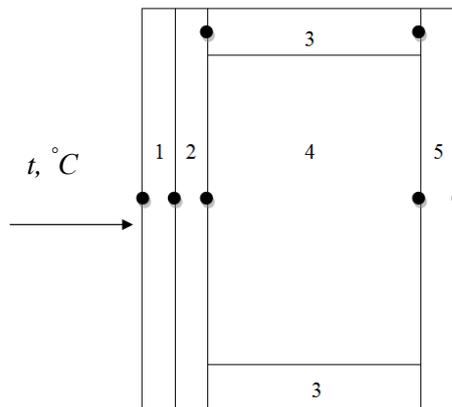


Рисунок 1 – 1,2 – Облицовочная плиты (СМЛ) со стороны огневого воздействия; 3 – деревянные стойки; 4 – теплоизоляция «PENOCOM»; 5 – облицовочная плита OSB на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n .

Цель проведения испытания:

- Определение температур прогрева ЛДКрК, согласно схемы расстановки термодатчиков.

Результаты эксперимента на установке «Огневая печь»

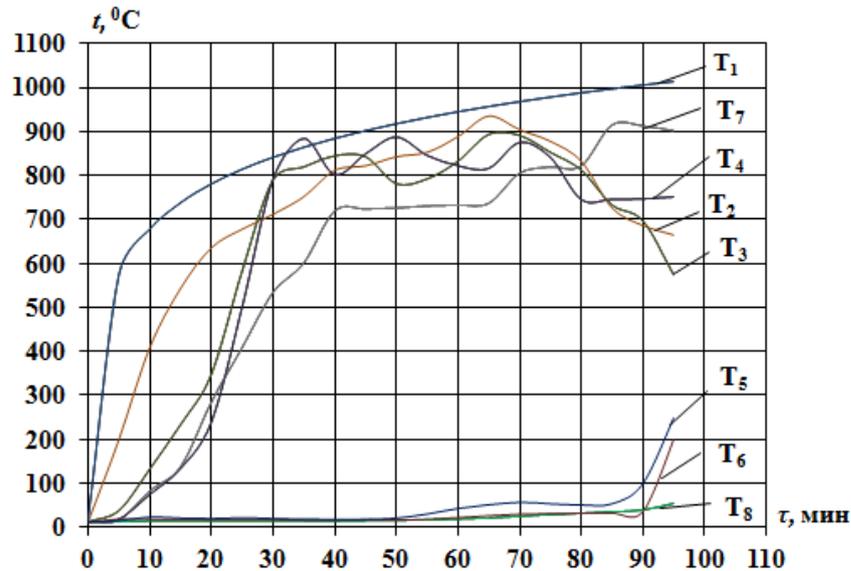


Рисунок 2 – Динамика изменения температуры в огневой печи (T_1) и контрольных точках на поверхности элементов конструкции системы V: T_2 и T_3 – на обогреваемой и тыльной стороне СМЛ1; T_4 – на тыльной стороне СМЛ 2 (обогреваемая сторона теплоизоляции «PENOCOM»); T_5 – на тыльной стороне «PENOCOM» (обогреваемая сторона OSB); T_6 – на необогреваемой стороне конструкции; T_7 – на обогреваемой стороне стойки; T_8 – на необогреваемой стороне стойки

Протокол

испытания на установке «Огневая печь»

от «30» марта 2015 г.

Место проведения испытаний: лаборатория кафедры ПБС Академии ГПС МЧС России.

Образец: фрагмент ЛДКрК система №6: СМЛ (0,006) + СМЛ (0,01) + «PENOCOM» (0,015; $\rho = 43,7$) + OSB (0,009).

На испытаниях присутствовали: Круглов Е.Ю.

Основные характеристики элементов ограждающей ЛДКрК

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м ³
Система VI			
СМЛ №1	0,3×0,37×0,006	0,620	931
СМЛ №2	0,3×0,37×0,01	0,906	816
ТИМ «PENOCOM»	0,255×0,3×0,15	0,5	43,7
OSB	0,3×0,37×0,009	0,654	654
Каркас: сосна	0,3×0,15×0,05	0,926	411

Схема расстановки термопар на образце (рис.1):

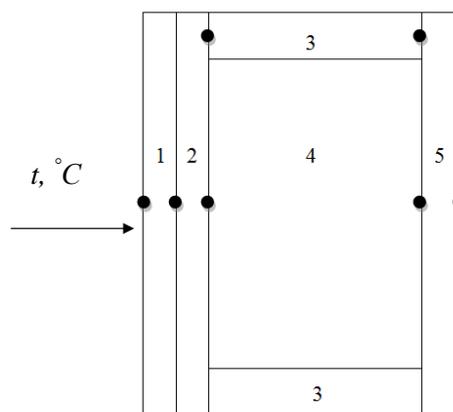


Рисунок 1 – 1,2 – Облицовочная плиты (СМЛ) со стороны огневого воздействия; 3 – деревянные стойки; 4 – теплоизоляция «PENOCOM»; 5 – облицовочная плита OSB на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n .

Цель проведения испытания:

- Определение температур прогрева ЛДКрК, согласно схемы расстановки термодатчиков.

Результаты эксперимента на установке «Огневая печь»

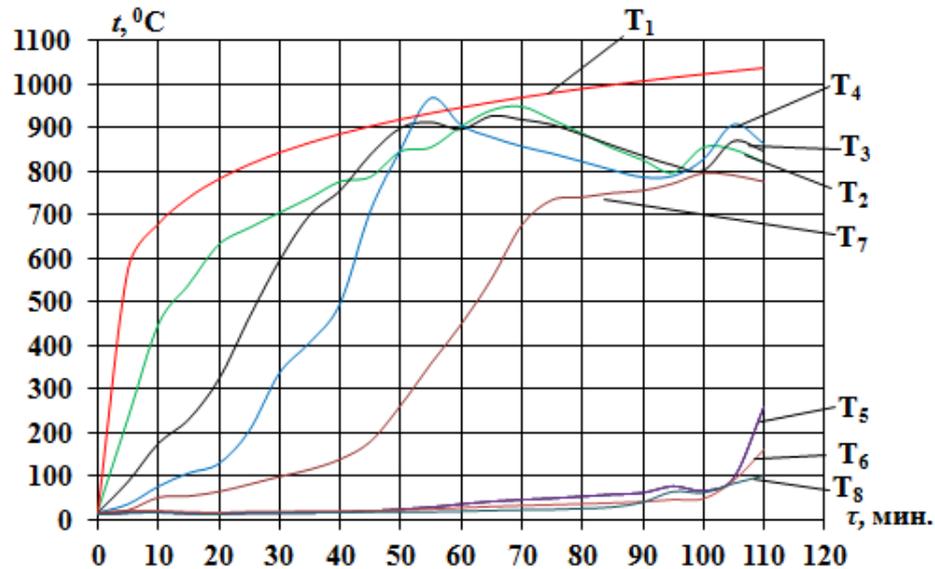


Рисунок 2 – Динамика нарастания температуры в огневой печи (T_1) и на поверхности элементов конструкции системы VI: T_2 - обогреваемой стороне СМЛ 1; T_3 – на тыльной стороне СМЛ1 (обогреваемая сторона СМЛ 2); T_4 – на поверхности теплоизоляции (тыльной стороне СМЛ 2); T_5 – на тыльной стороне теплоизоляции «PENOCOM» (нагреваемой поверхности OSB) ; T_6 – на необогреваемой стороне OSB; T_7 - на обогреваемой стороне стойки; T_8 - на внешней поверхности стойки

Протокол

испытания на установке «Огневая печь»

от «26» мая 2015 г.

Место проведения испытаний: лаборатория кафедры ПБС Академии ГПС МЧС России.

Образец: фрагмент ЛДКрК система №7: СМЛ (0,006) + «PENOCOM» (0,015; $\rho = 140 \text{ кг/м}^3$) + СМЛ (0,006).

На испытаниях присутствовали: Круглов Е.Ю.

Основные характеристики элементов ограждающей ЛДКрК

Наименование материала	Размеры, м	Масса, кг	Плотность, кг/м^3
СМЛ №1	0,3×0,37×0,006	0,704	1057
ТИМ «PENOCOM»	0,27×0,3×0,15	1,710	140
СМЛ №2	0,3×0,37×0,006	0,682	1024
Каркас: сосна	0,3×0,15×0,05	1,120	497

Схема расстановки термопар на образце (рис.1):

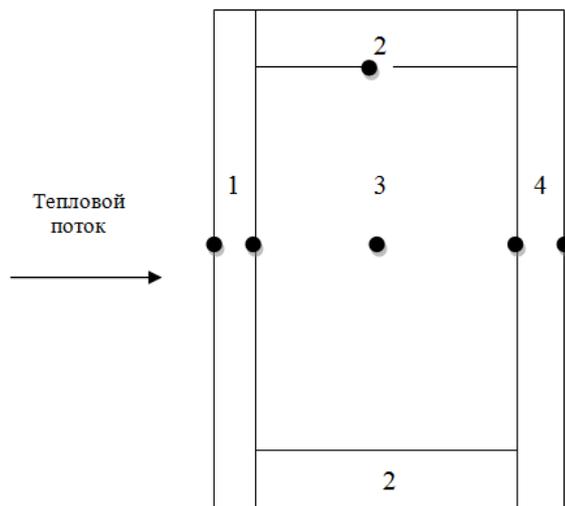


Рисунок 1 – 1 – Облицовочная плита (СМЛ) со стороны огневого воздействия; 2 – деревянные стойки; 3 – теплоизоляция «PENOCOM»; 4 – облицовочная плита СМЛ на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термопар T_n .

Цель проведения испытания:

- Определение температур прогрева ЛДКрК, согласно схемы расстановки термомпар.

Результаты эксперимента на установке «Огневая печь»

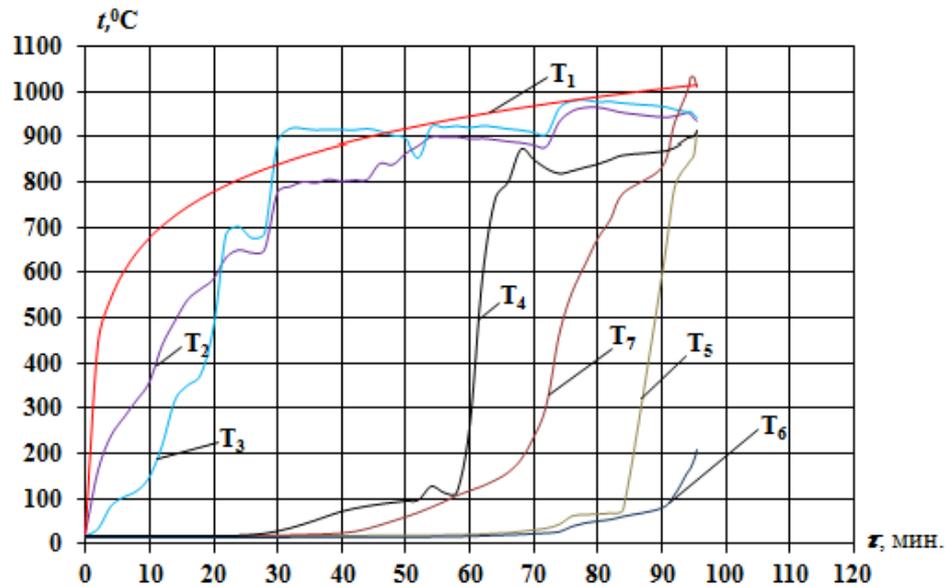


Рисунок 2 – Динамика прогрева элементов ограждающей деревянной конструкции системы VII при стандартном режиме пожара (T₁): T₂ и T₃ – температура на обогреваемой и тыльной поверхности СМЛ1(обогреваемая сторона теплоизоляции «PENOCOM»); T₄ – температура внутри утеплителя «PENOCOM» на расстоянии 75 мм; T₅ – на необогреваемой стороне «PENOCOM»; T₆ - на необогреваемой стороне СМЛ2; T₇ – температура на поверхности стойки со стороны утеплителя

Приложение Б
(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственное предприятие
«ПРОМТЕХНОЛОГИЯ»

460018, г. Оренбург, ул. Терешковой, 22, офис 307, 313
Телефон: +7 (3532) 91-33-38, 27-91-72, +7 (9228) 95-77-11; www.npp-promteh.ru; e-mail: npp-promtech@mail.ru

Исх. № 040-09/16-НПП от «07» сентября 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО НП «Промтехнология»
Г.А. Столповский
«07» сентября 2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук научного сотрудника Учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, майора внутренней службы Круглова Евгения Юрьевича в проектную документацию объекта: «Административное здание по адресу: Республика Казахстан, Актюбинская область, г. Актобе, с. Каргалинское»

Комиссия в составе: директора ООО НП «Промтехнология», кандидата технических наук, доцента Столповского Георгия Александровича, главного инженера ООО НП «Промтехнология», кандидата технических наук, доцента Гарипова Владимира Станиславовича подтверждает, что при разработке специальных технических условий на проектирование объекта «Административное здание по адресу: Республика Казахстан, Актюбинская область, г. Актобе, с. Каргалинское» использовались результаты диссертационного исследования Круглова Е.Ю., а именно:

- значения скорости тепловыделения при горении древесины разных пород в качестве исходных данных при моделировании пожара в зданиях с использованием программного комплекса FDS;

- метод расчета огнестойкости деревянных легких каркасных конструкций с полимерной и неорганической теплоизоляцией.

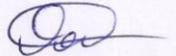
Результаты исследований и особенности поведения при пожаре деревянных конструкций учитывались с целью повышения пожарной безопасности зданий.

Комиссия:

Директор ООО НП «Промтехнология»,
к.т.н., доцент


Г.А. Столповский

Главный инженер ООО НП «Промтехнология»,
к.т.н., доцент


В.С. Гарипов



Система менеджмента качества ООО НП «ПРОМТЕХНОЛОГИЯ» (сертификат соответствия № А.СРТ.СС.140513.01-3859.04 от 13.05.2014 г.) при выполнении работ по инженерным изысканиям, подготовке проектной документации, строительству, реконструкции, капитальному ремонту, объектов капитального строительства, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства, соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2011



**Автономная некоммерческая организация научно-технологический парк
Оренбургского государственного университета «Технопарк ОГУ»**

460018, г.Оренбург, пр.Победы,13, комн. 2127, ИНН 5612025057, юр.рег.№ 04883
телефон/факс: (3532) 91-21-23, 72-91-04; тел.: (3532) 27-11-42; e-mail organ-2003@bk.ru

Исх. №28/17-ТП от « 30 » марта 2017 г.



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор АНО «Технопарк ОГУ»
Чирков Ю.А.
« 30 » марта 2017 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук научного сотрудника Учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, майора внутренней службы Круглова Евгения Юрьевича при проведении строительной экспертизы зданий и сооружений

Комиссия в составе:

- директора АНО «Технопарк ОГУ», доктора технических наук, профессора Чиркова Юрия Александровича;
- руководителя группы проектирования и обследования зданий и сооружений АНО «Технопарк ОГУ», доктора технических наук, профессора Жаданова Виктора Ивановича;
- ведущего инженера группы проектирования и обследования зданий и сооружений АНО «Технопарк ОГУ», кандидата технических наук, доцента Украинченко Дмитрия Александровича

подтверждает, что в научно-исследовательской деятельности АНО «Технопарк ОГУ» использовались результаты диссертационного исследования Круглова Е.Ю., а именно:

– *метод расчёта огнестойкости деревянных лёгких каркасных конструкций с полимерной и неорганической теплоизоляцией.*

Указанные особенности поведения при пожаре деревянных легких каркасных конструкций учитывались с целью повышения пожарной безопасности зданий.

Комиссия:

Директор АНО «Технопарк ОГУ»
д.т.н., проф.

Руководитель ГПОЗС
АНО «Технопарк ОГУ», д.т.н., проф.

Ведущий инженер ГПОЗС
АНО «Технопарк ОГУ», к.т.н., доцент



Ю.А. Чирков

В.И. Жаданов

Д.А. Украинченко



МЧС РОССИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА» НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОБОРОНЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ
СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»**

ОРЕНБУРГСКИЙ ФИЛИАЛ

УТВЕРЖДАЮ

Врио начальника
Оренбургского филиала
ФГБУ ВНИИПО МЧС России
В.Н. Баклыков
« » 2017 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук научного сотрудника Учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России, майора внутренней службы Круглова Евгения Юрьевича в научно-исследовательскую деятельность

Комиссия в составе: Врио начальника Оренбургского филиала ФГБУ ВНИИПО МЧС России Баклыкова В.Н., начальника отдела Безбородова В.И., старшего научного сотрудника Вагенлейтнера Е.В. подтверждает, что в научно-исследовательской деятельности ОФ ФГБУ ВНИИПО МЧС России использовались результаты диссертационного исследования Круглова Е.Ю., а именно:

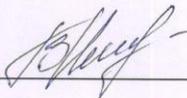
- значения скорости тепловыделения при горении древесины разных пород в качестве исходных данных при моделировании пожара в зданиях с использованием программного комплекса FDS;
- метод расчета огнестойкости деревянных легких каркасных конструкций с полимерной и неорганической теплоизоляцией при стандартном режиме пожара;
- алгоритм защиты деревянных легких каркасных конструкций с применением современных облицовочных материалов, полимерного

пенокомпозита «PENOCOM» в качестве теплоизоляции, а также новых огнезащитных средств.

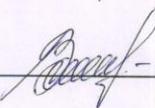
Указанные особенности поведения при пожаре деревянных легких каркасных конструкций учитывались с целью повышения пожарной безопасности зданий.

Комиссия:

Начальник отдела
ОФ ФГБУ ВНИИПО МЧС России


В.И. Безбородов

Старший научный сотрудник
ОФ ФГБУ ВНИИПО МЧС России


Е.В. Вагенлейтнер

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе
кандидат военных наук



М.В. Бедило
2017 г.

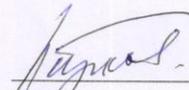
АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук научного сотрудника Учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России, майора внутренней службы Круглова Евгения Юрьевича на тему: «Огнестойкость ограждающих деревянных легких каркасных конструкций с полимерной теплоизоляцией» в учебном процессе Академии ГПС МЧС России

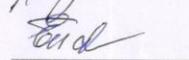
Комиссия в составе: начальника учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, д.т.н., профессора Серкова Бориса Борисовича, доцента кафедры ПБС Бариновой Елены Леонидовны, профессора кафедры ПБС, д.т.н., профессора Сивенкова Андрея Борисовича подтверждает, что результаты диссертационного исследования Круглова Евгения Юрьевича внедрены в учебный процесс кафедры пожарной безопасности в строительстве при подготовке фондовых лекций по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре» на тему: «Деревянные конструкции и их поведение в условиях пожара» и «Расчет огнестойкости деревянных конструкций» в 2016 – 2017 учебном году.

Комиссия:

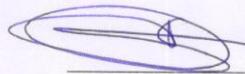
Начальник УНЦ ППБС
д.т.н., профессор

 Б.Б. Серков

Доцент кафедры ПБС

 Е.Л. Баринова

Профессор кафедры ПБС
д.т.н., профессор

 А.Б. Сивенков