

*На правах рукописи*



**Круглов Евгений Юрьевич**

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

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России на кафедре пожарной безопасности в строительстве

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Серков Борис Борисович

Официальные оппоненты: Гаращенко Анатолий Никитович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»

Балакин Вячеслав Михайлович,  
кандидат химических наук, доцент,  
заместитель генерального директора по научной работе ОАО Химическая компания «Нитон»

Ведущая организация: Акционерное общество  
«Научно-исследовательский центр  
«Строительство»

Защита состоится «06» марта 2018 года в «11» час. «30» мин. на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 при Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте: <http://academygps.ru/upload/iblock/e58/e58c020f5811595a27a813f27d80aafb.pdf>

Автореферат диссертации разослан «29» декабря 2017 г.

ученый секретарь  
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Применение натуральной древесины для строительства зданий и сооружений разного назначения имеет многовековую историю. Горючесть и высокая пожарная опасность древесины надолго ограничили ее 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 РФ 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. ЛДКрК являются многослойными и состоят из деревянного каркаса и обшивок (облицовочных плит), пространство между ними может быть пустым или заполнено теплоизоляционными материалом (ТИМ).

Важной проблемой в строительстве деревянных зданий и сооружений каркасного типа является обеспечение не только соответствующего 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 составляющих 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., Babrauskas 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., Dietenberger 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 горении 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 - стекломагнетитовых листов и OSB – ориентированная стружечная плита (oriented strand board)) замена базальтоволоконной 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 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, прогнозировании нарастания опасных факторов пожара в помещениях деревянных каркасных зданий разного 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 базальтоволоконистой 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 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 научных работ, из них 10 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

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

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Указаны объекты исследования и основные положения, выносимые на защиту; приведена информация об апробации работы.

**В первой главе** представлен анализ новых направлений в строительстве зданий и сооружений с применением древесины и материалов на ее основе. Уделено внимание научным данным из литературных источников о применении современных облицовочных и теплоизоляционных материалов в качестве элементов несущих и ограждающих конструкций при строительстве малоэтажных деревянных зданий и сооружений легкого каркасного типа. Выявлено усиление тенденции к применению полимерных теплоизоляционных материалов на основе термореактивных смол. Отмечена недостаточность базовых данных о важнейших свойствах новых материалов, необходимых для прогнозирования их влияния на огнестойкость конструкций.

**Во второй главе** описаны объекты и методы исследования. Использованы образцы древесины хвойных и лиственных пород, применяемых в качестве элементов ограждающих деревянных каркасных конструкций. В качестве огнезащитных средств для древесины использовали пропиточный состав «КСД-А», а также покрытие вспенивающегося типа на основе модифицированных полисахаридов растительного сырья (МПС).



Образцы с площадью поверхности  $0,37 \times 0,30$  м, моделирующие фрагменты несущих ограждающих легких деревянных каркасных конструкций (перегородок, стен), представляли собой трех- и четырехслойные системы с разной комбинацией обшивок и теплоизоляции. В качестве теплоизоляции исследовали образцы минеральной («Rockwool Light») и полимерной («PENOCOM») теплоизоляции с разной толщиной и плотностью.

Характеристики тепловыделения при горении материалов изучали с помощью стандартного проточного кон-калориметра OSU марки HRR-3 фирмы Atlas (США). Образцы размером  $150 \times 150 \times 10$  мм испытывали в вертикальном положении при плотности внешнего радиационного теплового потока  $20\text{--}52$  кВт/м<sup>2</sup>. Механизм и макрокинетические параметры пиролиза и термоокислительного разложения пенокомпозита «PENOCOM» определяли по данным термического анализа, используя приборы Mettler и DuPont 9900 с термовесами TGA-951 (США). Для определения формоустойчивости и термоусадки теплоизоляции в динамическом режиме нагрева до  $950$  °С использовали муфельную печь.

Для определения фактического предела огнестойкости фрагментов ограждающих конструкций при стандартном режиме пожара применяли лабораторную установку «Огневая печь» (кафедра пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России). Теплотехнический расчет прогрева образцов ограждающих конструкций проводили методом конечных элементов с привлечением программного комплекса ANSYS Mechanical.

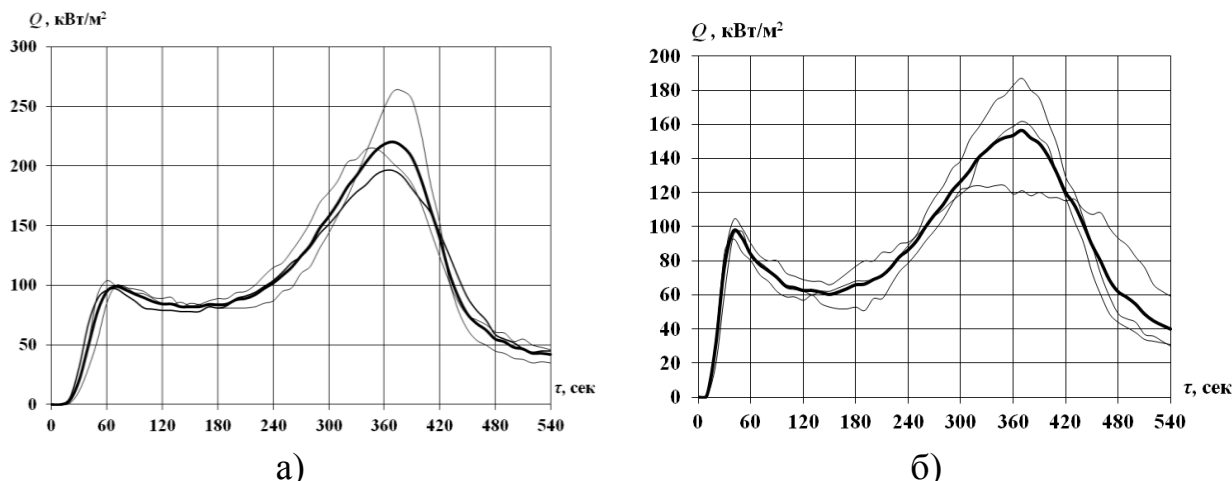
**Третья глава** посвящена изучению пожароопасных свойств деревянных элементов ограждающих каркасных конструкций. Основное внимание уделено определению характеристик тепловыделения при горении древесины хвойных пород, используемых для изготовления элементов каркаса сооружений, а также некоторых лиственных разновидностей, применяемых в качестве обшивок и облицовочных материалов. Оценено влияние двух современных огнезащитных пропиточных составов на полученные показатели.

Характеристики тепловыделения при горении строительных материалов являются ключевыми показателями при прогнозировании развития пожара в помещении. Они позволяют оценить изменение размера очага пожара, скорость распространения пламени по материалу, возможность общей вспышки, нарастание опасных факторов пожара и пр., используются для классификации строительных материалов [1, 2, 3].

Применение стандартного кон-калориметра OSU (США) позволяет в одном эксперименте определить комплекс показателей тепловыделения при горении древесины: время задержки воспламенения ( $\tau_b$ ), максимальную скорость тепловыделения ( $СТВ_{\text{макс}}$ ) и время ее достижения ( $\tau_{\text{макс}}$ ), общее тепловыделение за определенный период горения ( $ОТВ_{\text{мин}}$ ), скорость нарастания интенсивности (показатель FIGRA – Fire Growth Rate).

На рисунке 1 в качестве примера представлены кривые изменения скорости тепловыделения при горении образцов древесины дуба и сосны с влажностью 4,3 и 6,0 % соответственно при воздействии внешнего радиационного теплового

потока плотностью 20 кВт/м<sup>2</sup>.



а) б)  
Рисунок 1 – Изменение скорости тепловыделения при горении разных пород древесины: а) дуб; б) сосна

Как видно из рисунка 1, изменение скорости тепловыделения в ходе эксперимента характеризуется ярко выраженной двухстадийностью процесса, связанной с обугливанием древесины и переходом от пламенного горения образцов к гетерогенному, тлеющему процессу.

В таблице 1 приведены результаты определения характеристик тепловыделения древесины разных пород, используемой в качестве каркаса ограждающих конструкций, а также в качестве отделочных материалов, в зависимости от плотности внешнего теплового потока.

Таблица 1 – Влияние плотности внешнего радиационного теплового потока на характеристики тепловыделения древесины, используемой в качестве каркаса и отделочных материалов

| Образец     | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $q_e$ , кВт/м <sup>2</sup> | $\tau_{1всп}$ , с | $\tau_{1макс}$ , с | СТВ <sub>1макс</sub> , кВт/м <sup>2</sup> | $\tau_{2макс}$ , с | СТВ <sub>2макс</sub> , кВт/м <sup>2</sup> | ОТВ <sub>2мин</sub> / ОТВ <sub>9 мин</sub> , кВт·мин/м <sup>2</sup> |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|---|--------------------|---|---|
| 1           | 2                          | 3                          | 4                 | 5                  | 6   | 7                  | 8   | 9   |
| 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                         | 5,5               | 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   |

При увеличении плотности внешнего радиационного теплового потока при горении древесины снижается время задержки воспламенения, увеличиваются значения максимальной скорости тепловыделения, а время ее достижения снижается как на стадии пламенного процесса, так и гетерогенного горения, возрастает общее тепловыделение. 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 ( $Q_{эф}$ ).

Сравнение со значениями низшей теплоты полного сгорания дает возможность определить коэффициент полноты сгорания древесины на каждом этапе.

Эффективная теплота сгорания зависит от полноты сгорания материала, на которую влияет в значительной степени толщина и качество обугленного слоя.

Повышение влажности древесины, независимо от ее разновидности, вызывает снижение скорости тепловыделения и увеличение времени достижения ее максимального значения.

Большое влияние на характеристики тепловыделения оказывают условия воздействия внешнего радиационного теплового потока на материал. В частности, в режиме самовоспламенения (в отсутствие локального источника зажигания) время задержки возникновения пламенного горения древесины увеличивается почти в 1,5–2 раза, почти в 2 раза увеличивается критический тепловой поток самовоспламенения по сравнению с пилотным воспламенением.

Наблюдаемые различия в характеристиках тепловыделения древесины разных пород обусловлены различием в их структуре и химическом составе, соотношении основных компонентов древесной субстанции (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы и экстрактивных веществ). Плотность сухой древесины является отражением ее морфологической структуры и химического состава. При возрастании плотности (объемной массы) древесины увеличивается время задержки воспламенения и самовоспламенения образцов, изменяются другие характеристики тепловыделения.

Полученные в работе результаты позволяют спрогнозировать влияние разновидности древесины на наступление общей вспышки ( $\tau$ ) 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), с использованием данных круговых испытаний большого числа облицовочных материалов с целью корреляции результатов мало- и крупномасштабных огневых испытаний:

$$\tau = \left( \frac{t_{ign} a \sqrt{\rho}}{A} \right) + b, \text{ с.}, \quad (1)$$

где  $t_{ign}$  – время задержки воспламенения образцов при  $q_e = 20 \text{ кВт/м}^2$  в конкалориметрическом тесте, с;  $\rho$  – плотность древесины,  $\text{кг/м}^3$ ;  $A$  – общее тепловыделение за период пламенного горения при  $q_e = 52 \text{ кВт/м}^2$  (соответствует

первому пику на кривой скорости тепловыделения  $Q_{T_{2\text{мин}}}$ ), Дж/м<sup>2</sup>;  $a$  и  $b$  – константы,  $a = 2,76 \times 10^6$  Дж/(кг м)<sup>1/2</sup>;  $b = -46$  с. Значения констант даны с учетом облицовки трех стен и потолка помещения комнатного теста, обеспечивают высокий коэффициент корреляции ( $R = 0,98$ ) с результатами кон-калориметрии.

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 у древесины лиственных пород.

При 60-минутной экспозиции деревянных элементов в огневой печи по стандартному температурному режиму пожара, когда средняя плотность теплового потока достигает 92,6 кВт/м<sup>2</sup>, толщина обугленного слоя на поверхности хвойной древесины составит 33–39 мм, а на поверхности березы или дуба – 26,6 и 25,8 мм. При этом средняя скорость обугливания древесины ели равна 0,64, а дуба – 0,43 мм/мин. Скорость обугливания древесины изменяется со временем теплового воздействия и зависит от плотности теплового потока:  $\beta \sim q_e^{0,5} / \rho t^{0,3}$ .

По характеристикам тепловыделения определено влияние двух огнезащитных систем: 1 – пропиточного состава «КСД-А» (марка – 1) и 2 – вспучивающегося пленкообразующего состава МПС на основе модифицированных полисахаридов крахмала.

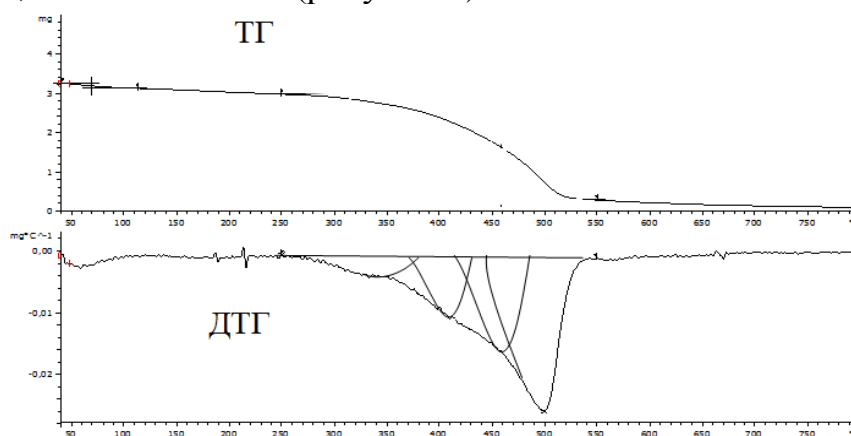
По сравнению с пропиточным составом «КСД-А» состав на основе МПС обнаруживает более высокую эффективность огнезащитного действия, благодаря образованию толстого вспененного коксового слоя с высокими теплоизолирующими свойствами. Так, нанесение состава МПС на поверхность древесины сосны и ели приводит к снижению общего тепловыделения  $Q_{T_{2\text{мин}}}$  в 1,8 и 3,2 раза соответственно. При нанесении же его 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  $Q_{T_{2\text{мин}}}$  снижается всего в 1,5–2 раза. Огнезащитные средства значительно снижают темп нарастания интенсивности тепловыделения (FIGRA) как на стадии пламенного, так и тлеющего горения древесины.

**Четвертая глава** посвящена определению механизма и макрокинетических параметров пиролиза и термоокислительного разложения полимерной теплоизоляции – пенокомпозиата «PENOCOM», а также анализу ее формоустойчивости в сравнении с другими видами полимерной и неорганической теплоизоляции [4].

ТГ и ДТГ кривые термоокислительной деструкции (ТОД) образца пенокомпозиата с  $\rho = 140$  кг/м<sup>3</sup> получены при нагревании с постоянной скоростью подъема температуры 5–20 град/мин. 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. При достижении температуры 800 °С наблюдается практически полная потеря массы образца.

При рассмотрении ДТГ кривой ТОД пенокомпозита можно отметить ее сложный характер. 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 °С, 411 °С, 456 °С и 498 °С (рисунок 2).



**Рисунок 2 – ТГ и ДТГ кривые термоокислительного разложения пенокомпозита «PENOCOM» при его нагревании со скоростью 10 град/мин**

Наблюдаемый полихроматический характер ТОД пенокомпозита «PENOCOM», по-видимому, обусловлен особенностями его морфологической структуры, последовательным включением в процесс окисления открытых макро-, микроячеек, затем замкнутых микроячеек и, наконец, окислением образовавшегося пенококса с большой площадью поверхности.

В отсутствие кислорода в окружающей среде пиролиз пенокомпозита 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, основан на уравнении:

$$d\alpha / dT = A \exp(-E/RT) f(\alpha) / \beta \quad (2)$$

или после разделения переменных:

$$d\alpha / f(\alpha) = (A/\beta) \exp(-E/RT) dT, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – степень конверсии,  $T$  – температура, К;  $A$  – предэкспоненциальный множитель;  $E$  – энергия активации;  $\beta$  – скорость нагрева, град/мин;  $f(\alpha)$  – функция, определяющая физический механизм разложения, индивидуальный закон скорости разложения вещества в зависимости от степени конверсии:

$$\alpha = (m_0 - m_t)/(m_0 - m_k), \quad (4)$$

где  $m_0$ ,  $m_t$ ,  $m_k$  – масса вещества в начальный, текущий и конечный момент времени разложения. Интеграл левой части уравнения (3) обозначают символом  $g(\alpha)$  и называют интегрированной функцией конверсии.

Функции  $f(\alpha)$  или  $g(\alpha)$  для гетерогенных реакций описывают физическую способность молекулярных частиц или функциональных групп молекул вступать в контакт друг с другом, отражают трансляционный характер процесса.

Следующее уравнение в координатах:  $\log [g(\alpha)/T^2] - 1/T$  позволяет оценить макрокинетические параметры разложения:

$$g(\alpha) = \{ART^2 / \beta (E + 2RT)\} \exp(-E/RT). \quad (5)$$

Для реалистичного описания кинетики разложения пенокомпозита «PENOCOM» необходимо определить соответствующий механизм гетерогенной реакции разложения, т.е. функцию  $g(\alpha)$ . Каждая стадия разложения пенокомпозита в рассматриваемых температурных интервалах анализировалась как целая ТГ кривая с  $\alpha$  от 0 до 1. Функцию  $g(\alpha)$  определяли по методу Криадо, используя значения приведенной скорости разложения, т.е. отнесенной к скорости полураспада вещества при  $\alpha = 0,5$ :  $V = (T/T_{0,5})^2 (d\alpha/dt) / (d\alpha/dt)_{0,5}$ . Ее определяли 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 результаты сравнивали с табулированными значениями приведенных скоростей при  $\alpha = 0,75$ , а также значениями  $\alpha$ , соответствующими максимальной приведенной скорости разложения. Полученные в работе результаты позволяют уверенно считать, что все стадии ТОД пенокомпозита (явные и скрытые) осуществляются по диффузионному механизму D3 в сферической геометрии.

Таким образом, интегральная функция конверсии ТОД пенокомпозита описывается уравнением:  $g(\alpha) = [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$ .

Энергия активации ТОД пенокомпозита и предэкспоненциальный множитель первой и четвертой стадий равны соответственно:  $E_1 = 122,38$  кДж/моль;  $A_1 = 1,9 \cdot 10^9$  мин<sup>-1</sup> и  $E_4 = 254,9$  кДж/моль;  $A_4 = 1,07 \cdot 10^{18}$  мин<sup>-1</sup>.

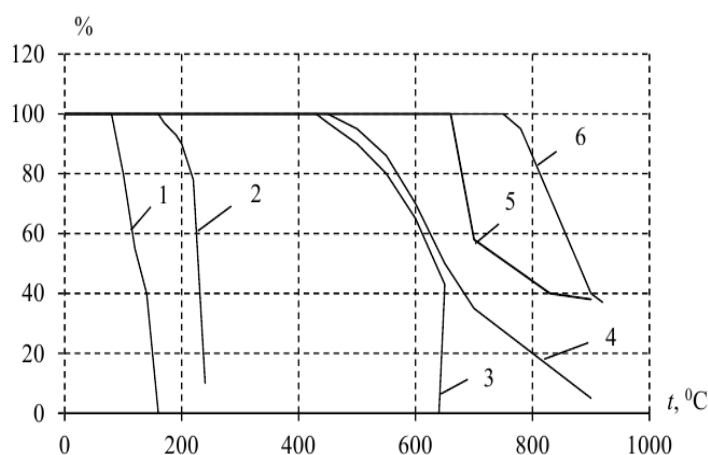
Обычный метод мультиплетной скорости нагрева дает значения энергии активации для первой и четвертой стадий ТОД пенокомпозита  $E_1 = 120 \pm 3$  кДж/моль и  $E_4 = 253,6 \pm 3$  кДж/моль, практически совпадающие с выше указанными.

Совершенно другие закономерности наблюдаются при разложении пенокомпозита «PENOCOM» в инертной среде. 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 °С пиролиз протекает по механизму  $R(n = 1)$  нуклеации – зарождению и росту ядер по закону случая. Интегрированная функция конверсии описывается уравнением:  $g(\alpha) = [-\ln(1 - \alpha)]^{n=1}$ . Вторая стадия термического разложения пенокомпозита при нагревании в интервале 430–775 °С также протекает по

механизму  $R(n = 1)$ .

Анаморфозы в координатах  $\log[g(\alpha)/T^2] - 1/T$  с учетом контролирующего механизма пиролиза дают следующие значения макрокинетических параметров:  $E_1 = 78,3 \pm 3$  кДж/моль;  $A_1 = 4,7 \cdot 10^{19}$  мин<sup>-1</sup> и  $E_2 = 72,3 \pm 3$  кДж/моль;  $A_2 = 4,3 \cdot 10^{15}$  мин<sup>-1</sup>.

Результаты испытания формоустойчивости и линейной термоусадки при динамическом нагреве со скоростью 12 град/мин до 900 °С разных теплоизоляционных материалов представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Влияние температуры на линейную усадку ТИМ:**

**1 – ПСБ-С25 и ППС-10; 2 – ППУ\* ( $\rho = 30$  кг/м<sup>3</sup>);**

**3 – стекловолоконистая плита ( $\rho = 12$  кг/м<sup>3</sup>); 4\* – пенокомпозит «PENOCOM» ( $\rho = 140$  кг/м<sup>3</sup>); 5 – базальтовая волокнистая теплоизоляция ( $\rho = 38$  кг/м<sup>3</sup>);**

**6\* – «Rockwool Light» ( $\rho = 36$  кг/м<sup>3</sup>). \*Нагрев со скоростью 12 °С/мин на воздухе**

ПБС-С25 и ППУ рано теряют свою форму в результате плавления. Неплавкий, коксообразующий, трудногорючий и не тлеющий после удаления источника нагрева полимерный пенокомпозит «PENOCOM» не уступает по своей формоустойчивости минеральной стекловате. Усадка последней происходит в результате плавления. Усадка пенокомпозита – в результате выгорания на воздухе пенококса. Самым высокоплавким теплоизоляционным материалом является «Rockwool Light Scandic». По аналогии с ТИМ «PENOCOM» определены механизм и кинетические параметры разложения двух промышленных образцов самозатухающего пенополистирола ПСБ-С25 и ППС-10. Эти ТИМ на воздухе и в инертной среде эндотермически разлагаются после плавления в одну стадию по механизму нуклеации R1. Энергия активации пиролиза ( $E_{эф} = 241,7$  кДж/моль) самозатухающего ПСБ-С25 близка к  $E_{эф}$  реакции деполимеризации полимера.

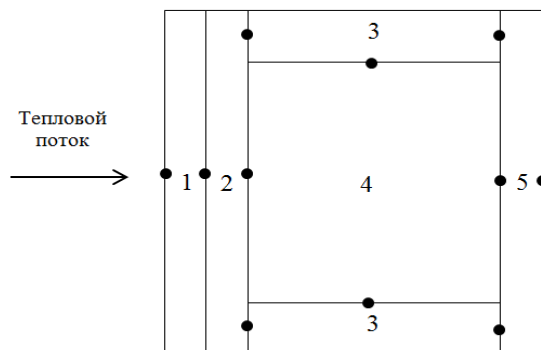
**В пятой главе** приведены результаты исследований при стандартном температурном режиме пожара огнестойкости ограждающих конструкций, моделирующих фрагменты стен в деревянных зданиях легкого каркасного типа. Выявились факторы, влияющие на фактический предел огнестойкости конструкций, а также проводилась оценка вкладов в общую огнестойкость отдельных элементов конструкций, а именно – разных типов облицовочных плит и теплоизоляционных материалов. Предел огнестойкости ограждающих

деревянных конструкций определяли по признакам EI: времени потери целостности (E) и теплоизолирующей способности (I – время достижения критической температуры 180 °С на необогреваемой стороне конструкции). Вклад в огнезащиту каждого слоя ограждающей конструкции оценивали по методике, изложенной в европейском стандарте. Анализ проводили по температурным кривым в предположении, что начало обугливания древесины и материалов на ее основе (OSB) возможно после достижения на обогреваемой стороне древесины или полимерной теплоизоляции температуры 270 °С. Фактический предел огнестойкости ограждающей конструкции равен сумме временных вкладов ее составляющих элементов:

$$P_{\phi} = \sum \tau_i. \quad (6)$$

При проектировании предел огнестойкости ограждающих каркасных конструкций рассчитывают по аддитивному методу 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 [5,6,7].

Проведено испытание семи систем ограждающих деревянных конструкций с разной комбинацией облицовочных и теплоизоляционных материалов. Схема расположения элементов четырехслойной конструкции и локация температурных измерений (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Схема расположения элементов ограждающей деревянной каркасной конструкции и локация температурных измерений:**

- 1, 2 – облицовочные плиты со стороны огневого воздействия; 3 – деревянные стойки; 4 - теплоизоляция; 5 – облицовочная плита на обратной стороне конструкции; ● - локация спаев термодатчиков  $T_n$**

Анализ результатов приводит к выводу, что большое влияние на огнестойкость конструкций имеют первые слои облицовки со стороны огневого воздействия (таблица 2). Облицовки из негорючего материала СМЛ, неразрушающегося до конца воздействия пожара, заметно повышают предел огнестойкости. Вклад облицовочного материала на необогреваемой стороне конструкции довольно мал. Зазоры, свободные полости, металлические узлы соединения, уменьшение толщины деревянных элементов каркаса отрицательно



сказываются на огнестойкости ограждающих конструкций системы II–III. Сравнение пределов огнестойкости систем конструкций с базальтоволокнутой и полимерной теплоизоляцией (IV–VII) указывает на перспективность применения пенокомпозита «PENOCOM».

В таблице 2 приведены результаты огневых испытаний исследуемых систем ограждающих деревянных конструкций, а также результаты оценки вкладов отдельных элементов в огнестойкость конструкции по EN 1995–1–2:2004.

Таблица 2 – Огнестойкость ограждающих легких деревянных каркасных конструкций

| № системы | № Слоя | Элементы конструкции<br>( $\delta = \text{м}; \rho = \text{кг/м}^3$ ) | $\Pi_{\phi} = \sum \tau_i$<br>мин. | Вклад в огнестойкость,<br>(мин) |          |          |          |
|-----------|--------|---|------------------------------------|---------------------------------|----------|----------|----------|
|           |        |   |                                    | $\tau_1$                        | $\tau_2$ | $\tau_3$ | $\tau_4$ |
| 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 (0,05; $\rho = 430$ )                                   |                                    |                                 |          |          |          |
| 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; $\rho = 497$ )                                   |                                    |                                 |          |          |          |

По температурным измерениям среды в огневой печи и на поверхности элементов конструкции VII проведена оценка изменения при повышении температуры коэффициентов теплопроводности СМЛ и пенокомпозита «PENOCOM». Рассчитана  $\lambda_{\text{пенококса}} = f(T)$ . Из-за образования пенококса у конструкций с указанной теплоизоляцией приведенное термическое сопротивление при изменении температуры от 20 до 470 °С снижается в 1,6–1,8 раза, тогда как с базальтовой теплоизоляцией более чем в 3 раза, этот факт объясняет положительный эффект полимерной ТИМ на огнестойкость ОЛДКрК до его разложения.

**Шестая глава** посвящена математическому моделированию теплопередачи в ограждающих ЛДКрК с облицовочными материалами и полимерной теплоизоляцией нового поколения, а также теплотехническому расчету огнестойкости конструкций при стандартном режиме пожара [8]. Типичная схема теплопередачи через ограждающую каркасную конструкцию показана выше (рисунок 4).

В работе для моделирования теплопередачи в ограждающих конструкциях с целью оценки их огнестойкости по признакам целостности и теплоизолирующей способности (ЕІ) использованы дифференциальные уравнения сохранения энергии и массы в системе, в предположении одномерного переноса тепла и продуктов разложения. Рассмотрены следующие физико-химические процессы, протекающие в отдельных элементах исследуемых несущих ограждающих конструкций и влияющие на теплопередачу. Первый слой СМЛ со стороны огневого воздействия имеет высокую термостойкость. Полагаем, что он не подвергается термическому разложению. В слое минеральной теплоизоляции могут протекать реакции дегидратации, процессы испарения воды и конденсация, фильтрационный массоперенос пара и воды через пористый материал. Слой полимерной теплоизоляции при нагревании выше определенной температуры ( $T_{np}$ ) разлагается с выделением газообразных летучих продуктов и образованием карбонизованного остатка. Текущая плотность ( $\rho$ ) пенокомпозита с учетом его карбонизации, выхода кокса ( $K$ ) и усадки ( $\gamma$ ) соответствует уравнению:

$$\rho = \rho_0[1 - \alpha(1 - K)]/(1 - \gamma),$$

где  $\alpha$  – степень конверсии.

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  $k$ -фазе).

2. Пиролиз твердой матрицы является многостадийным с соответствующими кинетическими параметрами стадий. Выход продуктов пиролиза зависит от давления в пористой среде (закон Дарси). Из-за усадки ТИМ разной природы в результате плавления или «выгорания» пространство между элементами конструкции и теплоизоляцией становится частично незаполненным. 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 пустой полости между поверхностями элементов конструкции зависит от угловых коэффициентов излучения.

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

1. Уравнение сохранения энергии:

$$(1 - \varphi)\rho'c_p \partial T/\partial t = \partial/\partial x(\lambda \partial T/\partial x) + m''c_p'' \partial T/\partial x - L_v R. \quad (7)$$

2. Уравнение массопереноса продуктов термического разложения

ТИМ:

$$C_m \partial p/\partial t = \partial/\partial x(\lambda_m \partial p/\partial x) + \partial/\partial x(K_D \partial p/\partial x) + R. \quad (8)$$

Начальные условия для уравнения сохранения энергии (5) для всех элементов конструкции и уравнения (6):

$$T_{t=0} = T_0; p_{t=0} = p_0. \quad (9)$$

Граничное условие на обогреваемой поверхности ограждающей конструкции:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_f(T_f - T_{СМЛ}) + \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_{СМЛ}^4). \quad (10)$$

Граничное условие на необогреваемой стороне ограждающей конструкции:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_e(T_x - T_e) + \varepsilon\sigma(T_x^4 - T_e^4). \quad (11)$$

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

$$T|_{x_{гр-0}} = T|_{x_{гр+0}}; \quad (12)$$

$$-\lambda(\partial T/\partial x)|_{x_{гр-0}} = -\lambda(\partial T/\partial x)|_{x_{гр+0}}. \quad (13)$$

При усадке теплоизоляции и возникновении пустого пространства между СМЛ и теплоизоляцией со стороны огневого воздействия должны быть учтены условия на границе СМЛ и полости, а также на границе полости и поверхности теплоизоляции (с угловыми коэффициентами излучения поверхностей, ограждающих полость).

Условие на границе поверхности СМЛ и полости может быть описано уравнением:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_c(T_{СМЛ} - T_c) + F_{12} \varepsilon\sigma(T_{СМЛ}^4 - T_{ТИМ}^4). \quad (14)$$

Соответственно, условие на границе полости и поверхности теплоизоляции:

$$-\lambda(\partial T/\partial x) = \alpha_c(T_c - T_{ТИМ}) - F_{21} \varepsilon\sigma(T_{ТИМ}^4 - T_{СМЛ}^4). \quad (15)$$

Рассматриваемой системе ограждающей конструкции присуще свойство взаимного 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, ограждающей полость, равна 1.

В приведенных выше уравнениях с граничными условиями приняты следующие обозначения:  $\varphi$  – пористость;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_p$  – теплоемкость;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $p$  – давление;  $L_v$  – энтальпия газификации;  $m''$  – массовая скорость фильтрации пиролизного газа;

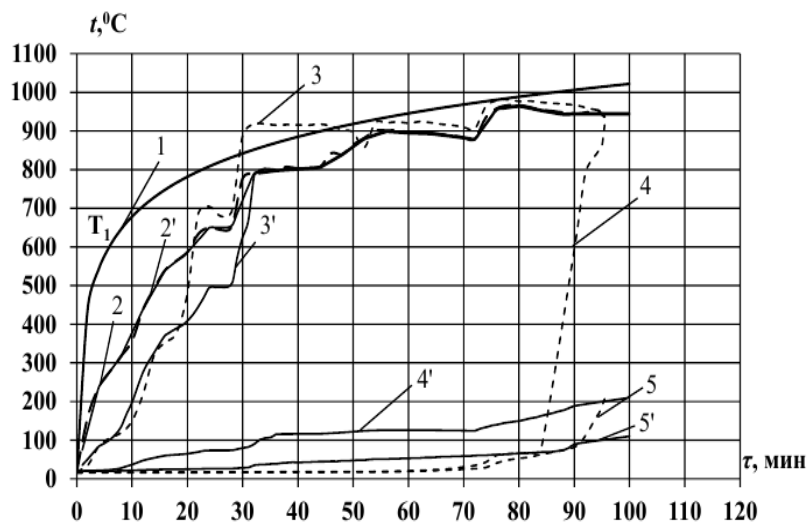
$\alpha$  – степень превращения при пиролизе;  $R = da/dt$  – скорость превращения (газовыделения при пиролизе);  $\alpha_i$  – коэффициент теплообмена;  $\varepsilon$  – степень черноты;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $C_m$  – емкость пористого материала по отношению к газам пиролиза с молекулярной массой  $M$ :  $C_m = M \varphi/RT$ ;  $\lambda_m$  – коэффициент молярного переноса пиролизного газа:  $\lambda_m = \varphi k/\nu$ , где  $k$ ,  $\nu$  – 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 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.

Для расчета строится геометрическая модель образца конструкции, которая свободно разбивается на сетку конечных элементов с шагом 1 мм.

При расчете теплопередачи через ограждающую конструкцию приняты теплофизические характеристики СМЛ и пенокомпозиата, полученные ранее по экспериментальным результатам до момента начала разложения теплоизоляции. Теплопроводность образующегося далее пенококса принята равной 0,070 Вт/м·К. Коэффициент теплообмена для условий в используемой огневой маломасштабной печи принят постоянным  $a_f = 15$  Вт/м<sup>2</sup>К.

На рисунках 5 и 6 показаны результаты расчета температуры на поверхности элементов конструкции VII и IV, в сравнении с экспериментальными значениями.

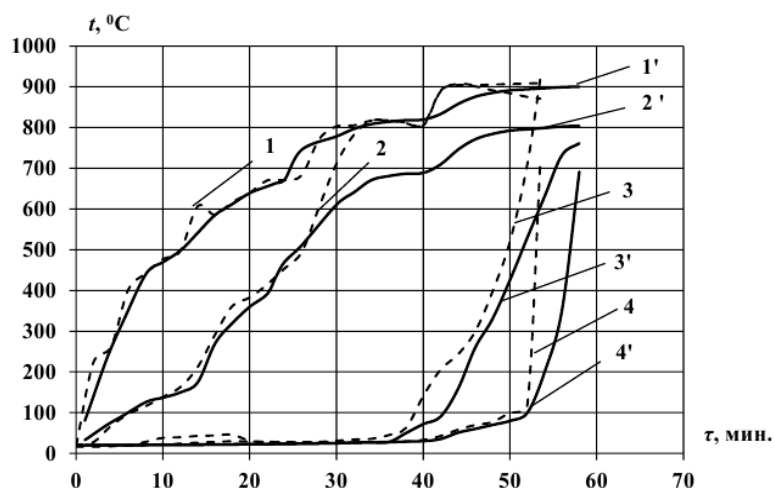


**Рисунок 5 – Температурно-временные кривые прогрева элементов ограждающей конструкции VII при стандартном режиме пожара:**

- 1 – температура в печи; 2 - на внешней поверхности СМЛ № 1;**
- 3 – с тыльной стороны поверхности СМЛ № 1 (на поверхности теплоизоляции);**
- 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 VII 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 ее 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.

Расчет конструкции V показал, что внешняя облицовка двумя слоями СМЛ замедляет нагрев полимерной теплоизоляции. Температура начала ее разложения в этом случае достигается почти на 10 мин. позже, чем при облицовке одним слоем. Общий характер последующего изменения температуры на межфазной поверхности СМЛ №2 и теплоизоляции сохраняется. Расчет фиксирует естественную аккумуляцию тепла на поверхности теплоизоляции, но заметна явная недооценка реальных термохимических процессов, протекающих в полимерной теплоизоляции при стандартном огневом действии. Это приводит к некоторому завышению расчетного предела огнестойкости конструкции по признаку EI. На последующем этапе математического моделирования огнестойкости конструкций с полимерной теплоизоляцией «PENOCOM» будет учтено более сложное ее поведение. С помощью программы ANSYS Mechanical проведен для сравнения расчет огнестойкости ограждающей деревянной каркасной конструкции IV с теплоизоляцией «Rockwool» такой же толщины, как и полимерной (рисунок 6).



**Рисунок 6 – 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. Можно полагать, что в случае использования «Rockwool» теплоизоляции вклад физико-химических процессов в ТИМ в предел огнестойкости конструкции не велик.

Таким образом, подтверждено, что замена плиты «Rockwool Light» 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 °С 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 карбонизирующегося 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 ее 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 семи 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 ее 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 °С и ТИМ «PENOCOM» при нагревании до начала его разложения. Оценены значения приведенного термического сопротивления отдельных элементов и в целом ограждающих конструкций  $R^{пр}$ , (м<sup>2</sup>К/Вт). Высокая эффективность ТИМ «PENOCOM» 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.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях из перечня ВАК:**

1. 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.

2. 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.

3. Круглов, Е.Ю. Влияние разновидности и продолжительности эксплуатации древесины на время наступления опасных факторов пожара для объектов с деревянными конструкциями [Текст] / Е.Ю. Круглов, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, С.Б. Сивенков // Промышленное и гражданское строительство. –

2012. – № 7. – С. 56–58.

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

5. 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: интернет-журнал. – 2015. – Вып. 2 (60). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/42-02-15.ttb.pdf> (дата обращения: 05.04.2017).

6. Шутов, Ф.А. Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозита «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.

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

8. Круглов, Е.Ю. Моделирование теплопередачи в ограждающих деревянных легких каркасных конструкциях при стандартном режиме пожара // Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, Ф.А. Шутов// Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – 2016. – Вып. 4 (68). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/27-04-16.ttb.pdf> (дата обращения: 16.02.2017).

#### **Международные рецензируемые журналы:**

9. Kruglov, E.Yu. Thermal gravimetric analysis of decomposing polymeric Penocom foamed composite [Электронный ресурс] // А.А. Kobelev, F.A. Shutov, R.M. Aseeva // Polymer Science, Series D, 2017, vol. 10, No. 1, p. 74–78. URL: <https://doi.org/10.1134/S1995421217010142> (дата обращения: 16.03.2017).

#### **Остальные публикации по теме диссертации:**

10. Круглов, Е.Ю. Оценка вклада в огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций ее составляющих элементов [Текст] / Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Материалы V Международной конференции-школы по химии и физикохимии олигомеров. – Волгоград, 2015. – С. 248.

11. Круглов, Е.Ю. Огнестойкость ограждающих легких каркасных конструкций с полимерной теплоизоляцией [Текст] // Материалы V Международной научно-практической конференции «Ройтмановские чтения» – Москва. – 2017. – С. 32–36.

12. Круглов, Е.Ю. Модель для расчета огнестойкости ограждающей деревянной конструкции с полимерной теплоизоляцией [Текст] / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Сборник материалов VIII Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести». – Алматы, – 2017. – С. 76–82.

Подписано в печать 26.12.2017. Формат 60x84/1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ №

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина,4