

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра физической и вычислительной механики

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ПОСЕЛКИ
И ГОРОДА**

Учебно-методическое пособие

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2018

РАССМОТРЕНО И ОДОБРЕНО методической комиссией
механико-математического факультета

Протокол от 21 июня 2018 г. № 4

Председатель комиссии Е.А. Тарасов

В пособии излагаются результаты физического и математического моделирования воздействия природных пожаров на деревянные строения, полученные на кафедре физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

При физическом моделировании этих пожаров применялись как традиционные контактные методы измерений с использованием термопар, так и современные – бесконтактные методы ИК-диагностики с использованием оригинальной методики, разработанной в Томском государственном университете, позволяющей определять поля температуры в потоке реагирующих газообразных продуктов компонент, образующих пламя. Эта методика является новым подходом в задачах механики жидкости, газа и плазмы для диагностики пламен. Для математического моделирования природных пожаров применялись законы сохранения массы, количества движения и энергии, а также разностная схема, полученная на основе итерационно-интерполяционного метода.

Пособие предназначено для магистрантов механико-математического факультета ТГУ по программе подготовки «Механика жидкости, газа и плазмы» (направление 01.04.03 – механика и математическое моделирование), бакалавров биологического института ТГУ (направление 35.03.01 – Лесное дело), магистрантов биологического института ТГУ (направление 35.04.01 – Лесное дело), а также для аспирантов по специальностям 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

СОСТАВИТЕЛИ:

к.ф.-м.н. Д.П. Касымов,

д.ф.-м.н. Е.Л. Лобода, д.т.н. А.С. Якимов

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что во многих случаях в результате действия лесных пожаров на отдельные деревянные постройки в поселках и городах, возникают пожары [1]. Несмотря на все принимаемые меры, природные пожары наносят огромный ущерб инфраструктуре района, подверженного воздействию огненной стихии.

Многочисленные теоретические [2–4] и экспериментальные исследования [5–12] по изучению влияния пожаров не дают ответа на механизм перехода пожара на деревянные конструкции, их зажигание и последующего горения. Согласно [13, 14] древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении.

В связи с этим представляет интерес теоретико-экспериментальные исследования по зажиганию деревянных конструкций. Результаты исследования воспламеняемости образцов древесины могут быть использованы для уточнения общих противопожарных требований при застройке, а также при разработке способов и устройств по локализации и тушению природных пожаров [15]. Теоретические исследования базируются на моделях механики реагирующих сред [16] с использованием экспериментальных данных.

Эксперимент направлен на изучение в лабораторных условиях зажигания образцов древесины различной формы в результате воздействия фронта лесного пожара для установления характеристик воспламенения и горения, а также установления теплонапряженных участков на испытуемых образцах с помощью термопарного метода и метода ИК-диагностики [17, 18]. Кроме того показано использование бесконтактного метода ИК-диагностики для оценки пожароопасных свойств огнезащитных составов, используемых в настоящее время в качестве огнебиозащиты при обработке древесных строительных материалов [19, 20].

В пособии предлагается уточненная математическая модель по зажиганию и горению стены деревянного дома [21] в результате воздействия фронта природного пожара. Численное решение этой трехмерной краевой задачи получено при помощи разностной схемы на основе итерационно-интерполяционного метода [22].

В данном учебном пособии представлены основные принципы выбора спектрального интервала исследований, методы определения эффективного коэффициента излучения и результаты некоторых полунатурных экспериментальных исследований природных пожаров с применением методов ИК-диагностики [23].

Данное учебное пособие предназначено для самостоятельной работы магистрантов механико-математического факультета Томского государственного университета, обучающихся по программе «Механика жидкости, газа и плазмы». Представленные методы исследований и научные результаты могут использоваться при подготовке магистерской диссертации, а также в аспирантуре при подготовке кандидатской диссертации по специальностям 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Также издание соответствует основной образовательной программе по направлению подготовки «Лесное дело» на Биологическом институте Томского государственного университета.

ГЛАВА 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПОЖАРА НА ОБРАЗЦЫ ДРЕВЕСИНЫ

1.1. Экспериментальные исследования воздействия очага горения на образцы древесины с помощью термопарного метода

1.1.1. Методика эксперимента

Проблема природных пожаров с каждым годом становится все актуальнее. С ней столкнулись все страны мира, в особенности Бразилия, Австралия, Китай, Греция, Португалия, США, Россия.

Общеизвестно, что природные пожары являются мощным природным и антропогенным фактором, существенно изменяющим функционирование и состояние лесов. Выгорают десятки тысяч гектаров лесных массивов и угодий. Нередко пожары возникают и развиваются вблизи населенных пунктов и городов. Для России, где леса занимают большую территорию, лесные пожары являются национальной проблемой, а ущерб, наносимый реальному сектору экономики, исчисляется десятками и сотнями миллионов долларов в год.

Зажигание горючих материалов в лесу может быть вызвано разнообразными источниками огня [24]. Как показывает практика, несмотря на усовершенствование методов прогноза пожарной опасности, количество очагов возгорания не уменьшается [25]. Поэтому изучение развития и влияния пожаров на окружающую среду как в натуральных крупномасштабных экспериментах [16], так и в лабораторных условиях [26, 27] остается актуальным. В литературе приводится огромный объем теоретико-экспериментальных данных по пожароопасным свойствам древесины [9], исследованию воздействия горящих частиц на деревянные строения [28–30], воздействию интенсивного нагрева тепловым излучением [31–33]. В частности, в работе [33] приводится обширный обзор парамет-

ров воспламеняемости древесины, оценки горючести испытуемых образцов с использованием термогравиметрического анализа, метода калориметрии, а также проведением тестовых экспериментов.

В работе [34, 35] экспериментально исследуется влияние пожаров на торфяник и образцы, выполненные из дерева, часто используемые в строительстве объектов в населенных пунктах. Параллельно с методом ИК-диагностики для определения теплофизических характеристик различных материалов, используется термометрический метод измерений [36].

Для решения поставленной задачи использовался испытательный комплекс по исследованию лесных, степных и торфяных пожаров, представляющий собой короб-полигон, наполненный грунтом и имеющий следующие размеры: длина – 2 м, ширина – 1,5 м, высота – 0,13 м. В исследованиях влияние внешней среды исключено за счет того, что массовая скорость генерации газообразных и дисперсных продуктов сгорания значительно меньше скорости отвода через системы вентиляции [37].

Для регистрации входных значений, поступающих с термопар, использовалась автоматизированная система сбора и регистрации данных. Погрешность измерения термопар составила 1,5 %. Влажность образцов контролировалась с помощью анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0,01 %, масса образцов – электронными весами AND HL-400.

В качестве образцов использовались сосна и береза. Они представляли собой плоские и оцилиндрованные заготовки, имитирующие конструкцию стены деревянного строения (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Образцы древесины до эксперимента

Все образцы предварительно высушивались в сушильном шкафу ШСП 0,5-200 при температуре 100 °С. В качестве очага горения, моделирующего низовой лесной пожар, использовалась хвоя сосны. Во время экспериментов влагосодержание древесины составило 4,5 % (береза) и 5,8 % (сосна), слоя ЛГМ – 6,5 %. Плотность древесины $\rho_1=640 \text{ кг/м}^3$ (береза), $\rho_2=520 \text{ кг/м}^3$ (сосна).

Слой лесного горючего материала (ЛГМ) укладывался вплотную перед образцом древесины, установленным на грунт так, чтобы исключить захлестывание пламени снизу. Размеры площадки ЛГМ и образцов представлены на рис. 1.2.

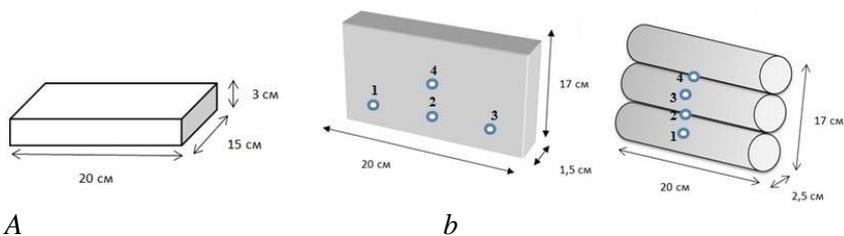


Рис. 1.2. Размеры площадки ЛГМ (а) и испытуемых образцов древесины (b);
1 – 4 – размещение термопар в образцах

Для действия ветра на ЛГМ использовался вентилятор. Скорость потока воздуха определялась с помощью анемометра CFM Master 8901 с погрешностью измерения 2 % и была перпендикулярна подверженной воздействию очага горения поверхности образцов древесины. Эксперименты проводились как без ветра, так и при ветре, скорость которого имела значение $1 \leq v_{\text{в}} \leq 3$ м/с. Вентилятор включался сразу после зажигания слоя ЛГМ, а выключался одновременно с регистрируемой аппаратурой. Тепловой поток q измерялся экспоненциальным методом [38] с помощью датчика теплового потока с погрешностью не более $\pm 6\%$.

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta W/W \cdot 100\% \leq 3,3\%$, $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1,5\%$, $\delta T/T \cdot 100\% \leq 2,5\%$.

Схема эксперимента для изучения действия пламени от модельного пожара на образец дерева приведена на рис. 1.3.

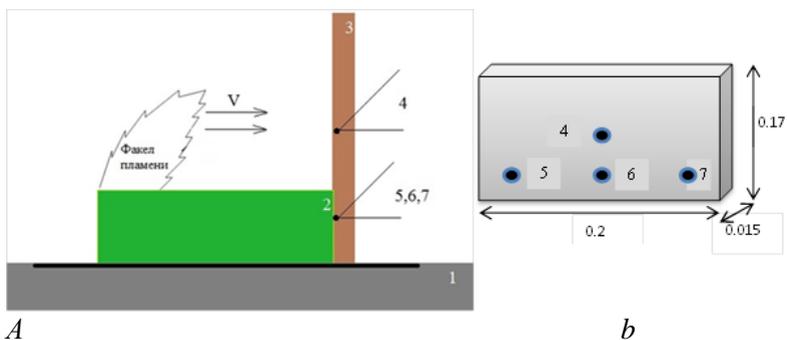


Рис. 1.3 Схема экспериментальной площадки (а) и характерные размеры образцов древесины (б): 1 – грунт; 2 – площадка ЛГМ; 3 – образец; 4–7 – термодатчики; V – направление воздушного потока

Эксперименты проводились в следующей последовательности. На грунт 1 укладывался слой СГМ 2 массой 50 г. и устанавливался образец древесины 3, параметры которого приведены на рис. 1.3,б. В образец с его тыльной стороны зачеканивались термодатчики типа ТХА (хромель-алюмель) на глубину $1.47 \cdot 10^{-2}$ м.

Одна в центре образца (термодатчик 5) и три термодатчика (5, 6, 7) на одной горизонтальной оси на расстоянии 0.01 м от нижнего края образца (рис. 1.3,б). Слой СГМ поджигался с помощью спирали накаливания.

1.1.2. Результаты исследования воздействия очага горения на древесину

Результаты экспериментальных исследований воздействия низового лесного пожара на образец древесины березы приведены на рис. 1.4 [14].

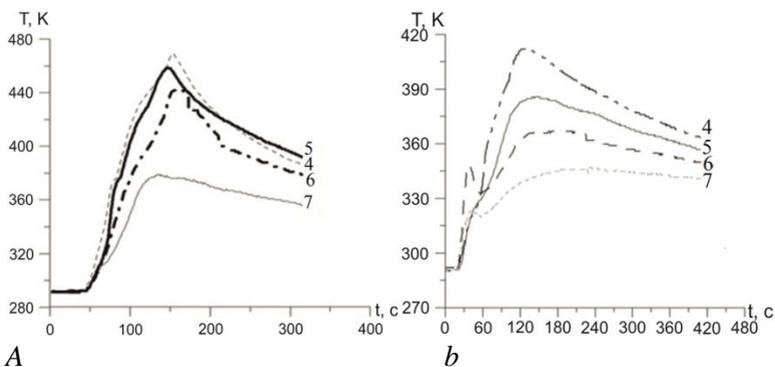


Рис. 1.4. Зависимости изменения температуры от времени на поверхности (*a* – в отсутствии ветра; *b* – скорость ветра 3 м/с) плоских деревянных образцов из березы

Видно, что термопары 1–4 практически одновременно начинают регистрировать увеличение после 50 секунд с начала воздействия очага горения на образец. При этом первой регистрировала температуру термопара 4, находящаяся в центральной части образца. Затем через 5–7 секунд термопары 1–3 начинают одновременно регистрировать возрастание температуры. При выбранном запасе ЛГМ имело место частичное обугливание образца древесины. Термопара 4 регистрировала наибольшую температуру в диапазоне 460–470 К, а наибольшие показания термопар 1–3, находящихся в нижней части образцы древесины, были в диапазоне 430–450 К. Термопара 3, не смотря на то, что она находилась на одном уровне с термопарами 1, 2, имела более низкие температуры, что, по видимому, связано с пульсациями факела пламени.

На рис. 1.4,*b* отмечается изменение температуры на поверхности плоского образца древесины (береза) при действии воздушного потока. Видно, что максимума температура достигает через 150 секунд. Следует отметить, что в интервале 30–60 с поток воздуха воздействовал на факел пламени, что отразилось на показаниях термопар.

Экспериментально установлено, что при скорости воздушного потока $1 \leq v_e \leq 3$ м/с образец не воспламенялся. Следует отметить, что наибольшему нагреву подвергалась центральная часть образца, где температура принимала значения 440–450 К, фиксируемая термопарой 4, минимальное значение температуры в 340 К отмечается термопарой 6. Любопытно отметить, что воздействие воздушного потока на факел пламени приводило к тому, что пламя охватывало образец древесины по боковым поверхностям, что приводило к их обугливанию.

На рис. 1.5 представлено изменение температуры у поверхности образца из сосны.

В случае с отсутствием ветра, имело место аналогичная картина распределения поля температуры, что и для березы (рис. 3А). Первыми начинают регистрировать термопара 2 и 4 (обе термопары расположены в центральной части образца), причем наибольшие значения фиксирует термопара 4 (390 К), находящаяся над термопарой 2 в центре образца. Термопара 2 регистрировала максимальное значение температуры в 360 К. Термопары 1, 3, располагающиеся слева и справа в нижней части образца, начинают регистрировать изменение температуры через 5–7 секунд после термопар 2 и 4, что также возможно связано с пульсациями факела пламени.

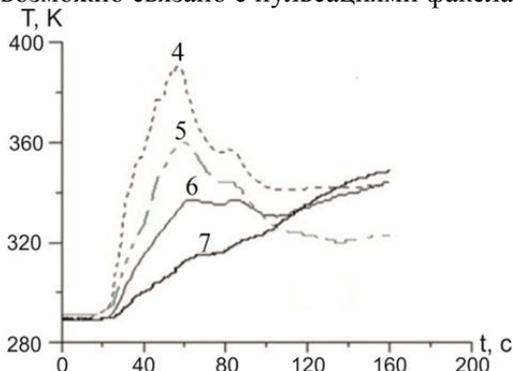


Рис. 1.5. Зависимость изменения температуры от времени на поверхности плоских деревянных образцов из сосны

В результате проведенных экспериментов по воздействию очага горения модельного низового лесного пожара слабой интенсивности на плоские образцы древесины из березы и сосны следует отметить, что при отсутствии ветра воздействию пожара в большей степени подвержена центральная часть, о чем свидетельствуют показания термопар в центре образца. Низкое влагосодержание ЛГМ приводит к тому, что процесс горения протекает очень активно и быстро прекращается, воздействие теплового потока непродолжительно по времени и составляет не более 20 с, что не позволяет прогреть образец до температуры воспламенения. При выбранных параметрах эксперимента на поверхности образцов древесины происходило обугливание, однако пламенного горения не наблюдалось, что, по-видимому, связано с малой мощностью теплового потока, а также непродолжительностью его воздействия на древесину, что подтверждает, в частности, работа [39], в которой экспериментальным путем анализировались характеристики воспламенения и горения древесины под влиянием различных тепловых потоков, в результате чего был сделан вывод, что чем ниже интенсивность теплового потока, тем более полно будет протекать пиролиз со скоростью, которая мала для создания горючей концентрации.

Таким образом, достижение некоторой критической мощности теплового потока [39] приведет к тому, что процесс воспламенения образца станет невозможным.

В результате проведенных экспериментов по воздействию очага горения модельного низового лесного пожара слабой интенсивности на плоские образцы древесины из березы и сосны следует отметить, что в условиях отсутствия ветра воздействию пожара в большей степени подвержена центральная часть, о чем свидетельствуют показания термопар в центре образца. Низкое влагосодержание ЛГМ приводит к тому, что процесс горения протекает очень активно и быстро прекращается, воздействие теплового потока непродолжительно по времени, что не позволяет на поверхности образца достичь температуры воспламенения.

Как показывают кривые на рис. 1.6, в случае воздействия фронта низового лесного пожара на образец древесины из оцилиндрованного бруса, вначале нагреваются выпуклые участки испытываемой модели (термопары 1,3), после чего происходит активный нагрев стыков между брусками [40].

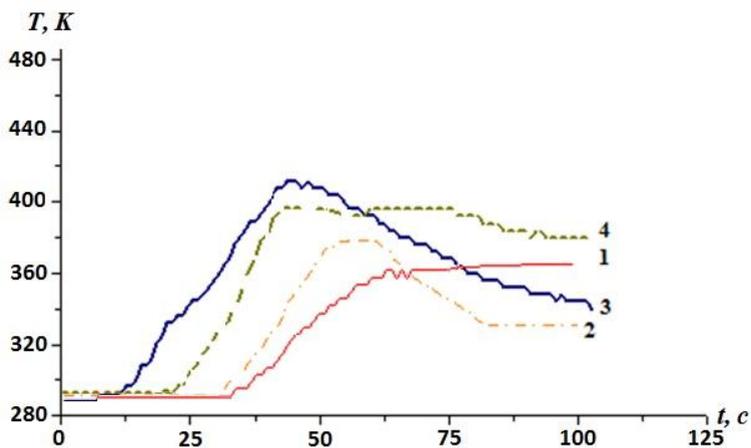


Рис. 1.6. Зависимость изменения температуры в приповерхностном слое модели из оцилиндрованного бруса из березы; 1–4 – расположение термопар

На рис. 1.7 представлена фотография образца древесины после воздействия очага горения.



Рис. 1.7. Образец древесины (береза) после проведения эксперимента при скорости ветра 3 м/с

Кроме того, представляет интерес оценка скорости обугливания образцов древесины. В случае плоских образцов из березы скорость обугливания вдоль волокон при воздействии очага горения низового лесного пожара составила 0.14 мм/мин, что согласуется с работой [41], в которой оценивалась средняя скорость обугливания древесины в зависимости от интенсивности внешнего теплового потока. Скорость обугливания вдоль волокон плоских образцов из сосны составила в экспериментах 0.21 мм/мин. При воздействии пламени перпендикулярно волокнам отмечается потемнение поверхности образца.

1.2. Исследование воздействия очага горения на образцы древесины с помощью метода ИК-диагностики

Изучение влияния пожаров на деревянные конструкции в натуральных крупномасштабных экспериментах затруднено из-за плохой воспроизводимости результатов и большой зависимости параметров экспериментов от внешних факторов [42]. В основном

эти проблемы решаются в лабораторных условиях, позволяющих с некоторыми допущениями частично моделировать условия воздействия природных пожаров на образцы, выполненные из дерева. Так в работе [43] рассматривается лабораторная установка, позволяющая проводить исследования по зажиганию и последующему горению лесных горючих материалов, моделирующих низовой лесной пожар. При этом в качестве датчиков, фиксирующих изменение температуры, использовались термопары.

Исследования процесса возникновения и развития низового лесного пожара также проводится с применением тепловизионных измерений. Основное преимущество ИК-измерений заключается в их высоком пространственном и временном разрешении [44]. Представляет интерес изучение в лабораторных условиях зажигания деревянных конструкций при воздействии на них очагов горения для определения теплонапряженных участков на поверхности образца. Регистрация проводилась с помощью тепловизионного оборудования и методов ИК-диагностики.

Исследования в данной области в последнее десятилетие активно ведутся такими учеными как Дж. Д. Коэн, Б. В. Батлер, Дж. Е. Леонард, Р. Бланчи, Н. Вайт, А. Гальгано, А. Тодиско, С. Л. Манзелло, В. Мелл. В частности, в работах [45, 46] рассматривается моделирование пожаров в условиях жилой застройки. Но в этих работах в основном исследуется воспламеняемость домов под действием горящих частиц и угольков [47]. Целью же данной работы является изучение уязвимости деревянных строений к воспламенению в результате воздействия фронта пожара

1.2.1. Методика проведения эксперимента

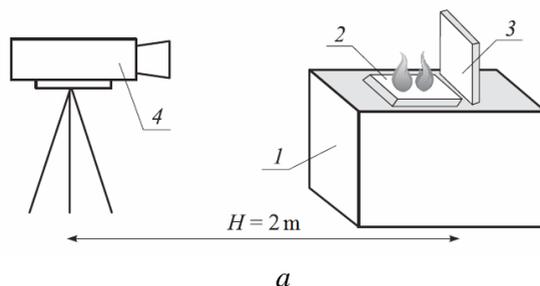
В инфракрасной области характеристики фронта горения регистрировались с помощью тепловизора JADE J530SB с узкополосным дисперсионным оптическим фильтром со спектральным интервалом 2,5 – 2,7 мкм, позволяющим измерять температуру в диапазоне 583–1773 К с погрешностью, не превышающей 1 %. Технические данные тепловизора позволили регистрировать пламя

с частотой 50 кадров в секунду. Съемка производилась с расстояния 2 м и была направлена на определение температуры на поверхности деревянных образцов при воздействии очага горения. При измерениях использовали калибровки завода-изготовителя для выбранного типа объектива и фильтра. Объектив имел фокусное расстояние $F=50$ мм, а матрица тепловизора имела разрешение 320×240 пикселей. Частота дискретизации по времени составляла 50 Гц. При такой геометрии эксперимента и выбранных оптических характеристик тепловизора (спектральный интервал 2,5–2,7 мкм выбирался в соответствии с рекомендациями работы [48]) пространственное разрешение было значительно меньше 1 мм, а программное обеспечение по работе с тепловизором позволяет с точностью до 1 мм определять размеры исследуемого объекта.

В экспериментах фронт низового лесного пожара моделировался с использованием степного горючего материала (СГМ), представляющего собой побеги злаков (пырей, типчак и др. травы) [49]. Плотность слоя составляла $\rho = 55,5 \text{ кг/м}^3$. Параметры образцов древесины, их размеры, влагосодержание, плотность и масса были те же, что описаны в методике проведения эксперимента с применением терморпарного метода.

Масса степного горючего материала $M_{СГМ} = 50 \text{ г}$, влагосодержание $W_{СГМ} = 4,5 \%$, температура окружающего воздуха $T_H = 20^0 \text{ С}$.

На рис. 1.8 представлена схема проведения эксперимента:



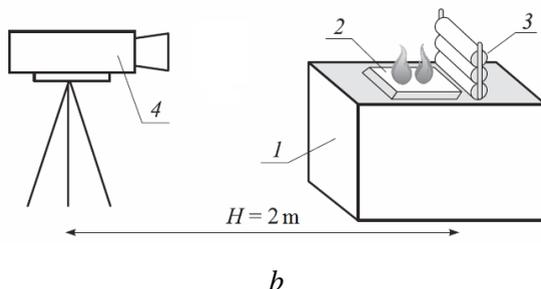


Рис. 1.8. Схема проведения эксперимента и используемое оборудование:
 1 – экспериментальная площадка; 2 – растительный горючий материал;
 3 – образец древесины; 4 – ИК-камера JADE J530SB; *a* – плоский образец,
b – оцилиндрованный образец

В качестве очага горения использовался модельный степной пожар слабой интенсивности 3 (высота факела не превышала $h_{II} \leq 15$ см, что в соответствии с классификацией означает слабый низовой пожар), который воздействовал на образец древесины 2, установленный вертикально. Поджиг СГМ осуществлялся с помощью спирали накаливания. На рис. 1.9 изображена экспериментальная площадка.

Съемка тепловизором начиналась в момент зажигания слоя СГМ и регистрировала не только развитие горения, но и непосредственно поверхность образца древесины после того как слой СГМ прогорал и переставал экранировать. В отличие от термопарного метода, в данном случае мы можем говорить именно о температуре на поверхности, в то время как термопарный метод ограничен условиями внедрения термопар в образцы древесины (дает некоторую погрешность, связанную с необходимостью внедрять термопары в образец древесины у поверхности). Под воспламенением понималось появление пламени на поверхности образца древесины.

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta W/W \cdot 100\% \leq 3\%$, $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1,5\%$, $\delta T/T \cdot 100\% \leq 4\%$.

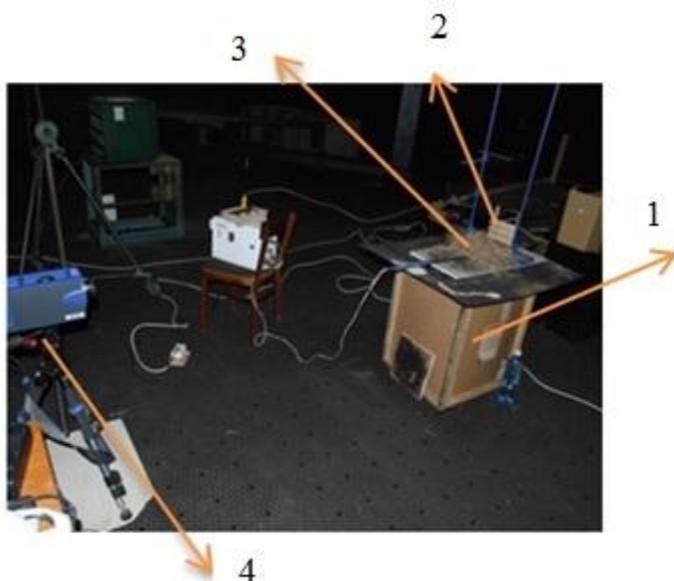


Рис. 1.9. Экспериментальная площадка

1.2.2. Результаты экспериментов

Для того чтобы оценить воздействие очага горения на образцы древесины методом ИК-диагностики, с помощью программного обеспечения Altair по работе с тепловизором выбиралась область *I* на поверхности деревянных образцов и строился график зависимости изменения температуры по времени эксперимента (рис. 1.10) [50].

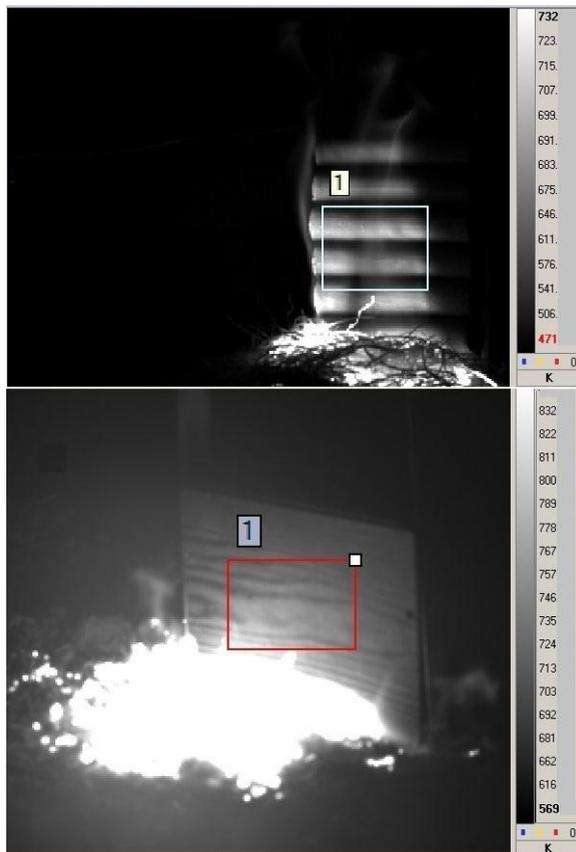


Рис. 1.10. Термограмма эксперимента по воздействию очага горения на образцы древесины: *a* – оцилиндрованный образец; *b* – плоский образец

Программное обеспечение Altair позволяет построить график распределения максимальной, минимальной и средней температуры в выбранной области (в данном случае область 1) по времени эксперимента. На рисунке 1.11 представлена типичная зависи-

мость изменения температуры в области 1 по времени эксперимента для оцилиндрованного образца древесины.

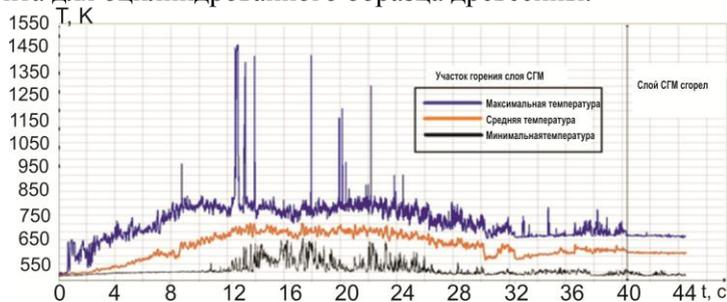


Рис. 1.11. График зависимости максимальной, минимальной и средней температуры от времени в области 1 для оцилиндрованного образца

Для того, чтобы уменьшить массив данных на рисунке 1.12, кривая зависимости максимальной и минимальной температуры от времени отбрасывалась, анализировалась средняя температура в области 1 для плоского и оцилиндрованного образца древесины.

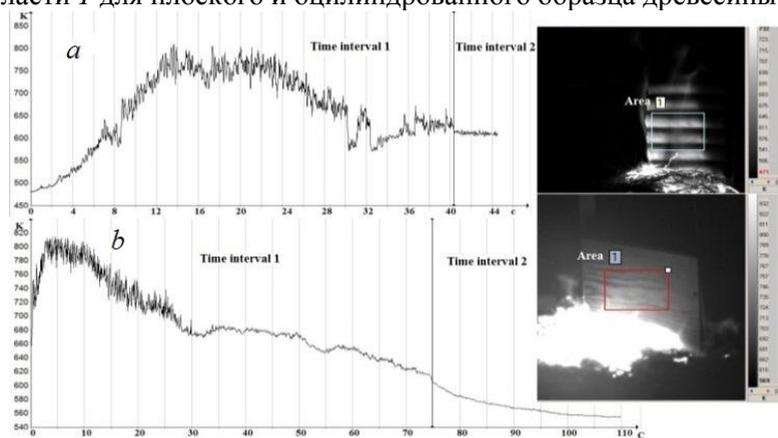


Рис. 1.12. Типичная термограмма изменения температуры от времени в выбранной области на поверхности испытуемых образцов: *a* – оцилиндрованный образец; *b* – плоский образец

Графики на рис. 1.12 отражают изменение средней температуры (осреднение автоматически производилось при помощи программного обеспечения Altair) во времени всего эксперимента, включая процесс развития горения слоя СГМ. Отбросив временной отрезок 1 на рис. 1.12, когда в пламенном режиме сгорал слой СГМ, тем самым экранируя интересующую нас поверхность деревянного образца в области 1, были получены графики изменения температуры на поверхности образца в области 1 после воздействия на них очага горения (рис. 1.13).

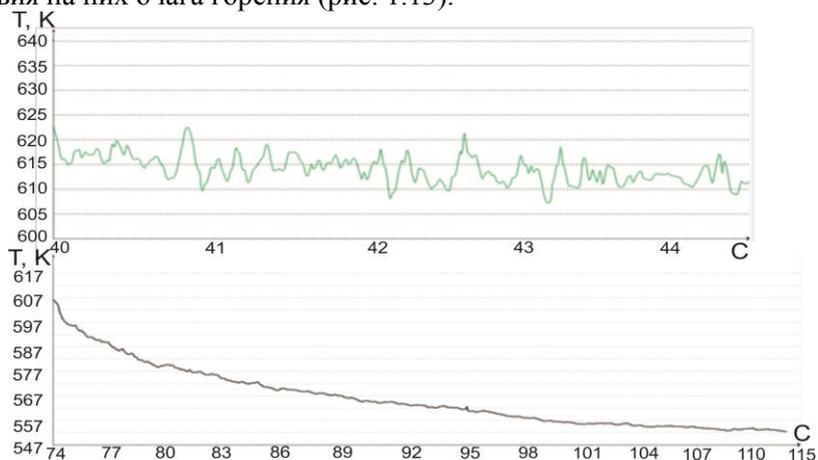


Рис. 1.13. Зависимость изменения средней температуры от времени в области 1 после воздействия очага горения СГМ

Температура на поверхности плоских образцов достигает 600-610 К. При выбранных условиях эксперимента (масса СГМ, влагосодержание образцов древесины) воспламенения не наблюдалось, образец достаточно сильно обуглился, происходило активное образование дыма, без зажигания (рис. 1.14) [51].



Рис. 1.14. Плоские образцы древесины после проведения эксперимента

Температура на поверхности оцилиндрованных образцов древесины находится в диапазоне $600 \leq T_2 \leq 620 \text{ K}$. Следует отметить, что в данном случае при таких-же условиях и параметрах эксперимента образцы воспламенялись, наблюдалось устойчивое горение по поверхности (рис. 1.15) [51].

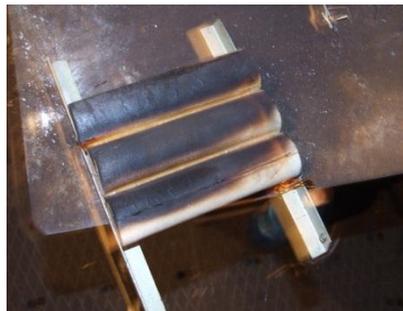


Рис. 1.15. Оцилиндрованные образцы древесины после проведения эксперимента

На рис. 1.16 представлена термограмма воздействия очага горения на образцы древесины в момент времени, когда большая

часть слоя горючего материала сгорела и пламя от него не экранировала поверхность исследуемых образцов древесины. В этой области на поверхности образца расположены экспериментальные точки: слева – точки 1–6, расположенные по краям, справа – точки 1–5, расположенные в центре образца.

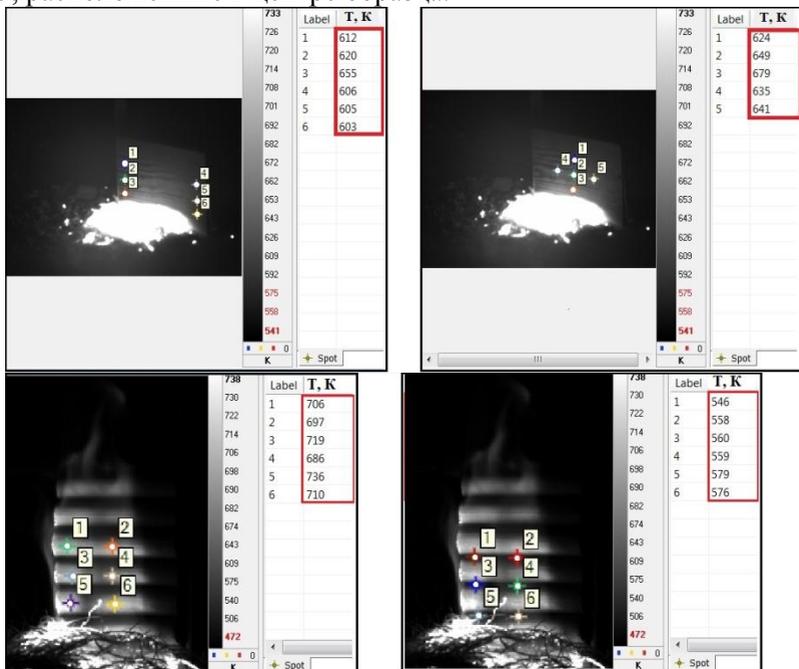


Рис. 1.16. Исследуемые участки на поверхности деревянных образцов

Также были зафиксированы участки наибольшего и наименьшего нагрева деревянных образцов при воздействии на них очага горения [52].

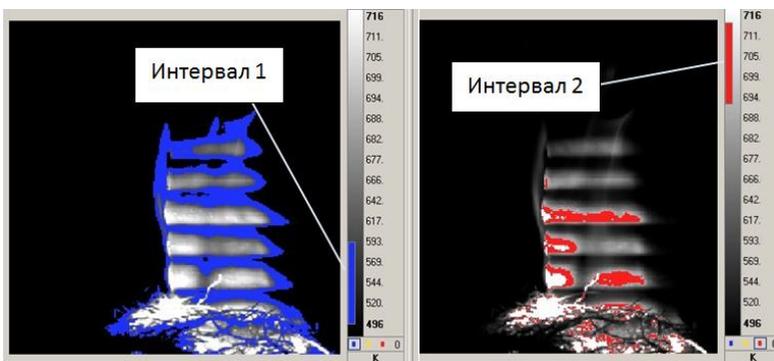


Рис. 1.17. Термограммы образца, имитирующего стенку из оцилиндрованного бруса, в момент воспламенения

На рис. 1.17 приведена термограмма, характеризующая температуру по поверхности испытываемого образца в момент воспламенения. Интервал 1 ($496 \leq T \leq 593 \text{ K}$) на рис. 1.17 соответствует участкам наименьшего нагрева, участок 2 ($690 \leq T \leq 716 \text{ K}$) – наибольшего. Такое распределение показывает, что для оцилиндрованного бруса наиболее подвержены возгоранию выпуклые части образца, а также боковые грани. Таким образом, вероятность воспламенения для подобных образцов выше, чем для плоских, при прочих равных условиях эксперимента.

1.3. Исследование влияния огнезащитного покрытия на пожароопасные свойства древесины

В литературе имеется большое количество экспериментальных работ по исследованию пожарной опасности древесины, которые свидетельствуют о влиянии различных факторов на ее пожароопасные показатели (порода и разновидность древесины, условия и продолжительность эксплуатации, влажность, интенсивность пожара и т.д.). Можно выделить работы [7–12, 53–55]. Исследованы особенности пиролиза и термоокислительного разложения древесины, определены теплофизические характеристики, получены

значения скоростей обугливания при различных температурных режимах. На основе этих данных в настоящее время можно судить о показателях огнестойкости деревянных конструкций, однако большинство методов, используемых для оценки пожарной опасности древесины, относятся к классу контактных методов (микротермопарная техника, метод молекулярно-пучковой зондовой масс-спектрометрии, методы термического анализа и т.д.). При моделировании процессов горения в лабораторных условиях зачастую достаточно использовать контактные методы для регистрации полей температуры, теплового потока, скорости обугливания, задержек зажигания и т.д., однако в натуральных и полунатурных условиях необходимо большое количество термопар для регистрации полей температур, что вызывает трудности при обработке результатов.

В данном параграфе описаны результаты экспериментов по оценке влияния различных огнезащитных составов при исследовании воздействия фронта пожара на поверхность образцов деревянных строительных материалов [17, 18]. В качестве метода диагностики использовалась ИК-термография. В настоящее время ИК метод наряду с методами теплового неразрушающего контроля, не нарушающими целостности контролируемых объектов и не вносящими возмущения в процесс, представляет высокотехнологическую область прикладных исследований, которая объединяет достижения в теории теплопередачи, ИК технологии и компьютерной обработки экспериментальных данных [56].

1.3.1. Лабораторное оборудование и методика проведения эксперимента

В инфракрасной области характеристики поверхности образца регистрировались с помощью тепловизора JADE J530SB с применением оптического фильтра 2.5 – 2.7 мкм, который позволял измерять температуру в интервале 500 – 850 К. Для регистрации температур в интервале 293 – 550 К съемка производилась без использования фильтра.

Частота съемки составляла 50 кадров/сек. Влажность образцов контролировалась с помощью анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0.01 %, масса образцов – электронными весами AND HL-100.

Во время экспериментов влагосодержание образцов составило: сосна – 5.55 %, осина – 5.83 %, лиственница – 3.76 %, хвоя сосны – 8.03 %. Масса ЛГМ бралась постоянной и составляла в эксперименте 50 г, тем самым моделировался низовой лесной пожар слабой интенсивности. За основу была взята модель низового лесного пожара слабой интенсивности, как наиболее распространенного в природных условиях, моделирование которого в лабораторных условиях не представляло существенных технических затрат.

На рис. 1.18 представлена схема проведения эксперимента.

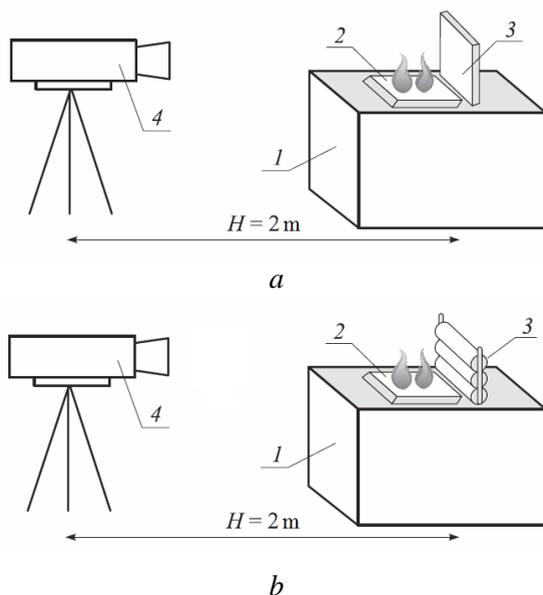


Рис. 1.18 – Схема проведения эксперимента: 1 – экспериментальная площадка; 2 – растительный горючий материал; 3 – образец древесины; 4 – ИК-камера JADE J530SB; а – плоский образец; б – оцилиндрованный образец

Эксперимент проводился следующим образом. Площадка ЛГМ 1 располагалась перед образцом и зажигалась при помощи линейного источника, находящегося под ней. Образующийся при этом фронт пожара воздействовал на образец древесины 2, установленный вертикально, съемка поверхности которого производилась тепловизором 3. Эксперимент проходил в два этапа. На первом проводилось исследование образцов древесины без покрытия антипирена. Во втором этапе образцы покрывались огнезащитным покрытием. Для каждого этапа были проведены серии из трех повторений. Обработка осуществлялась с помощью программного обеспечения Altair.

Для оценки влияния геометрии образцов древесины на вероятность воспламенения, а также воздействия огнезащитных составов на ее пожароопасные свойства, дополнительно к уже имеющимся плоским образцам из сосны, осины и лиственницы [57, 58] использовался древесный строительный материал для имитации бруса (Блок-хаус), выполненный из сосны. Размеры образцов в эксперименте составляли (Д×Ш×В): 0.25×0.02×0.11 м. На рис. 1.19 представлена фотографии испытуемых образцов древесины.



Рис. 1.19. Образцы древесины

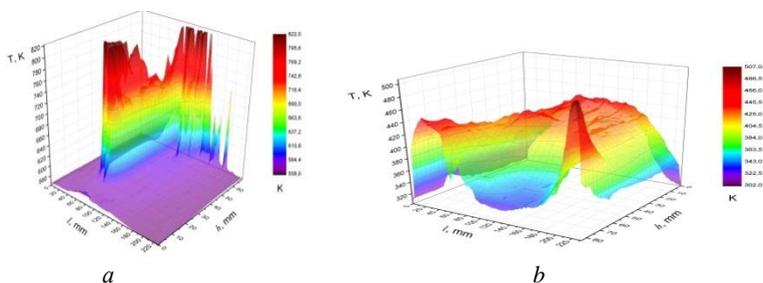
Для определения полей температуры на поверхности исследуемых образцов древесины в результате воздействия модельного лесного пожара бесконтактным методом использовалась методика, представленная в работах [57, 58].

Кроме того, наряду с огне-био защитной пропиткой для древесины «ФУКАМ» [59], рассматривались следующие готовые растворы: огнезащитная пропитка с антисептическим эффектом для древесины «Pirilax»-Classic [60], средства защитное для древесины «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ» [61], а также огнезащитный состав «МИГ-09» [62].

Расход огнезащитных составов, определенный технической документацией завода-изготовителя, обеспечивал II группу огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53292 [63]. Поверхность образцов, которая впоследствии подвергалась тепловому воздействию от фронта горения, равномерно покрывалась огнезащитным составом с помощью кисти. После этого образцы выдерживались в течение суток, после чего помещались в сушильный шкаф ШСП-0.5 – 200 с установленной температурой 70 °С до достижения влагосодержания $W = 2\%$.

1.3.2. Результаты

Применение бесконтактного метода для оценки пожароопасных свойств рассматриваемых в настоящей работе древесных строительных материалов позволило получить распределение полей температуры на поверхности образцов после воздействия очага горения (рис. 1.20)



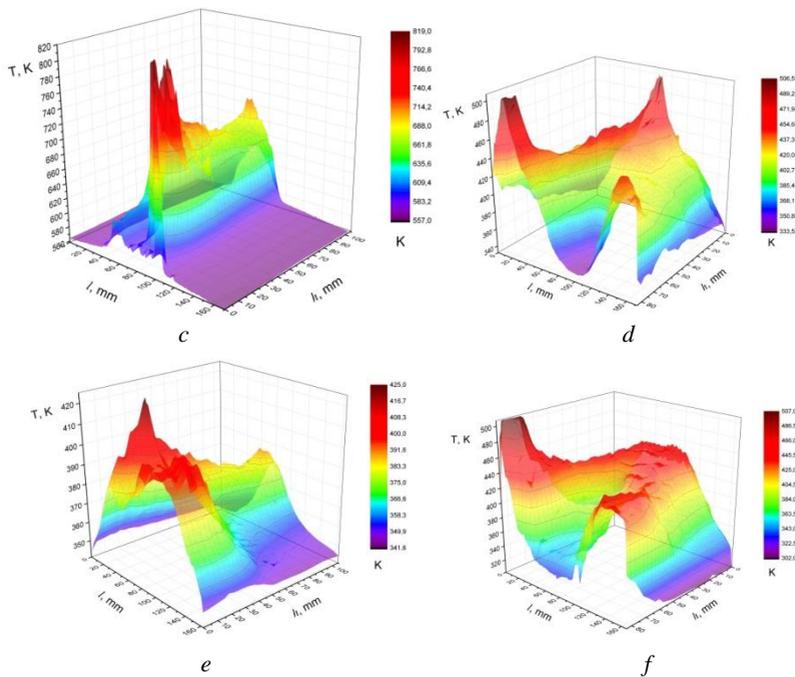
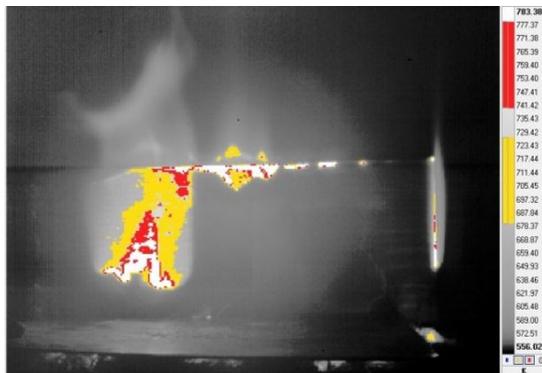


Рис. 1.20. Распределение температуры на поверхности образцов древесины: *a* – сосна без обработки; *b* – сосна, обработка «ФУКАМ»; *c* – осина без обработки; *d*– осина, обработка «ФУКАМ»; *e* – лиственница без обработки; *f*– лиственница, обработка «ФУКАМ»

Анализ полученных данных показывает, что при выбранных параметрах эксперимента, в случае необработанной древесины, невосприимчивой к зажиганию оказались образцы из лиственницы. Остальные образцы (сосна, осина), не зависимо от геометрии, воспламенялись в результате воздействия очага горения. На рис.1.21 в качестве примера приведены термограммы необработанной древесины сосны и обработанной огнезащитным составом «ФУКАМ».



a



b

Рис. 1.21. Термограммы необработанных образцов древесины (*a*) и обработанных огнезащитными составами (*b*)

Результаты обработки тепловизионных данных, полученных в ходе эксперимента, представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения максимальной температуры $T_{\max av}$ на поверхности образцов древесины в зависимости от применяемого огнезащитного состава

№	Тип строительного материала (сорт древесины)	Огнезащитный состав	$T_{\max av}^*$, °C
1	Блок-хаус (сосна)	«Pirilax Classsic»	278
		«СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ»	253
		«МИГ-09»	266
		«ФУКАМ»	240
		Без пропитки	664
2	Доска строительная (лиственница)	«Pirilax Classsic»	247
		«СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ»	245
		«МИГ-09»	291
		«ФУКАМ»	279
		Без пропитки	664
3	Доска строительная (осина)	«Pirilax Classsic»	310
		«СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ»	288
		«МИГ-09»	226
		«ФУКАМ»	239
		Без пропитки	712
4	Доска строительная (сосна)	«Pirilax Classsic»	303
		«СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ»	236
		«МИГ-09»	260
		«ФУКАМ»	244
		Без пропитки	740

* – Осреднение по трем опытам.

Сравнительный анализ показывает, в зависимости от сорта древесины наилучшие огнезащитные свойства проявляет разный состав – огне-био защитная пропитка для древесины «ФУКАМ» в случае образцов блок-хауса; огнезащитная пропитка с антисептическим эффектом для древесины «Pirilax»-Classic» для строитель-

ной доски из лиственницы; средства защитное для древесины «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ» для строительной доски из сосны и осины.

Определены скорости обугливания плоских и оцилиндрованных образцов древесины, подверженные воздействию очага низового лесного пожара. На рис. 1.22 приведены фотографии эксперимента по воздействию фронта модельного низового лесного пожара слабой интенсивности на образцы древесины в лабораторных условиях.



Рис. 1.22. Экспериментальная площадка и образцы древесины во время воздействия очага горения

Кроме того определена величина глубины обугливания образцов древесины в зависимости от сорта древесины, а также типа применяемого огнезащитного состава.



Рис. 1.23. Образцы древесины перед оценкой глубины обугливания

Без использования предварительной обработки огнезащитным составом, скорость обугливания вдоль волокон плоских образцов из сосны при воздействии очага горения низового лесного пожара составила в экспериментах $0,2 \pm 0,05$ мм/мин. В случае плоских образцов из осины скорость обугливания составила $0,22 \pm 0,05$ мм/мин, лиственницы – $0,35 \pm 0,05$. Полученные результаты согласуются с работой [64], в которой оценивалась средняя скорость обугливания древесины в зависимости от интенсивности внешнего теплового потока.

При выбранных параметрах эксперимента возгорания образцов древесины не наблюдалось, тепловой энергии от сгорания рассматриваемого запаса растительных горючих материалов (50 г на площадке из расчета 0,172–0,263 кг/кв. м) [65]. Для образца строительной доски из сосны, с использованием огнезащитного состава «Pirilax Classic», наблюдалось кратковременное воспламенение по поверхности, однако при полном сгорании растительных горючих материалов горение прекращалось. В целом экспериментально получено, что в результате теплового воздействия при сгорании 50 г РГМ величина глубины обугливания среди всех рассматриваемых образцов древесины, обработанных огнезащитными составами, не превышала значения 1,4 мм (измерения проводились с помощью Микрометра гладкого тип МК25, предел допускаемой погрешности, 0,004 мм).

Выводы

Для изучения полей температуры на поверхности деревянных образцов при воздействии на них модельного очага горения методами ИК-диагностики применялся спектральный интервал 2.64–3.25 мкм, выбор которого обусловлен спектром излучения пламени [66]. В результате экспериментов было отмечено следующее:

1) наиболее подвержены воздействию пламени выпуклые участки и торцы оцилиндрованных образцов;

2) с помощью ИК-диагностики [67] определена температура на поверхности деревянных образцов различного профиля в результате воздействия на них очага горения, которая составила 600–610 К для плоских образцов и 607–622 К — для оцилиндрованных;

3) при равных условиях эксперимента (масса СГМ, влагосодержание образцов древесины) воспламенения плоских образцов не наблюдалось, образцы из оцилиндрованного бруса воспламенялись с последующим горением.

Проведена оценка влияния огнезащитной пропитки «ФУКАМ» на пожароопасные свойства древесины сосны, осины и лиственницы. Исследовалось влияние фронта модельного низового пожара

на поверхность образцов древесины, а в качестве метода диагностики использовалась ИК-термография. За основу была взята модель низового лесного пожара слабой интенсивности, как наиболее распространенного в природных условиях, моделирование которого в лабораторных условиях не представляло существенных технических затрат. Максимальная температура, которая достигалась на поверхности исследуемых образцов без покрытия, составляла: для лиственницы – 471 К, для осины – 800 К; для сосны – 820 К, а с покрытием: для лиственницы – 410 К, для осины – 506 К; для сосны – 456 К. В результате обработки полученных экспериментальных данных были установлены теплонапряженные участки на поверхности моделей деревянных конструкций в результате воздействия фронта низового лесного пожара, характерные размеры которых составляли: для лиственницы – 30×50 мм, для осины – 35×30 мм; для сосны – 20×50 мм. Сравнение пожароопасных свойств древесины, обработанной огнезащитной пропиткой с аналогичными необработанными образцами показало существенное снижение температуры поверхности и невосприимчивость к воспламенению при выбранных параметрах эксперимента.

Экспериментально проанализировано влияние различных огнезащитных составов (огне-био защитная пропитка для древесины «ФУКАМ», огнезащитная пропитка с антисептическим эффектом для древесины «Pirilax»-Classic), средства защитное для древесины «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ», а также огнезащитный состав «МИГ-09») на пожароопасные свойства образцов древесины различной геометрии (плоские образцы из сосны, осины и лиственницы и древесный строительный материал для имитации бруса (Блок-хаус), выполненный из сосны). Сравнительный анализ показывает, в зависимости от сорта древесины наилучшие огнезащитные свойства проявляет разный состав – огне-био защитная пропитка для древесины «ФУКАМ» в случае образцов блок-хауса; огнезащитная пропитка с антисептическим эффектом для древесины «Pirilax»-Classic для строительной доски из лиственницы; средства защитное для древесины «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ» для строительной доски из сосны и осины.

Определены скорости обугливания плоских и оцилиндрованных образцов древесины, подверженные воздействию очага низового лесного пожара. Без использования предварительной обработки огнезащитным составом, скорость обугливания вдоль волокон плоских образцов из сосны при воздействии очага горения низового лесного пожара составила в экспериментах $0,2 \pm 0,05$ мм/мин. В случае плоских образцов из осины скорость обугливания составила $0,22 \pm 0,05$ мм/мин, лиственницы – $0,35 \pm 0,05$. Полученные результаты согласуется с работой [Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства / – Монография. – М. : Академия ГПС МЧС России. – 2010. – 262 с.], в которой оценивалась средняя скорость обугливания древесины в зависимости от интенсивности внешнего теплового потока.

Кроме того определена величина глубины обугливания образцов древесины в зависимости от сорта древесины, а также типа применяемого огнезащитного состава. При выбранных параметрах эксперимента возгорания образцов древесины не наблюдалось, тепловой энергии от сгорания рассматриваемого запаса растительных горючих материалов (50 г на площадке из расчета $0,172-0,263$ кг/кв. м) [65]. Для образца строительной доски из сосны, с использованием огнезащитного состава «Pirilax Classic», наблюдалось кратковременное воспламенение по поверхности, однако при полном сгорании растительных горючих материалов горение прекращалось. В целом экспериментально получено, что в результате теплового воздействия при сгорании 50 г РГМ величина глубины обугливания среди всех рассматриваемых образцов древесины, обработанных огнезащитными составами, не превышала значения 1,4 мм (измерения проводились с помощью Микрометра гладкого тип МК25, предел допускаемой погрешности, 0,004 мм). Таким образом, применение рассматриваемых специализированных огнезащитных составов позволило снизить тепловую нагрузку и добиться отсутствия воспламенения.

Контрольные вопросы:

1. Пояснить, почему изучение влияния пожаров на деревянные конструкции в натуральных крупномасштабных экспериментах ведется достаточно редко по сравнению с лабораторными опытами.
2. Назовите показатели пожарной опасности древесины.
3. Дайте определение теплового потока.
4. Назовите факторы, влияющие на пожароопасные свойства древесины, используемой в строительстве.
5. Что такое огнестойкость веществ? Назовите классы пожарной опасности древесных строительных материалов.
6. Назовите определение огнезащитного состава. Приведите несколько огнезащитных составов, которые применяются для древесины.
7. Сколько существует классов огнезащитной эффективности материалов в соответствии с ГОСТ Р 53292?
8. Какой из представленных в параграфе 1.3 огнезащитных составов показал наилучшую огнезащитную эффективность?
9. Назовите основные этапы при подготовке и проведении лабораторного эксперимента, опираясь на представленные в главе 1 эксперименты.
10. Как влияют геометрические параметры образцов древесины при воздействии на нее фронта низового лесного пожара (параграф 1.2)?
11. Назовите определение влагосодержания. Как влагосодержание материала влияет на его пожароопасные свойства?

ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

2.1. Выбор спектрального интервала исследования

Применение методов термографии в мире в основном приходится на диагностику электротехнического, теплового оборудования и ограждающих конструкций зданий на предмет теплопотерь. Исследования этих объектов связаны с определением температур поверхности твердых тел, а точнее, регистрируется температурный контраст частей оборудования по отношению к заведомо исправной части и называется «избыточной температурой» или по отношению к температуре окружающего воздуха и называется «превышением температуры». Так как процесс преобразования тепловизионного электрического сигнала в температуру носит нелинейный характер согласно указанному ниже закону Планка, то погрешность тепловизоров в измерении абсолютных значений температур составляет $\pm 2\%$. В то же время высокая чувствительность современных тепловизоров (не хуже $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$) к перепадам температур измеряемой поверхности и описанный выше метод ухода от абсолютных значений температуры и измерения только разницы температур позволяют уверенно диагностировать оборудование и элементы зданий на самой ранней стадии дефектов.

Следует отметить, что эти объекты, по сути, являются серыми телами, их спектр излучения непрерывен и подчиняется закону Планка. С целью повышения чувствительности регистрирующего оборудования измерения производятся в широком спектральном диапазоне. В случае же когда объектом исследования является пламя, то спектр его излучения существенно отличается от спектра излучения АЧТ. Этот факт обуславливает необходимость более детального рассмотрения спектра излучения пламени с целью выбора узких рабочих спектральных интервалов.

Очевидно, что спектр пламени обусловлен излучением основных газообразных продуктов горения и сосредоточен в среднем

ИК-диапазоне и для успешной работы необходим тепловизор с рабочим диапазоном длин волн от 2,0 до 5,5 мкм. Учитывая то, что при пламенном горении различных топлив значительный вклад в излучение пламени вносят летучие продукты пиролиза и газообразные продукты горения, применение узкополосных фильтров в средневолновом ИК-диапазоне представляется перспективным подходом для определения полей температуры в пламени.

В работе [68] приводятся спектры излучения пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, и результаты исследований излучения от фронта пожара на длинах волн 3,6; 4,8; 4,2 мкм, а в работе [69] представлены спектры излучения и особенности ИК-измерений для различных газов, в том числе паров воды и углекислого газа, разогретых до 2000 К, которые являются основными продуктами горения.

В работах [70–72] представлены экспериментальные результаты по определению радиационных свойств пламени, образующегося при горении лесных горючих материалов, и поглощательной способности самих лесных горючих материалов. Следует отметить, что в этих работах приведены результаты для ближнего ИК-диапазона и начальной части среднего ИК-диапазона, где начинают появляться мощные полосы излучения продуктов горения. В работе [73] представлен спектр излучения пламени, образующегося при горении спирта в режиме моделирования огненного смерча, в среднем ИК-диапазоне. Заметим, что в этом режиме горения осуществляется принудительный приток окислителя и внешняя стабилизация потока, что, безусловно, оказывает влияние на результаты измерений.

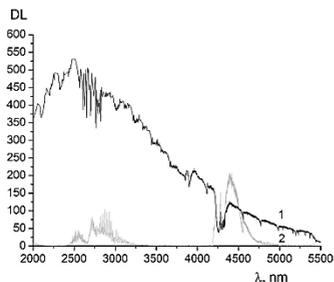
Для определения спектров излучения некоторых видов горючих материалов были проведены экспериментальные исследования. В качестве горючих материалов использовались: растительные горючие материалы (хвоя сосны, кедра, полевые растения), древесина сосны, березы и кедра, каменный уголь сорта ДЮ, спирт, керосин, бензин, дизельное топливо, пропано-бутановая смесь. Масса образцов растительных горючих материалов (хвоя кедра, сосны, полевые растения) составляла 50 г, масса древесины сосны, березы

и кедра – 200 г, масса каменного угля – 300 г, объем жидкостей – 20 мл.

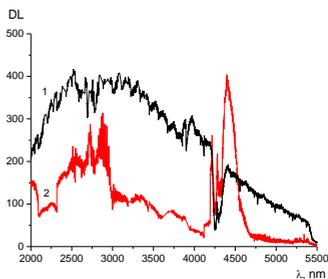
Регистрация спектра излучения пламени производилась при помощи спектрографа SOLAR ТП MS2001i с диапазоном измерений 2–5,3 мкм. Количество фотоприемных элементов – 384 шт. с шагом 25 мкм. Время регистрации спектра составляло $2 \cdot 10^{-4}$ с. Максимальная ошибка определения длины волны была равна $\pm 0,78$ нм; средний уровень шумов для шкалы DL (Digital Level) – 0,9 мВ, максимальный – 4,2 мВ. Быстродействие ИК фотоприёмной линейки – $2 \cdot 10^{-4}$ с без усреднения, максимальная скорость механизма развертки спектра – 10000 шагов/с. Измерения производились с расстояния 1 м от пламени. Температура в пламени контролировалась при помощи термопары типа ХА с диаметром спая 500 мкм. Постоянная времени термопары $\tau = 10$ с, что обеспечивало осреднение пульсаций температуры в пламени, которые присутствуют при горении растительных горючих материалов с частотами 2–7 Гц [74]. Погрешность измерения температуры в пламени не превышала 10 %. В соответствии с максимальными значениями показаний термопары в пламени производилась регистрация спектра излучения модели абсолютно черного тела с соответствующей температурой и на таком же расстоянии 1 м. В качестве модели АЧТ использовался излучатель АЧТ-45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 573 до 1373 К. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанции Meteoscan RST01923. Температура воздуха варьировалась в пределах $T_e = (288–293)$ К. Относительная влажность воздуха изменялась в пределах $\varphi = (20–35)$ %, атмосферное давление $P_e = (9,94 \cdot 10^4 – 1,02 \cdot 10^5)$ Па.

На рис. 2.1 приведены осредненные по времени регистрации спектры излучения пламени (кривая 2), образующегося при горении указанных выше горючих материалов, и спектр излучения АЧТ (кривая 1) при температуре, соответствующей максимальной температуре в пламени при горении рассматриваемых горючих

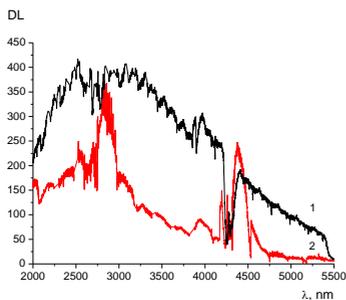
материалов. Эти спектры получены при одинаковых условиях и масштабах проведения экспериментов.



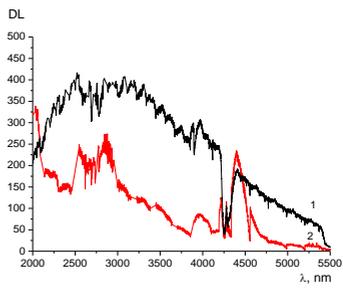
a



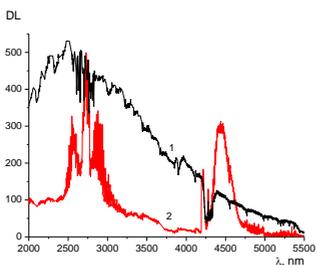
b



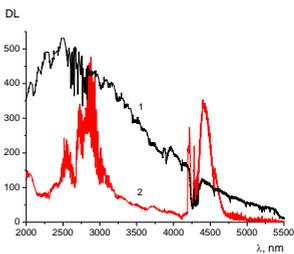
c



d



e



f

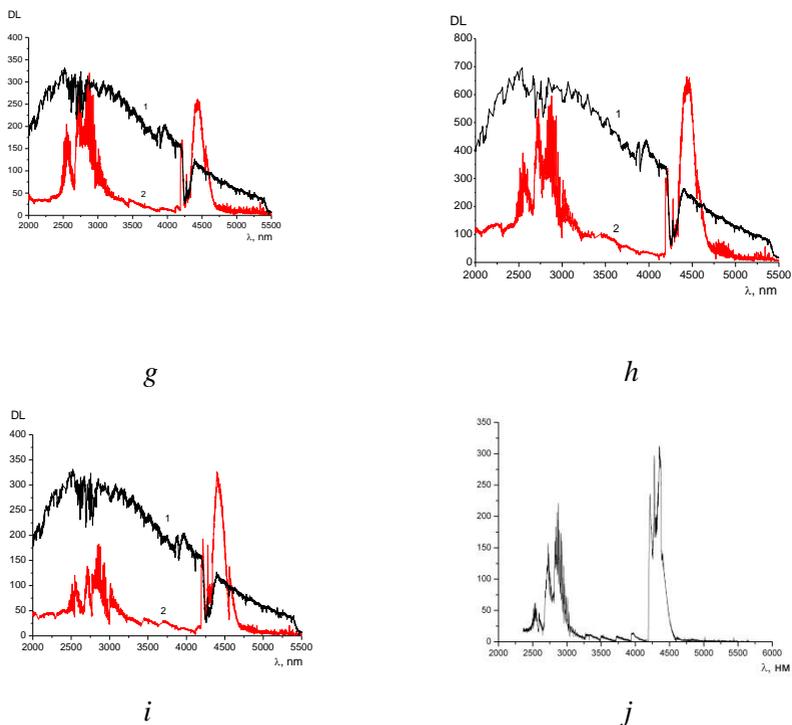


Рис. 2.1. Спектр излучения АЧТ (кривая 1) и пламени (кривая 2), образующегося при горении: *a* – пропан-бутановой смеси; *b* – бензина; *c* – керосина; *d* – дизельного топлива; *f* – хвой кедр; *g* – древесины сосны; *h* – древесины березы; *i* – древесины кедр; *j* – спирта

Следует отметить, что величины интенсивности излучения по оси ординат представлены на рис. 2.1 в цифровых значениях DL (Digital Level), которые соответствуют кодам АЦП с весом младшего разряда в 1 мВ. Комплексная калибровка прибора с фотоприемной охлаждаемой линейкой из 384 элементов производилась по излучению АЧТ (штифт Нэрнста), в процессе которой каждому пикселу линейки определялся свой поправочный коэффициент для выравнивания и нормирования уровня выходного сигнала DL.

Из анализа рис. 2.1 и состава продуктов горения рассматриваемых горючих материалов можно сделать вывод, что наиболее мощные полосы излучения соответствуют основным продуктам горения – парам воды и углекислому газу. Это наиболее ярко выражено в спектрах излучения для пропан-бутановой смеси и спирта, при горении которых другие компоненты, в особенности конденсированные продукты горения, отсутствуют. В случае горения других горючих материалов в спектре излучения пламени присутствует излучение разной интенсивности в диапазоне длин волн 3–4 мкм. Это излучение обусловлено в большей степени излучением конденсированных продуктов горения (сажи и дыма), концентрация которых различна для разных видов горючих материалов. Очевидно, что интенсивность излучения конденсированных продуктов горения в пламени связана с их концентрацией, которая, в свою очередь, зависит от типа горючего материала и полноты сгорания.

Необходимо отметить, что при горении растительных горючих материалов, которые рассматривались в данной работе, в спектре излучения пламени в начале спектрального интервала присутствуют полосы излучения, качественно похожие на части спектров излучения пламени в диапазоне 2,0–2,5 мкм, представленные в работах [70-72]. А спектр излучения пламени, образующегося при горении спирта, на рис. 1.4,*j* качественно практически идентичен спектру, представленному в работе [73], полученному на аналогичном измерительном оборудовании, с отличием в амплитуде измеренного сигнала. Это отличие обусловлено разными режимами горения топлива, которые обеспечивали разное поступление окислителя в зону горения.

Для регистрации поля температуры в пламени наиболее предпочтительными являются узкие спектральные интервалы, находящиеся в диапазоне длин волн 2,5–3,0 мкм, так как в этом диапазоне интенсивность излучения пламени не превышает интенсивность излучения АЧТ для соответствующей температуры, причем в этом спектральном интервале находятся достаточно мощные полосы излучения с эффективным коэффициентом излучения, близ-

ким к 1. Например, очень удобным на практике является спектральный диапазон 2,5–2,7 мкм, в который попадает излучение паров воды и углекислого газа, образующихся при горении.

Кроме того, следует иметь в виду, что тепловизоры калибруются по излучению АЧТ, и сравнивая спектр излучения пламени со спектром излучения АЧТ для одной и той же максимальной температуры, можно увидеть, что в диапазоне от 4 до 5 мкм в спектре излучения пламени присутствует излучение, превышающее по интенсивности излучение АЧТ. Из этого следует, что выбор узкого спектрального интервала в диапазоне 4,0–4,7 мкм нецелесообразен для измерения температуры в пламени, так как в этом случае необходимо учитывать концентрации продуктов горения CO и CO₂ и их вклад в интегральное излучение пламени, ибо в противном случае поправочный эффективный коэффициент излучения пламени будет превышать значение 1.

2.2. Определение эффективного коэффициента излучения

Очаг горения представляет собой динамическую полупрозрачную высокотемпературную оптическую среду. Интенсивность его излучения даже в выбранном узком спектральном диапазоне отличается от интенсивности излучения АЧТ. Этот факт требует определения поправочного эффективного коэффициента излучения пламени при проведении термографических исследований.

Данная задача имеет несколько путей решения, но в особенности в случае диффузионных и турбулентных пламен необходимо помнить о том, что в различных зонах горения присутствуют разные продукты горения и летучие продукты пиролиза. Это обуславливает неоднородность по пространству распределения коэффициента излучения пламени, что представляет значительные трудности, как в определении коэффициента излучения, так и в дальнейшей обработке термограмм. Поэтому наиболее доступным решением является нахождение эффективного коэффициента излучения пламени, применение которого дает приемлемые резуль-

таты измерений полей температуры и энергетической яркости пламени. Также необходимо иметь в виду, что коэффициент излучения пламени существенно зависит от выбранного рабочего спектрального интервала и горючего материала.

В данном разделе рассмотрены различные способы определения поправочного эффективного коэффициента излучения пламени и его зависимость от влагосодержания РГМ при работе в узком спектральном интервале, содержащем полосы излучения паров воды.

Спектральный коэффициент излучения ε_λ для некоторой среды определяется как отношение спектральной плотности потока излучения этой среды $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$ к спектральной плотности потока излучения АЧТ $\frac{dR_{BB}(\lambda, T)}{d\lambda}$ при той же температуре [75]:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{dR/d\lambda}{dR_{BB}/d\lambda}.$$

Иными словами, коэффициент излучения показывает, во сколько раз отличается плотность потока излучения данной среды от плотности потока излучения АЧТ в определенном интервале длин волн $\Delta\lambda$.

Используя спектры излучения пламени и АЧТ, полученные в предыдущем разделе, при $T_{BB} = \bar{T}_f$, где T_{BB} – температура АЧТ; \bar{T}_f – средняя температура в пламени, можно определить эффективный коэффициент излучения пламени для спектрального интервала (λ_1, λ_2) следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{BB}(\lambda) d\lambda},$$

где $I_f(\lambda)$ – интенсивность излучения пламени на длине волны;

$I_{BB}(\lambda)$ – интенсивность излучения АЧТ на длине волны λ .

Очевидно, что данный способ требует определения средней температуры в пламени, применения модели АЧТ с соответствующей температурой и наличия спектрометра.

В качестве второго способа определения ε_{eff} необходимо наличие тепловизора с соответствующим программным обеспечением, модели АЧТ и знание средней температуры в пламени. Модель АЧТ разогревается до средней температуры в пламени, и подбор ε_{eff} производится путем уравнивания цифровых значений температуры АЧТ и пламени или других энергетических характеристик, например, энергетической яркости.

Недостатком этого способа также является необходимость применения модели АЧТ, что в условиях эксперимента не всегда возможно и требует дополнительных затрат сил и времени.

Учитывая, что традиционно тепловизоры калибруются по излучению АЧТ, наиболее простым и часто применяющимся на практике способом определения ε_{eff} можно считать следующий способ. Одновременно со съемкой термограммы пламени в пламя помещается термопара (лучше несколько термопар), при помощи которой определяется температура термопары в пламени. Поскольку чаще всего приходится иметь дело с нестационарными пламенами, наиболее предпочтительно применять термопары с постоянной времени около 10 с. Для этих целей лучше всего подходят термопары типа ХА (К) (хромель-алюмель) с диаметром спая 250–500 мкм. Такие инерционные характеристики термопары позволяют инструментальным путем осреднить значительную часть пульсаций температуры в пламени, что упростит дальнейшую процедуру подбора ε_{eff} . Обычно в пламя помещается одна или несколько тер-

мопар. Они отчетливо видны на термографических изображениях ввиду отличия коэффициентов излучения термомпар и их теплоизоляции от пламени. В дальнейшем оператор выбирает некоторую окрестность вокруг термомпары. При этом излучение самой термомпары не должно попасть в эту окрестность. Затем, синхронизируя показания термомпары и средней температуры в окрестности термомпары, полученные с тепловизора, оператор производит подбор ϵ_{eff} в программе обработки результатов до достижения равенства между температурой термомпары и измеренной температурой в окрестности термомпары.

Этот подход приемлем как для стационарных, так и для нестационарных и турбулентных пламен. Его также можно применять в любом спектральном интервале работы тепловизора, выбранном с учетом результатов анализа спектра излучения пламени.

Следует отметить, что при проведении измерений вблизи топков, крупномасштабных пожаров для защиты корпуса ИК-камеры от перегрева используются теплозащитные материалы с теплоотражающими экранами, в которые со стороны объектива вмонтированы широкополосные оптические фильтры из материалов, прозрачных в ИК-диапазоне. В случае, если требуется ослабить интенсивность принимаемого тепловизором инфракрасного излучения от высокотемпературного объекта или лазера, можно использовать в оптическом тракте тепловизора диафрагмы и оптические фильтры.

Кроме сменных объективов на практике возникает необходимость иметь встраиваемые в ИК-камеру узкополосные оптические фильтры с соответствующей калибровкой по шкалам температур и других единиц измерений, полосы которых соответствуют излучению, например, водяного пара и других газообразных продуктов горения.

2.3. Влияние влагосодержания растительных горючих материалов на эффективный коэффициент излучения

Учитывая тот факт, что основной вклад в излучение пламени вносят газообразные продукты горения, в том числе и вода, то наличие воды в связанном и свободном состоянии в растительных горючих материалах должно оказывать влияние на значение эффективного коэффициента пламени.

Эксперименты проводились в лабораторных условиях, горючим материалом служила смесь степных растительных материалов (*Elytrigia repens* (Пырей ползучий), *Artemisia austriaca* (Полынь австрийская), *Festuca ovina* (Типчак, или Овсяница овечья)), характерных для района г. Карасук Новосибирской области, а также опад хвои сосны. Для измерений использовались тепловизор Inframetrics-760 с частотой 25 кадров в секунду со спектральным рабочим диапазоном 3–5 мкм и тепловизор JADE J530SB, оснащённый узкополосным оптическим фильтром в полосе 2,5–2,7 мкм с возможностью регистрации изображений в реальном времени до 170 кадров в секунду. Большое быстродействие тепловизора позволило провести хорошую дискретизацию данных по времени и пространству по месту размещения термопар. Масса РГМ определялась при помощи электронных весов A&D EK-1200G с точностью 10^{-2} кг, влагосодержание РГМ – при помощи анализатора влажности A&D MX-50 с точностью до 0,01 %. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанции Meteoscanner RST01923. Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали для влагосодержания $\delta w/w \cdot 100 \% \leq 3,3 \%$, для массы $\delta m/m \cdot 100 \% \leq 1,2 \%$, для атмосферного давления $\delta P_e/P_e \cdot 100 \% \leq 6,0 \%$, для температуры воздуха $\delta T/T \cdot 100 \% \leq 5,3 \%$, относительной влажности воздуха $\delta \varphi/\varphi \cdot 100 \% \leq 2,5 \%$ и времени $\delta t/t \cdot 100 \% \leq 4,3 \%$.

Контрольные температурные измерения проводились при помощи гребенок термопар типа ХА, расположенных в вертикальном направлении над поверхностью образца горючих материалов.

Масса исследуемых образцов составляла 40–52 г, влагосодержание w варьировалось от 3,6 до 21,6 %. Исследуемые образцы горючего материала без предварительного уплотнения помещались на площадку размером 0,2 x 0,2 м на (почву) грунт исследовательского стола – полигона. Зажигание образцов производилось при помощи точечного источника зажигания в центре образца, что обеспечивало полусферический фронт горения. Тепловизоры располагались на расстоянии 3 м от исследуемого образца.

На рис. 2.2,*a* приведена термограмма факела пламени, полученная при помощи тепловизоров JADE J530SB (при $\varepsilon = 0,61$ влагосодержание $w = 3,6$ %), и сечения, для которых изображены профили температур на рис. 1.7, а на рис. 1.6,*b* – термограмма и вертикальный профиль температуры, полученные при помощи тепловизора Inframetrics-760 (при $\varepsilon = 0,72$ влагосодержание $w = 3,6$ %).

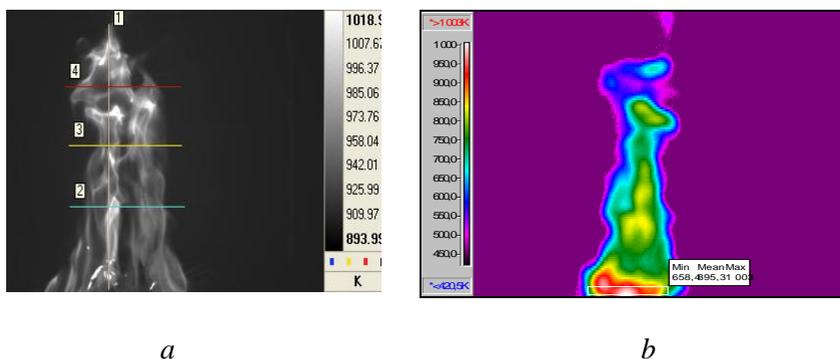


Рис. 2.2. Термограмма факела пламени: *a* – полученная на тепловизоре JADE J530SB в спектральном диапазоне 2,5–2,7 мкм; *b* – полученная на тепловизоре Inframetrics-760 в спектральном диапазоне 3–5 мкм

Сравнивая рис. 2.2,*a* и 2.2,*b*, видно, что при использовании диапазона длин волн 2,5–2,7 мкм отчетливо наблюдаются отдельные, хорошо излучающие области с высокими температурами. Вероят-

но это области, содержащие пары воды и углекислый газ, которые образуются при горении, и в этом спектральном диапазоне обладают хорошей излучающей способностью. Оба компонента продуктов горения имеют сильную полосу излучения шириной 0,1 мкм с центрами 2,66; 2,74 и 2,7 мкм соответственно [76]. Неравномерность профилей температуры в сечениях обусловлена случайным характером процесса горения.

Результаты сравнения скорректированных значений коэффициентов излучения пламени в диапазонах длин волн 2,5–2,7 мкм и 3–5 мкм (ϵ_{eff} [2,5; 2,7 мкм], ϵ_{eff} [3; 5 мкм]) после обработки данных распределения температуры в реперных точках тепловизионных измерений с термопарными датчиками приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Зависимость коэффициента излучения ϵ факела пламени на разной высоте от влагосодержания w СГМ

Влагосодержание w , %	Коэффициент излучения ϵ_{eff} [2,5–2,7 мкм] (JADE J530SB)	Коэффициент излучения ϵ_{eff} [3–5 мкм] (Inframetrics-760)
3,6	0,62±0,01	0,72±0,03
5,9	0,77±0,01	0,73±0,03
7,7	0,77±0,01	0,57±0,03
21,6	0,81±0,05	0,84±0,05

Удовлетворительные температурные данные при влагосодержании РГМ 3,6–7,7 % были получены с помощью тепловизора JADE J530SB при вводе в программу обработки значений коэффициента излучения пламени ϵ_{eff} [2,5; 2,7 мкм] = 0,62–0,78, а с помощью тепловизора Inframetrics-760 – при значениях, ϵ_{eff} [3; 5 мкм] = 0,57–0,75. Полученные значения ϵ объясняются наличием в этом узком интервале инфракрасного диапазона основных продуктов горения с мощными линиями излучения, это пары воды и диоксида углерода, включая и частицы сажи с обгоревшими фрагментами РГМ. Следует отметить, что для интенсивного источника излучения, такого как очаг горения, при расстояниях регистрации до 50 м

можно пренебречь ослаблением излучения атмосферой для окон прозрачности атмосферы, к которым относится область 2,5–2,7 мкм, а в области 3–5 мкм имеются окна прозрачности 3–4,2 мкм и сильные линии поглощения в области 4,2–4,5 мкм в основном CO_2 [77, 78]. При этом излучение пламени складывается из излучения частиц, генерируемых в пламени, и высокотемпературного спектра излучения за пределами области поглощения низкотемпературным атмосферным CO_2 [77, 78]. Следует отметить, что для спектрального диапазона 3–5 мкм значение коэффициента излучения значительно ниже вследствие его низкой избирательности из-за ширины спектра.

2.4. Применение методов ИК-диагностики в полунатурных полевых экспериментах

Коллективом кафедры физической и вычислительной механики, в состав которого входили и авторы этого пособия, значительное время проводились исследования распространения природных пожаров. До 2009 г. они проходили под руководством заслуженного деятеля науки РФ профессора А.М. Гришина. В данной главе обобщен некоторый опыт по организации и проведению полунатурных экспериментальных исследований по распространению природных пожаров, их воздействию на деревянные ограждения и слой торфа.

В мае 2011 г. на БЭК ИОА СО РАН проводился эксперимент [79] для исследования распространения пожара и воздействия его на деревянные постройки (рис. 2.2) и торфяную залежь. Для этого была выбрана экспериментальная площадка длиной 50 м и шириной 10 м. На ней размещались деревянные щиты высотой 1 м из досок (ель), которые имели размеры: 1000×100×15 мм, 1000×100×20 мм, 1000×100×25 мм и 1000×50 мм×25 мм. Доски шириной 100 мм сбивались в сплошной щит, а доски 1000×50×25 мм сбивались с промежутками 50 мм, как забор из штакетника (рис. 2.2), также был установлен брус 700×200×200 мм из сосны с есте-

ственным влагосодержанием (36,7 %), которого он достиг за 1 год хранения на открытом воздухе.



Рис. 2.2. Вид экспериментальной площадки с установленными деревянными щитами

На заднем плане рис. 2.2 видна мачта поста мониторинга ИОА СО РАН. С помощью приборов поста мониторинга определялся газовый состав продуктов горения (см. табл. 2.1), размеры дымовых частиц и их количественное распределение по размерам в одном литре воздуха. В конце экспериментальной полосы делались углубления, в которые помещались образцы вершинного и низинного типа торфа на одном уровне с поверхностью почвы (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Вид уложенных образцов торфа на экспериментальной площадке: *a* – низинный тип торфа; *b* – вершинный тип торфа

В качестве образцов использовали торф, собранный на двух типах болот в районе г. Томска. На верховом болоте (в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе или ряме) были отобраны образцы двух близких по физико-химическим свойствам видов торфа – фускум-торфа и магелланикум-торфа. Образцы вырезались из верхнего слоя болота вместе с чёсом и представляли собой параллелепипеды размером $300 \times 200 \times 200$ мм. Их можно объединить в один вид торфа – сфагновый верховой. На низинном болоте был отобран вахтово-осоково-гипновый торф аналогичного размера на глубине 0,2–0,4 м. Ботанический состав образцов торфа приведен в [80].

Все образцы древесины и торфа предварительно высушивались в сушильном шкафу ШСП 0.5-200 до влагосодержания ниже критического. Влагосодержание древесины составило 4,7 %, чёса – 11,2 % и торфа – 12,6 %. Для измерения зависимости теплового потока от пламени на высоте 50, 70 и 90 см от поверхности земли на внешней поверхности забора, расположенной со стороны фронта пожара, монтировался медный диск (тепломер) диаметром 30

мм и толщиной 5 мм. С задней стороны диска была зачеканена термопара типа ХА.

Температура воздуха T варьировалась в пределах 275–278 К. Относительная влажность воздуха ϕ равна 39–52 %. Атмосферное давление P_e составляло 751–759 мм рт. ст. Скорость ветра изменялась в диапазоне 1–6 м/с, температура почвы составила 275 К, влагосодержание – 43 %. Влагосодержание РГМ определялось при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью до 0,01 %. Влагосодержание доминирующих на экспериментальной площадке растений W составило: Пырей ползучий – 10,6 %; Василек скобеобразный (*Centaurea scabiosifolia*) – 11,3 %; Мышиный горошек (*Vicia cracca*) – 9,1 %; Ежа сборная (*Dactylis Glomerata*) – 10,8 %. Запас СГМ на экспериментальной площадке изменялся в пределах 0,172–0,263 кг/м².

Зажигание производилось равномерно по всей ширине площадки (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Зажигание экспериментальной площадки

Распространение фронта пожара и его структура в видимой области контролировались с помощью видеокамеры Sony DCR-DVD505E, в инфракрасной области – помощью тепловизоров JADE J530SB (с частотой съемки 50 кадров в секунду) и Inframetrics-760. Тепловизор JADE J530SB использовался с дисперсион-

ным фильтром, спектральный интервал которого составлял 2,5–2,7 мкм. Тепловизор Inframetrics-760 имел рабочий диапазон длин волн от 3 до 5 мкм. Для калибровки показаний тепловизоров дополнительно проводились температурные измерения при помощи гребенок термопар ХА, расположенных в продольном и вертикальном направлениях относительно выбранной полосы исследований. Термопары крепились на вертикальных стойках с шагом 0,3 м и располагались на удалении 0,2 м от стоек по горизонтали в направлении, параллельном фронту пожара. Тепловизор JADE J530SB и видеочкамера располагались на автовышке на высоте 20 м над поверхностью земли.

На рис. 2.5 показано воздействие фронта степного пожара на деревянные щиты.



Рис. 2.5. Воздействие фронта степного пожара на деревянные щиты

В результате эксперимента было обнаружено (рис. 2.6), что наименьшие повреждения получил щит из штакетника (доски 1000×50×25 мм, сколоченные с промежутками 50 мм).



Рис. 2.6. Результаты воздействия степного пожара на деревянные щиты

Можно предположить, что воспламенение щита из штакетника не произошло в связи с тем, что фронт пожара свободно преодолевал щит и продолжал свое распространение дальше. Тем самым щит подвергался воздействию пламени, конвективного потока и излучения значительно меньшее время (около 50 с). Щиты из досок шириной 100 мм подвергались воздействию высоких температур значительно более длительное время (около 95 с). В результате происходило воспламенение щитов. При этом следует отметить, что выбранный диапазон толщины досок не оказывал влияния на воспламенение щитов.

Для определения температуры поверхности деревянных щитов применялся метод, аналогичный используемому в [81, 82]: в деревянный щит заделывалась термомпара, показания которой являлись реперными для определения эффективного коэффициента излучения поверхности дерева в рабочем диапазоне длин волн тепловизора с учетом поглощения излучения продуктами пиролиза и горения РГМ. Для диапазона длин волн 2,5–2,7 мкм значения эффективного коэффициента излучения составили: $\varepsilon_{\text{эф}} = 0,68$. На рис. 2.7 приведена термограмма щита из штакетника.

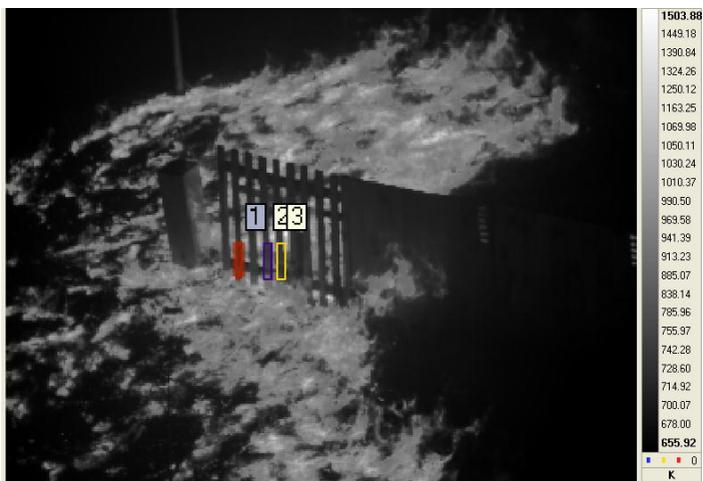


Рис. 2.7. Термограмма щита из штакетника

Из рисунка видно, что температура поверхности штакетника достигает значений 826-870 К, что согласуется с работой [83]. На рис. 2.8 приведена термограмма щита из досок толщиной 25 мм непосредственно перед воспламенением забора.

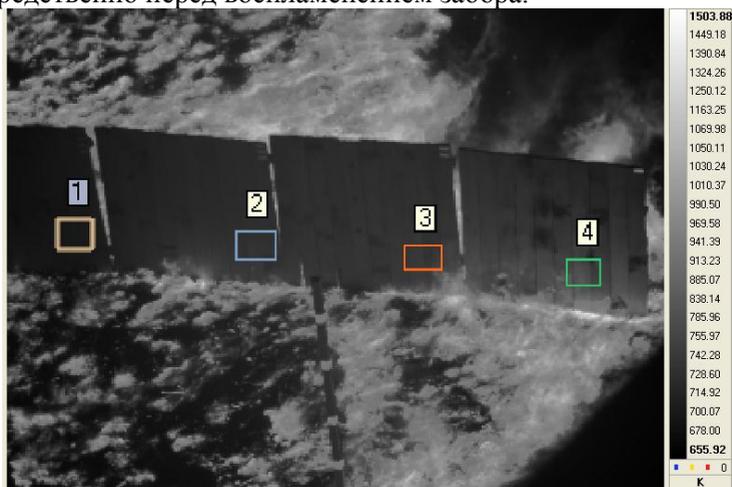


Рис. 2.8. Термограмма забора из доски толщиной 25 мм

Видно, что температура поверхности (области 1–4 на рис. 2.8) в зоне последующего воспламенения достигает 895–937 К, что превышает примерно на 60 градусов температуру поверхности штакетника (области 1–3 на рис. 2.7) и является причиной воспламенения. Можно предположить, что в данном случае на рост температуры поверхности оказывает влияние сплошность щита и соответственно рост времени на его нагрев, и воспламенение фронтом пожара.

Максимальная плотность теплового потока, действовавшего на деревянный щит, составляла: на высоте 50 см от поверхности земли $q_{\max} = 3641 \text{ Вт/м}^2$, на высоте 70 см $q_{\max} = 8360 \text{ Вт/м}^2$. Это связано с ботанической структурой слоя РГМ, при которой распределение массы по высоте не равномерно, и на высоте 50–70 см от поверхности почвы находится максимальный объем горючих материалов [81].

На рис. 2.9 приведена термограмма горения образца вершинного торфа, полученная при $\varepsilon = 0,96$. Данное значение ε определено в лабораторных условиях для диапазона длин волн 2,5–2,7 мкм. Как уже отмечалось выше, образец вершинного торфа представлял собой сам торф и располагающийся на нем чёс из мхов и растений. Следует отметить, что в условиях эксперимента произошло воспламенение только образцов вершинного торфа. Воспламенение образцов низинного торфа не происходило. Можно предположить, что на это повлияли большая плотность, степень разложения низинного торфа, а также отсутствие проводника горения от полевого пожара к торфяному (чёса).

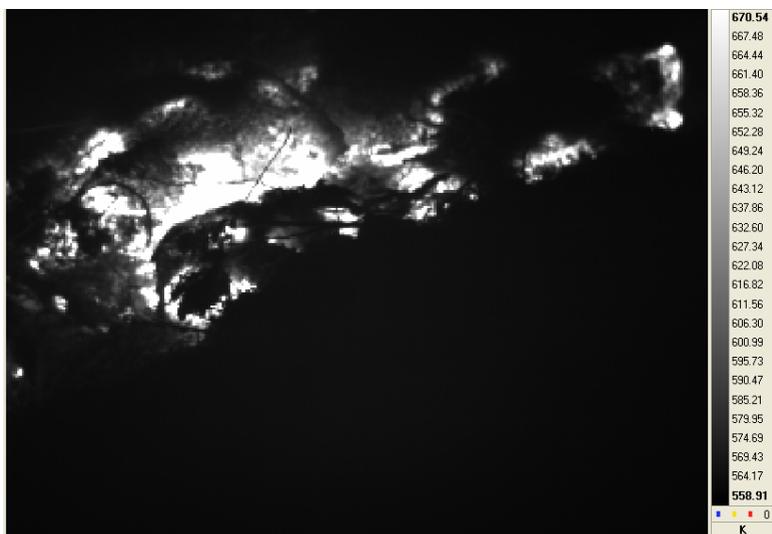


Рис. 2.9. Термограмма горения образцов чёса

Следует отметить, что при горении вершинного торфа температура его поверхности достигала 890–970 К, а на границе примыкания образцов чёса и вершинного торфа был обнаружен пламенный режим горения, не характерный для торфа (выделенная область *I* на рис. 2.10). При этом температуры в зоне горения достигали значений 1020 К.

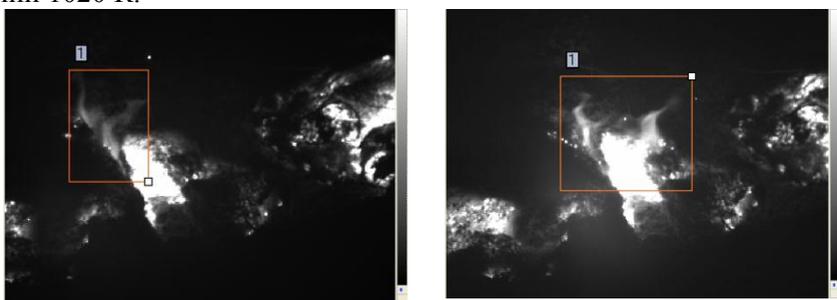


Рис. 2.10. Пламенный режим горения на границе между образцами чёса и вершинного торфа

Во всех натуральных экспериментах, приведенных в данной работе, производилось окашивание экспериментальных площадок в следующем порядке: полоса шириной не менее 3 м с трех сторон (со стороны зажигания и по бокам вдоль направления распространения фронта горения), шириной 5 м в конце экспериментальной площадки. Этот подход обеспечивал нераспространение пожара за пределы экспериментальной площадки. Однако если ветер резко менял свое направление и его порыв был довольно сильным, то полоса шириной 3 м не обеспечивала достаточной защиты от переноса пожара за пределы экспериментальной площадки.

Из данных фактов можно делать вывод, что для обеспечения пожарной безопасности объектов жизнедеятельности человека и населенного пункта достаточно производить регулярное окашивание периметра шириной не менее 5 м с удалением РГМ, а заборы для снижения риска их воспламенения делать продуваемыми. Следует отметить, что деревянные конструкции из бруса с естественным влагосодержанием, характерным для жилых построек, при кратковременном воздействии степного пожара, возникающего при естественном продвижении фронта пожара под действием ветра, не получают значительных повреждений и не воспламеняются. Из этого следует, что тепловой энергии фронта степного пожара при запасе $0,172-0,263 \text{ кг/м}^2$ недостаточно для воспламенения жилых домов из бруса, а их воспламенение возможно только при довольно продолжительном воздействии огня, что возникает на практике при захлавленной придомовой территории, когда степной пожар поджигает вначале мусор, пиломатериалы, топливо, находящиеся в непосредственной близости от строения, а они, в свою очередь, являются причиной возникновения городских и поселковых пожаров.

Контрольные вопросы:

1. Что характеризует спектр излучения среды?
2. В чем принципиальное различие спектров излучения газов и серых тел?

3. Чем обусловлен спектр излучения пламени?
4. Что такое коэффициент излучения?
5. Какими способами можно определить эффективный коэффициент излучения среды?
6. Какие основные принципы выбора спектрального диапазона исследования поля температуры в пламени и энергетических характеристик экранированного пламенем объекта?
7. Что определяет закон Планка?
8. Что такое «абсолютно черное тело», и какими свойствами оно обладает?
9. Что такое «серое тело»?

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

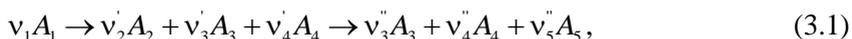
3.1. Физическая постановка задачи о зажигании деревянной стены от действия фронта лесного пожара

Анализ наблюдений за горением древесины, изложенный в работах [84–87], позволяет выделить следующие основные физико-химические процессы (этапы): 1) нагрев от фронта лесного пожара вследствие конвекции и излучения; 2) сушка древесины; 3) пиролиз древесины, образование конденсированного (кокса) и газообразных горючих продуктов пиролиза; 4) горение газообразных горючих продуктов пиролиза; 5) горение конденсированного продукта пиролиза (коксыка).

При горении древесины имеют место следующие физико-химические процессы: 1) кинетический режим горения, при котором скорость процесса определяется скоростью протекания гетерогенных химических реакций окисления конденсированных продуктов пиролиза древесины; 2) диффузионный режим горения, при котором скорость разрушения древесины определяется скоростью диффузии окислителя (кислорода).

Будем считать, что зажигание и горение древесины возникает в результате совместного действия конвективного – q_w и лучистого – q_σ потока. Действие конвективного потока моделируется температурой очага T_ϵ и коэффициентами тепло- и массообмена α_ϵ и β_ϵ . Рассматривается пространственная задача в параллелепипеде (рис. 3.1), где ось x_3 направлена вертикально вверх, начало координат берется на нижней стороне F_3 бетонной подложки. Суммарный тепловой поток $Q_w = q_w + q_\sigma$ направлен по оси x_1 перпендикулярно волокнам древесины рассматриваемых пород, при этом вне области G_σ лучистый тепловой поток отсутствует.

При выводе системы уравнений, выражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии будем считать, что: 1) конденсированная фаза древесины в процессе горения состоит из четырех компонентов: исходного сухого материала, воды, конденсированного продукта пиролиза (угля) и продукта горения угля – золы; 2) при горении древесины в результате нагревания имеет место необратимая гомогенная реакция разложения



где $A_i, i = 1, \dots, 5$ – символы исходного конденсированного вещества – влажной древесины, связанной воды, конденсированного продукта пиролиза, газообразных горючих продуктов реакции пиролиза и пепла; $v_1, v_2', v_3', v_4', v_3'', v_4'', v_5''$ – соответствующие стехиометрические коэффициенты.

Известно [88], что при термической деструкции природных полимеров (в том числе и имеющих древесное происхождение) протекают как эндо-, так и экзотермические реакции. Причиной эндотермического эффекта является процесс «плавления» лигнина, протекающий с поглощением тепла. Процессы же, идущие с выделением тепла при недостатке (или без доступа кислорода) служат реакции образования структуры полукокса. Кроме того, реакция разложения древесины (без доступа воздуха) становится экзотермической примерно при 548 – 553 К [89], причем реакции разложения лигнина и целлюлозы происходят с выделением тепла соответственно при 543 и 573 К.

Первая стадия реакции пиролиза (3.1) включает в себя стадию разложения древесины [16, 90], которая протекает с поглощением тепла и стадию образования кокса, которая может быть интерпретирована как реакция синтеза, и она имеет экзотермический характер [91, 92]. Вторая – стадия образования пепла из кокса, которая происходит с экзотермическим эффектом. Считается, что энергия активации и предэкспоненты процессов разложения и синтеза близки друг другу и поэтому первую стадию в целом можно моде-

лизовать как одностадийную химическую реакцию с переменным тепловым эффектом [92]. Температура перехода T_{s*} , при которой происходит смена этих режимов считается известной $T_{s*} = 550$ К [84, 85].

Для упрощения анализа, следуя [93, 94], будем предполагать, что: 1) древесина является двухтемпературной горючей недеформируемой пористой средой, состоящей из следующих фаз: φ_1 – сухого органического вещества (сухая древесина состоит из лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы [13, 14]), φ_2 – гигроскопической воды, связанной с этим органическим веществом в порах [13, 14], φ_3 – коксика (продукта пиролиза органического вещества), а также конденсированного и газообразного продуктов горения (объемные доли φ_4 и φ_5); 2) газовая фаза в слое древесины состоит из семи компонентов: CO , H_2O , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 и N_2 массовые концентрации которых c_α , где $\alpha = \overline{1-7}$ соответственно; 3) в самом слое древесины имеет место испарение связанной воды и учитывается процесс фильтрации.

В целом считается, что фронт пожара при его заглублиении в слой древесины состоит из зон: прогрева, сушки, пиролиза, зоны горения газообразных и конденсированных продуктов пиролиза высушенной древесины и слоя пепла.

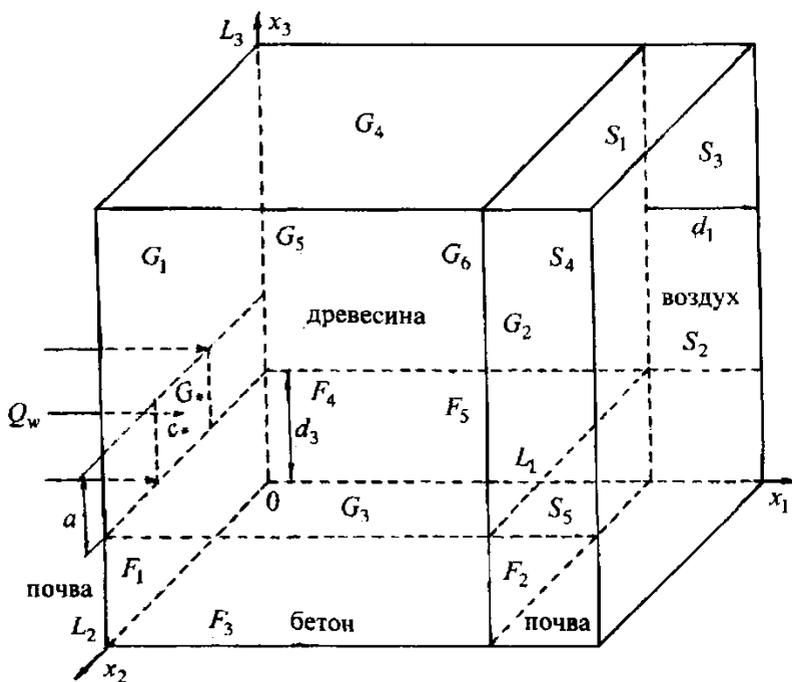


Рис. 3.1. Схема теплообмена древесины на бетонной подложке с внешней средой

3.2. Математическая постановка задачи

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений [93, 94]:

$$\frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_5 \varphi_5 \vec{W}) = Q, \quad (3.2)$$

$$\operatorname{grad} P = -\frac{\mu}{\xi} \vec{W} - \rho_5 g, \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_{is} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_1}{\partial x_j} \right) + A_v (T_2 - T_1) + \sum_{i=1}^4 q_{is} R_{is}, \quad (3.4)$$

$$\rho_5 \varphi_5 c_{p5} \frac{dT_2}{dt} = \operatorname{div}(\lambda_5 \varphi_5 \operatorname{grad} T_2) + \rho_5 \varphi_5 \operatorname{grad} T_2 \sum_{\alpha=1}^N c_{p\alpha} D_\alpha \operatorname{grad} c_\alpha + \\ + \sum_{i=1}^3 q_i r_i + c_{1s} (T_1 - T_2) (1 - \alpha_c) R_{1s} + A_v (T_1 - T_2) + c_{2s} (T_1 - T_2) R_{2s} \quad (3.5)$$

$$\rho_g c_{pg} \frac{\partial T_3}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_g \operatorname{grad} T_3), \quad (3.6)$$

$$\rho_b c_{pb} \frac{\partial T_4}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_b \operatorname{grad} T_4), \quad (3.7)$$

$$\rho_5 \varphi_5 \frac{dc_\alpha}{dt} = \operatorname{div}(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \operatorname{grad} c_\alpha) - c_\alpha Q + R_\alpha, \quad \alpha = 1, \dots, N-1, \quad (3.8)$$

$$\rho_{1s} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s},$$

$$\rho_{3s} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - R_{3s} - \alpha_4 R_{3s}, \quad \rho_{4s} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = R_{4s}, \quad (3.9)$$

$$\sum_{\alpha=1}^N c_\alpha = 1, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad P = \frac{\rho_5 R T_2}{M}. \quad (3.10)$$

Здесь и ниже a – высота грани G_* вдоль оси x_3 ; A_s – коэффициент аккомодации; A_v – объемный коэффициент теплообмена между газовой и конденсированной фазой; c_* – центр очага горения в области G_* ; c_p – коэффициент удельной теплоемкости, $c_\alpha, \alpha = 1, \dots, N$ – массовая концентрация компонентов; $F_i, i = 1, \dots, 5, G_j; j = 1-6$ – грани параллелепипеда на рис. 3.1; G_2, G_3 – плоскости сопряжения древесина – воздух, древесина – бетон; g – ускорение свободного падения; d_1 – толщина воздушного слоя вдоль оси x_1 ; d_3 – толщина бетонной подложки; d_p – диаметр цилиндрических пор, D – коэффициент диффузии; $E_i, i = 1, 2, 3$ –

энергия активации гомогенных реакций окисления (3.19); E_{is} , $i = 1, 2, 3$ – энергия активации реакций R_{1s} , R_{2s} , R_{3s} , R_{4s} из (3.20); (3.22); r_i ; $i = 1, 2, 3$ – опорные шага разностной схемы по пространственным координатам; k – постоянная Больцмана; k_i , $i = 1, 2, 3$ – предэкспоненциальные множители реакций окисления (3.19); k_{is} , $i = \overline{1,4}$ – предэкспоненциальные множители реакций r_1 , R_{2s} , T_4 , R_{4s} ; M – молекулярный вес; $L_i, i = 1, 2, 3$ – длины сторон параллелепипеда на рис. 3.1; P – давление газа в порах; q_i , $i = 1, 2, 3$ – тепловые эффекты реакций окисления (3.19); T_1 , $i = \overline{1,4}$, – тепловые эффекты реакций R_{1s} , R_{2s} , R_{3s} , T_2 , r_1 , r_2 S_i – молярно-объемные скорости окисления оксида углерода, метана и водорода; R – универсальная газовая постоянная; R_{1s} – массовая скорость разложения сухого реагента (древесины); R_{2s} – массовая скорость испарения связанной воды в древесине; R_{3s} – массовая скорость горения коксика; R_{4s} – массовая скорость образования золы; R_i , $i = \overline{1,6}$, – массовая скорость образования и исчезновения компонент газовой фазы в уравнении диффузии (3.8); s_2 – удельная поверхность испарения воды; s_3 – удельная поверхность реагирования углерода; S_i $i = 1, \dots, 5$ – грани параллелепипеда; t – время; T_1 – температура каркаса древесины; T_2 – температура газовой фазы в порах реагента; T_3 – температура воздуха; T_4 – температура бетона; T_* – температура горения древесины; T_{1w} – температура поверхности каркаса древесины; \vec{W} – вектор скорости фильтрации; x_1 , x_2 , x_3 – оси декартовой системы координат; $x_j = c_j M / M_j$; $j = 1, \dots, 5$ – молярная концентрация; $y_i = \rho c_i / M$; $i = \overline{1,6}$ – молярно-объемная концентра $\alpha_4 = \nu_4'' M_{4s} / (\nu_3 M_{3s})$ – приведенный стехиометрический коэффициент [95], а правая часть

третьего уравнения (3.9) характеризует массовую скорость образования и исчезновения коксика, α_e – коэффициент теплообмена; α_c – доля кокса в ходе реакции пиролиза древесины; β_e – коэффициент массообмена; $\varepsilon_{j,\alpha}$ – потенциальная энергия взаимодействия молекул; $\eta_i, i = \overline{1, 5}$ – безразмерные параметры; λ – коэффициент теплопроводности; $\mu_n (T_2/T_n)^{0.5}$ – коэффициент динамической вязкости смеси газов; $\xi = \xi_* \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2$ – функция, описывающая влияние объемной доли газа на сопротивление; $\xi_* = d_p^2 / 120$ – характерная проницаемость; ρ – плотность; ρ_5 – плотность газовой фазы; $\sigma_{i,j}$ – сечения взаимодействия молекул; $\varphi_i, i = \overline{1-4}$ – безразмерные объемные доли; φ_5 – объемная доля газовой фазы, определяемая второй формулой из (3.10), ω – линейная скорость горения вглубь древесины при $x_3 = c_*, x_2 = L_2 / 2, c_* = d_3 + a / 2$. Индексы: w – нагреваемая сторона поверхности древесины при $x_1 = 0$; 1 внизу – каркас древесины; 2 – газовая фаза в пористом реагенте; s внизу и вверху – конденсированная фаза; e – внешняя среда; * – характерная величина; c – кокс; n – начальное значение; 1, ..., 7 – в газовой фазе соответствуют оксиду углерода, парам воды, кислороду, диоксиду углерода, метану, водороду, азоту; 1s, ..., 4s – в конденсированной фазе – древесина, связанная вода, кокс, зола; b – бетон; g – воздух; p – пора; v – объем; bas – базисный; σ – лучистый поток тепла из газовой фазы; dr – сухая древесина; n – нормализованная плотность древесины; $\varphi_i, i = 2, 3, 4$ – связанная вода, кокс, пепел; \pm вверху – реакциям синтеза и разложения при пиролизе древесины; G_1 – грань параллелепипеда.

В системе (3.2)–(3.9) уравнения (3.6) и (3.7) – уравнения теплопроводности для воздуха за стенкой древесины G_2 и бетонной подложки (см. рис. 3.1).

Для решения системы уравнений (3.2)–(3.9) были использованы следующие начальные условия [96]:

$$T_i|_{t=0} = T_n, \quad i = 1, \dots, 4, \quad c_\alpha|_{t=0} = c_{\alpha n}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \\ \rho_5|_{t=0} = \rho_{5n}, \quad \Phi_i|_{t=0} = \Phi_{in}, \quad i = 1, \dots, 4; \quad (3.11)$$

балансовые граничные условия [97]

$$(1 - \Phi_5)[q_\sigma + \alpha_e(T_e - T_{1,G_+})] = -\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{G_+}, \\ (1 - \Phi_5)\alpha_{G_1}(T_e - T_{1,G_1}) = -\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{G_1}, \\ \Phi_5[q_\sigma + \alpha_e(T_e - T_{2,G_+})] = -\Phi_5\lambda_5 \frac{\partial T_2}{\partial x_1} \Big|_{G_+}, \\ \Phi_5\alpha_{G_1}(T_e - T_{2,G_1}) = -\Phi_5\lambda_5 \frac{\partial T_2}{\partial x_1} \Big|_{G_1}; \quad (3.12)$$

условия сопряжения на границе раздела дерево – бетон (G_3) и дерево – воздух (G_2)

$$\lambda_b \frac{\partial T_4}{\partial x_3} \Big|_{G_3} = \lambda_{s3} \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{G_3}, \quad T_4|_{G_3} = T_1|_{G_3}, \quad T_1|_{G_3} = T_2|_{G_3}, \\ \lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{G_2} = \lambda_g \frac{\partial T_3}{\partial x_1} \Big|_{G_2}, \quad T_1|_{G_2} = T_3|_{G_2}, \quad T_1|_{G_2} = T_2|_{G_2}; \quad (3.13)$$

на грани бетонной подложки и почвы F_1 задается условие тепловой изоляции, а на остальных границах F_2, \dots, F_5 – начальная температура

$$\frac{\partial T_4}{\partial x_1} \Big|_{F_1} = 0, \quad T_4|_{F_i} = T_n, \quad i = 2, \dots, 5. \quad (3.14)$$

Начальная температура задается на остальных гранях параллелепипеда, так как тепловая волна за время окончания теплового воздействия не доходит до этих границ

$$T_1|_{G_j} = T_2|_{G_j} = T_n, \quad j = 4, 5, 6, \quad T_3|_{S_i} = T_n, \quad i = 2, \dots, 5. \quad (3.15)$$

Используя аналогию процессов тепло- и массообмена [15] ($\beta_e = \alpha_e / c_{p5}$), имеем граничные условия

$$\begin{aligned} \beta_e (c_{\alpha,e} - c_{\alpha,w}) &= \Phi_5 \rho_5 D_\alpha \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} \right|_{G_e}, \\ \beta_{G_1} (c_{\alpha,G_1} - c_{\alpha,w}) &= \Phi_5 \rho_5 D_\alpha \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} \right|_{G_1}; \end{aligned} \quad (3.16)$$

на гранях G_2 и G_3 задается условие – отсутствие выгорания концентраций компонент

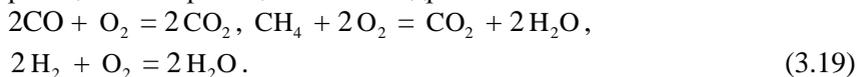
$$\left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} \right|_{G_2} = 0, \quad \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} \right|_{G_3} = 0, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1; \quad (3.17)$$

на остальных гранях G_4 , G_5 , G_6 берутся начальные значения концентраций, отвечающие начальной температуре T_n и, наконец, задается равенство давления в порах на границах G_i , $i = 1, \dots, 6$ и во внешней среде, а также условие не протекания газовой смеси на границе бетонной подложки G_3

$$\begin{aligned} c_\alpha \Big|_{G_i} &= c_{\alpha n}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \quad i = 4, 5, 6, \\ P \Big|_{G_e} &= P_e, \quad P \Big|_{G_i} = P_n, \quad i = 1, \dots, 6, \quad \left. \frac{\partial P}{\partial x_3} \right|_{G_3} = 0. \end{aligned} \quad (3.18)$$

3.3. Коэффициенты переноса, теплофизические и термокинетические постоянные

Известно [95, 98], что итоговыми гомогенными химическими реакциями в пронизываемом слое древесины являются:



Уравнения химической кинетики для реакций окисления оксида углерода, метана и водорода имеют вид [98]

$$\frac{dy_1}{dt} = -k_1 x_1 x_3^{0.25} T_2^{-2.5} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_2}\right) = -r_1, \quad \frac{dy_2}{dt} = -k_2 x_5^{-0.5} x_3^{1.5} \frac{P}{T_2} \times \\ \times \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right) = -r_2, \quad \frac{dy_3}{dt} = -k_3 y_3 y_6^{1.5} \exp\left(-\frac{E_3}{RT_2}\right) = -r_3.$$

Для испарения связанной воды в многофазной среде – древесине используется аналог закона Герца – Кнудсена [95, 99]

$$R_{2s} = \frac{s_2 M_2 A_s \Phi_2 [k_{2s} \exp(-E_{2s}/RT_1) - P_2]}{(2\pi RT_1 M_2)^{0.5}}. \quad (3.20)$$

Для нахождения парциального давления паров воды в слое торфа P_2 используется закон Дальтона [99], согласно которому

$$P_2/P = x_2. \text{ Тогда для } P_2 \text{ имеем выражение}$$

$$P_2 = P c_2 \frac{M}{M_2},$$

где давление смеси газов P находится из последней формулы (3.10).

Эффективный коэффициент диффузии берется по формуле Фристрона – Вестенберга [92, 100]

$$D_\alpha = (1 - c_\alpha) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \alpha}}^N \frac{x_j}{d_{\alpha,j}} \right)^{-1}, \quad d_{\alpha,j} = 1.66 \cdot 10^{-7} \frac{[(M_\alpha + M_j)/(M_\alpha M_j)]^{0.5} T_2^{1.5}}{P \sigma_{j,\alpha}^2 (\varepsilon_{j,\alpha}/kT_2)^{0.17}}$$

Формула для коэффициентов теплопроводности компонента газовой фазы $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, N$ взята из [101]

$$\lambda_{sj} = \lambda_{1j}^s + \sum_{i=2}^4 \lambda_{\Phi_i}^s \Phi_i, \quad \lambda_j = \lambda_j^0 (0.115 + 0.354 \frac{C_{p,j}}{R}),$$

$$\lambda_i^0 = 8.32 \cdot 10^{-2} \frac{(M_i/T_2)^{0.5}}{\sigma_i^2 (\varepsilon_i/kT_2)^{0.147}},$$

$$c_{p5} = \sum_{j=1}^N c_{p,j} c_j, \quad \lambda_{sj} = \lambda_{1j}^s + \sum_{i=2}^4 \lambda_{\varphi_i}^s \varphi_i, \quad j = 1, 2, 3. \quad (3.21)$$

Коэффициенты теплоемкости компонента газовой фазы $c_{p,j} = a_j + b_j T_2 + c_j / T_2^2$, $j = 1, \dots, 7$ брались из [102].

Выражения для $R_1 - R_6$, Q , $R_{1s} - R_{4s}$, α_c , $\eta_1 - \eta_5$ в уравнениях (3.2), (3.8), (3.9), имеют вид [93, 96]

$$\begin{aligned} R_1 &= \eta_1 R_{1s} - M_1 r_1, \quad R_2 = \eta_2 R_{1s} - R_{2s} + 2 M_2 (r_2 + r_3), \\ R_3 &= -\eta_3 R_{3s} - M_3 (r_1 + 2 r_2 + r_3), \\ R_4 &= M_4 (2 r_1 + r_2), \quad R_5 = \eta_4 R_{1s} - M_5 r_2, \\ R_6 &= \eta_5 R_{1s} - 2 M_6 r_3, \quad R_{1s} = k_{1s} \rho_{1s} \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{1s}}{RT_1}\right), \\ Q &= (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + R_{3s}, \\ R_{3s} &= \frac{M_c}{M_3} s_3 k_{3s} \varphi_5 \rho_5 \varphi_3 c_3 \exp\left(-\frac{E_{3s}}{RT_1}\right), \quad R_{4s} = \alpha_4 R_{3s}, \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\alpha_c = \frac{M_c}{M_H - M_c}, \quad \eta_1 = \frac{M_1}{M_H}, \quad \eta_2 = \frac{M_2}{M_H}, \quad \eta_3 = \frac{M_3}{M_c},$$

$$\eta_4 = \frac{M_5}{M_H}, \quad \eta_5 = \frac{M_6}{M_H}.$$

Сухая древесина представляет собой двухфазную систему [91], включающую в себя древесинное вещество (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин) и воздух. Однако доля воздуха (по массе) в древесине крайне мала, и теплоемкость сухой древесины практически равна теплоемкости древесинного вещества. Поскольку состав древесинного вещества у всех пород одинаков, удельная теплоемкость древесины не зависит от породы и плотности и по данным [91] при 273 К для абсолютно сухой древесины равна $1.55 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). С повышением температуры удельная теплоемкость древесины несколько повышается по линейному закону и при 373 К увеличивается примерно на 25 %.

В (3.21) коэффициент теплопроводности сухой древесины в продольном направлении $\lambda_{1j}^s, j = 1, 2, 3$, как известно [1, 9, 13], в два раза выше, чем в поперечном и в зависимости от плотности породы определяется в виде [13]

$$\lambda_{1j}^s = \lambda_{dr}^s K_p N. \quad (3.23)$$

В (3.23) λ_{dr}^s – коэффициент теплопроводности абсолютно сухой древесины, взятой из [13]; K_p – коэффициент, учитывающий базисную (условную) плотность древесины; N – учитывает направление теплового потока. Для тангенсального направления поперек волокон (по касательной к годичным слоям) $N = 1$, радиального $N = 1.15$, вдоль волокон хвойных и рассеянно-сосудистых пород: береза, лиственница, тополь, сосна, ель, кедр $N = 2.2$, для кольцесосудистых: дуб $N = 1.6$. Значения K_p и базисной плотности ρ_{bas} взяты из [91].

В табл. 3.1 приведено K_p в порядке возрастания базисной плотности согласно нумерации: 1 – ель; 2 – тополь; 3 – сосна; 4 – береза; 5 – лиственница; 6 – дуб. В табл. 3.2 даны плотности нормализованной ρ_n и абсолютно сухой древесины ρ_{1s} , коэффициент теплопроводности поперек и вдоль волокон древесины, коэффициент температуропроводности $\chi_{11}^s = \lambda_{11}^s / (\rho_{1s} c_{1s})$, начальная объемная доля сухой древесины $\phi_{1н}$ определенной породы и начальная пористость. Начальная объемная доля связанной воды $\phi_{2н}$ вычисляется по формуле [16]:

$$\phi_{2н} = \frac{\rho_n - \rho_{1s} \phi_{1н}}{\rho_{2s}}.$$

Таблица 3.1

Коэффициент, учитывающий базисную плотность древесины

№	1	2	3	4	5	6
ρ_{bas}	360	360	400	500	520	550
K_p	1,0	1,0	1,05	1,22	1,29	1,36

Таблица 3.2

Зависимости плотности, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, а так же начальной объемной доли сухого реагента и начальной пористости от породы древесины

№	1	2	3	4	5	6
ρ_n , кг/м ³	445	455	500	630	660	690
ρ_{1s} , кг/м ³	420	430	470	600	630	650
λ_{11}^s , Вт/(м·К)	0.134	0.134	0.14	0.163	0.174	0.182
λ_{12}^s , Вт/(м·К)	0.116	0.116	0.122	0.142	0.15	0.158
λ_{13}^s , Вт/(м·К)	0.256	0.256	0.268	0.312	0.33	0.253
μ , м ² /с	0.177	0.173	0.166	0.151	0.153	0.156
$\varphi_{1н}$	0.28	0.29	0.307	0.374	0.404	0.434
$\varphi_{5н}$	0.552	0.545	0.515	0.436	0.393	0.362

3.4. Методика расчета и исходные данные

Система уравнений (3.2)–(3.9) с краевыми условиями (3.11)–(3.18) решалась численно при помощи итерационно-интерполяционного метода [22]. Для варианта породы сосны $\varphi_{1н} = 0.307$; $\varphi_{2н} = 0.178$; $\rho_{1s} = 470$ кг/м³ и входных данных из этого раздела была проделана процедура тестирования численного метода. Для решения математической модели использовалась последовательность сгущающихся сеток по пространству: $h_{x_1} = 0.5 \cdot 10^{-3}$ м, $h_{x_3} = 0.09375$ м; $h_{x_2} = 0.125$ м; и бралось $h_i = 2h_{x_i}$, $h_i = h_{x_i} / 2$, $h_i = h_{x_i} / 4$, $i = 1, 2, 3$.

Фиксировали следующие параметры: время зажигания t_* древесины, когда максимальная температура в образце достигает 1250 К, температуру каркаса и газа в различные моменты времени, а также среднее значение скорости горения древесины от времени. При

этом шаг по времени был переменным и вырабатывался автоматически по заданной точности, одинаковой для всех сеток по пространству.

Погрешность времени зажигания t_* падала: $\varepsilon_1 = 16.4\%$, $\varepsilon_2 = 7.3\%$, $\varepsilon_3 = 3.7\%$. Тенденция уменьшения погрешности по температуре древесины сохраняется: $\varepsilon_1 = 7.4\%$, $\varepsilon_2 = 2.5\%$, $\varepsilon_3 = 1.8\%$. Расхождение результатов по средней скорости горения также снижалось: $\varepsilon_1 = 18.5\%$, $\varepsilon_2 = 11.4\%$, $\varepsilon_3 = 5.6\%$. Ниже результаты расчета получены для шагов по пространству $h_{x_1} = 0.25 \cdot 10^{-3}$ м, $h_{x_3} = 0.04687$ м, $h_{x_2} = 0.0625$ м.

Линейная скорость поверхности горения древесины определялась по формуле

$$\omega = \frac{(\Delta x)_*}{(\Delta t)_*} = \frac{x_{1(k)} - x_{1(k-1)}}{t_{*(k)} - t_{*(k-1)}}. \quad (3.24)$$

В (3.24) $t_{*(k)}$ и $t_{*(k-1)}$ – время достижения температуры горения T_* при $x_1 = x_{1(k)}$ и $x_1 = x_{1(k-1)}$, где k – текущий, а $(k-1)$ – предыдущий слой по x_1 в центре ($x_2 = 0.5L_2$, $c_* = d_3 + a/2$) области G_* на рис. 3.1. Для теплофизических и термокинетических параметров древесины использовались данные работ [84, 85, 90, 98–102]. Теплофизические характеристики воды и водяного пара брались из [103].

В табл. 3.3 – 3.5 приведены теплофизические, термокинетические коэффициенты древесины, теплофизические коэффициенты воздуха, бетона, значения массовых концентраций компонент при начальной температуре, а так же молекулярные веса компонент газовой фазы и тепловые эффекты реакций (3.19).

Таблица 3.3

Теплофизические и термокинетические коэффициенты древесины

кг/М ³				Дж/(кг·К)			Вт/(м·К)		
ρ_{2s}	ρ_{3s}	ρ_{4s}	c_{1s}	c_{2s}	c_{3s}	c_{4s}	$\lambda_{\varphi_2}^s$	$\lambda_{\varphi_3}^s$	$\lambda_{\varphi_4}^s$
2000	130	130	1800	2090	1020	1020	0,6	0,04	0,04
кД/мол			Дж/кг				с ⁻¹		
E_{1s}	E_{2s}	E_{3s}	q_{1s}^-	q_{1s}^+	q_{2s}	q_{3s}	k_{1s}	k_{2s}	k_{3s}
62,15	16,76	590,28	$-2 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$-2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$

Таблица 3.4

Теплофизические коэффициенты воздуха, бетона и значения массовых концентраций компонент при начальной температуре

кг/м ³		Дж/(кг·К)		Вт/(м·К)	
ρ_g	ρ_b	c_{pg}	c_{pb}	λ_g	λ_b
1,29	2450	1004	1130	0,253	1,75
$c_{1н}$	$c_{2н}$	$c_{3н}$	$c_{4н}$	$c_{5н}$	$c_{6н}$
0,2	0,005	0,23	0,001	0,1	0,05

Приведенные ниже результаты получены при $T_n = 293$ К; $T_* = 560$ К; $T_e = 1300$ К; $\alpha_e = 1.5$ Вт/(К·м²); $\omega_* = 2.4 \cdot 10^{-5}$ м/с; $P_e = P_n = 1.013 \cdot 10^5$ Н/м²; $\mu_n = 1.81 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); $q_\sigma = 1.2 \cdot 10^4$ Вт/м²; $A_v = 4 \cdot 10^5$ Вт/(м³·К); $d_p = 10^{-6}$ м; $\alpha_{G_1} = 1.0$ Вт/(К·м²); $M_n = 130$ кг/кмоль; $M_c = 12$ кг/кмоль; $d_1 = 0.5$ м; $d_3 = 0.5$ м; $L_1 = 0.05$ м; $L_2 = 4$ м; $L_3 = 3$ м; $a = 1.0$ м; $c_* = 1.0$ м; $R = 8.314$ Дж/(моль·К); $A_s = 0.08$; $c_{\alpha,e} = c_{\alpha,n}$; $\alpha = 1, 2, 4, 5, 6$; $c_{3e} = 10^{-3}$; $\varphi_{1н} = 0.28 - 0.434$; $\varphi_{3н} = 10^{-3}$; $\varphi_{4н} = 10^{-5}$; $s_2 = 0.05$; $s_3 = 0.2$; $\alpha_4 = 0.7$.

Таблица 3.5

**Молекулярные веса компонент газовой фазы и тепловые эффекты
реакций (3.19)**

Кг/кмоль							Дж/кг		
M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	q_1	q_2	q_3
28	18	32	44	16	2	28	$2,81 \cdot 10^5$	$4,04 \cdot 10^5$	$2,31 \cdot 10^5$

3.5. Результаты численного решения и их анализ

Временем зажигания древесины назовем величину $t = t_*$, при которой для $T_{1w} \geq T_*$ скорость горения ω равна или превышает характерную величину ω_* , а температура поверхности реагента резко возрастает до $T_m = 1250$ К ($T_m = \max(T_1, T_2)$). Для определенности полагалось, что величина температуры $T_* = 560$ К и скорости горения $\omega_* = 2.4 \cdot 10^{-5}$ м/с известны из экспериментальных данных [13]. При $q_\sigma = 0$ имеет место режим отсутствия горения реагента, при котором его скорость сравнима со скоростью пиролиза древесины $\omega_* \approx 10^{-6} - 2.0 \cdot 10^{-6}$ м/с.

В табл. 3.6 приведено время зажигания различных пород древесины. Как видно из табл. 3.6 для неплотных пород $\rho_{1s} \leq 470$ кг/м³ с большой начальной пористостью $\phi_{5н} \geq 0.515$ время t_* увеличивается с ростом доли воздуха, который снижает эффективный коэффициент теплопроводности λ_{sj} , $j = 1, 2, 3$ и увеличивает время прогрева образцов.

Для плотных пород $\rho_{1s} \geq 600$ кг/м³ с малой начальной пористостью $\phi_{5н} \leq 0.436$ (см. табл. 3.2) время зажигания t_* практически остается постоянным, что связано с незначительным изменением коэффициента температуропроводности χ_{11}^s (см. табл. 3.2), который определяет инерционность материала, т.е. его способность выравнять температуру древесины при нагреве или охла-

ждении. Низкая теплопроводность ели, тополя и сосны позволяет брать их толщину для деревянных ограждений значительно меньшую, чем для пород 4 – 6 из табл. 3.2.

На рис. 3.2 дано распределение температур поверхности сосны каркаса T_{1w} и газа T_{2w} (сплошные и штриховые кривые соответственно) по продольной переменной x_2 при $x_3 = c_*$ в различные моменты времени: 1 (1), 1.887 (2), 1.906 (3), 1.918 (4) мин.

Видно, что до момента $t < 1.906$ мин времени зажигания (режиму зажигания $t = t_*$ отвечает кривая 3, имеющая максимум T_1 на рис. 3.4) температура газа и каркаса древесины практически совпадают. Затем при $t \geq t_*$ в результате тепловыделения от экзотермической реакции окисления оксида углерода (3.19) температура газовой фазы T_{2w} превышает температуру каркаса T_{1w} . Добавим, что в силу пространственного теплообмена (краевых эффектов) очага горения и стены дерева с окружающей относительно «холодной» средой: с бетоном и воздухом (см. рис. 1) температура древесины резко падает на границах $x_2 = 1.5$ м и $x_2 > 2.25$ м.

На рис. 3.3 дана зависимость температуры поверхности каркаса сосны по вертикальной переменной x_3 ($x_2 = L_2/2$). Как видно из рис. 3 при $t = t_*$ температура на стыке древесины с подложкой $x_3 = d_3$ на 630 К выше, чем при ее отсутствии $x_3 > 1.0$ м, в следствии стока тепла в бетон, у которого коэффициент теплопроводности почти на порядок выше.

Таблица 3.6

Время зажигания различных пород древесины

№	1	2	3	4	5	6
t_* , мин	5,175	4,655	1,918	1,458	1,462	1,467

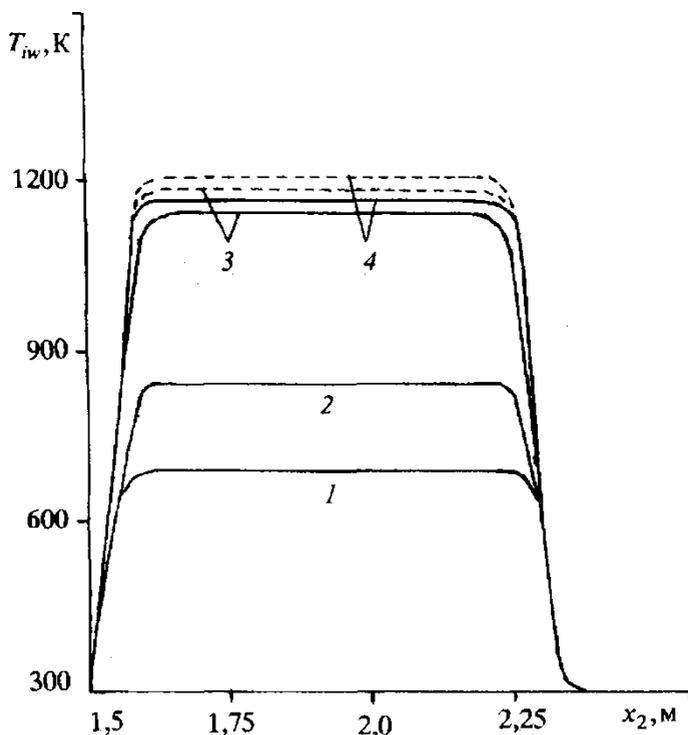


Рис. 3.2. Зависимость температуры поверхности сосны каркаса T_{1w} (сплошные кривые) и газа T_{2w} (штриховые кривые) от продольной переменной x_2 при $x_3 = c_*$ в различные моменты времени: 1(1), 1.887(2), 1.906 (3), 1.918 (4) мин.

На рис. 3.4 изображено распределение температуры каркаса сосны по глубине слоя x_1 при $x_3 = c_*$, $x_2 = L_2/2$ (см. рис. 3.1), где режиму зажигания отвечают кривые, имеющие выпуклость вверх или максимум, а на рис. 3.5 – поле концентраций компонентов в проницаемом реагенте в те же самые моменты времени, что и на рис. 3.2 и входных данных из пункта 3.3. На рис. 3.6 представлены объемные доли компонентов пористой среды по глубине слоя для

исходного реагента φ_1 , связанной воды φ_2 , кокса φ_3 , пепла φ_4 при входных данных рис. 3.2. Из анализа результатов численного решения следует, что с ростом температуры проникаемого фрагмента среды сначала имеет место прогрев и испарение связанной воды, при этом объемная доля связанной воды при $T_1 > 373\text{K}$ исчезает, превращаясь в концентрацию паров H_2O (см. рис. 3.5, *a*). В области высокой температуры ($T_1 > 450\text{K}$) начинается процесс пиролиза исходного реагента с появлением основной массы паров воды, углекислого газа CO_2 и кокса (см. рис. 3.6, штрихпунктирные кривые для φ_3). Далее продукт пиролиза – кокс – начинает выгорать (тлеть) вглубь фрагмента пористой среды с образованием золы (см. рис. 3.6, штриховые с двумя точками кривые для φ_4) в результате экзотермической реакции окисления.

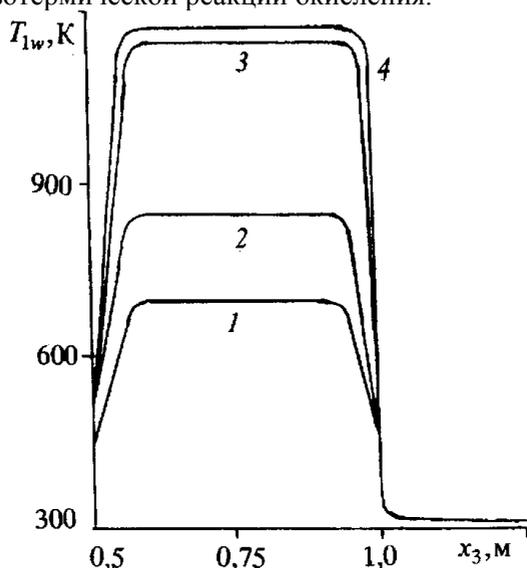


Рис. 3.3. Зависимость температуры поверхности каркаса сосны от вертикальной переменной x_3 при $x_2 = L_2/2$, в те же самые моменты времени, что и на рис. 3.2

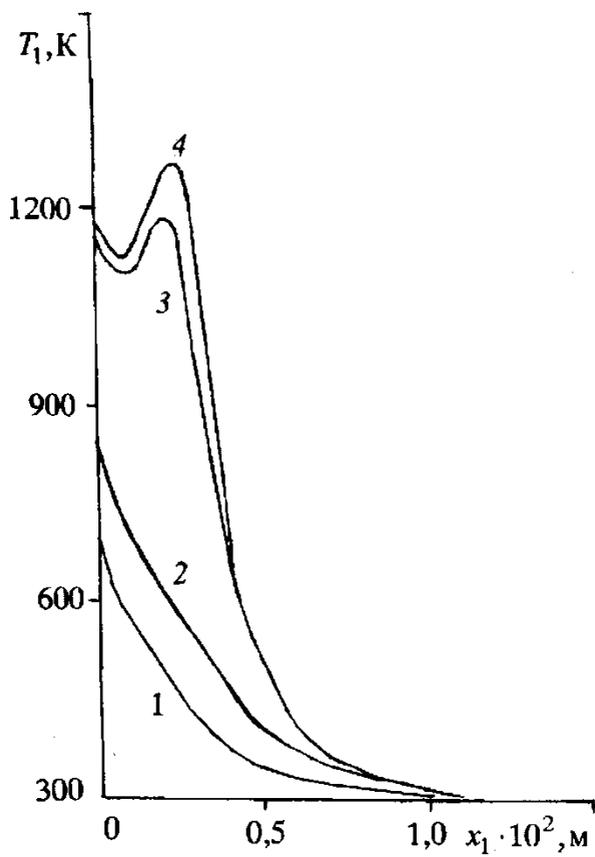


Рис. 3.4. Зависимость температуры каркаса сосны в пористом слое реагента от поперечной переменной x_1 при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ в те же самые моменты времени, что и на рис. 3.2

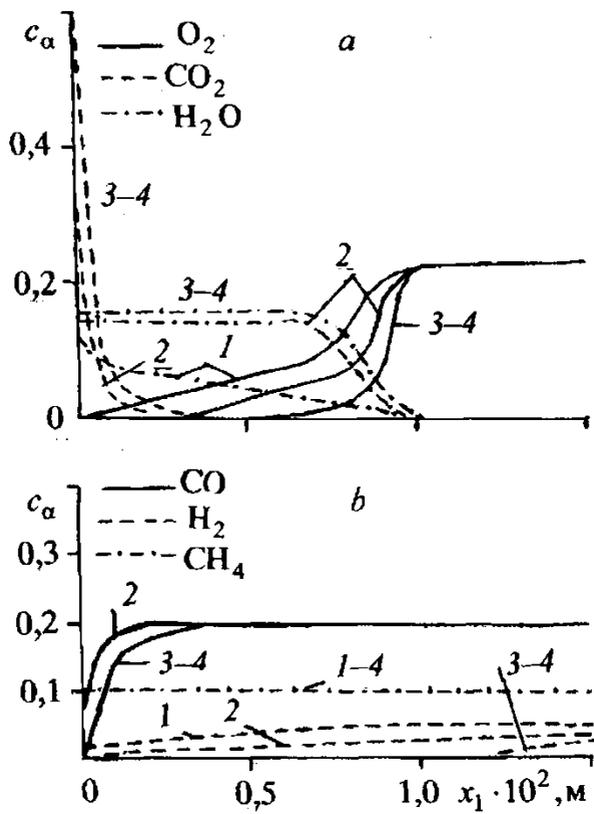


Рис. 3.5. Распределение безразмерных концентраций компонент по глубине x_1 образца сосны при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ в те же самые моменты времени, что и на рис. 3.2

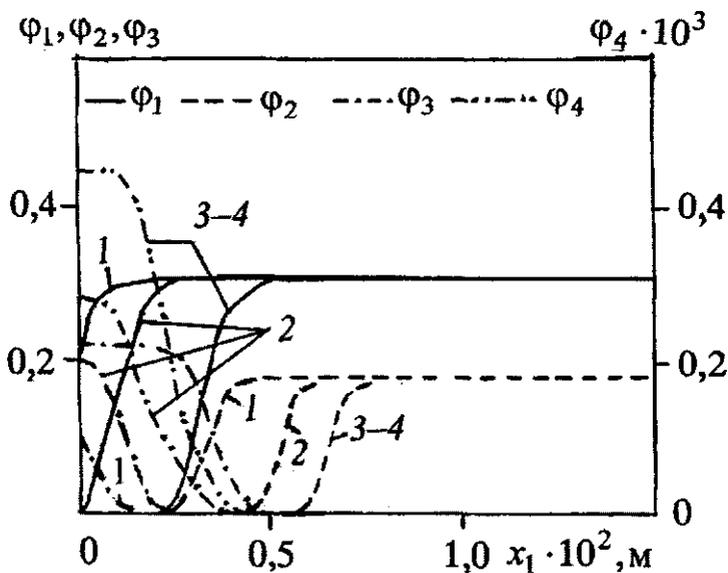


Рис. 3.6. Распределение безразмерных объемных долей по глубине x_1 образца сосны при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ в те же самые моменты времени, что и на рис. 3.2

Надо сказать, что водород H_2 и метан CH_4 (см. штриховые и штрихпунктирные кривые на рис. 3.3, *b*) при $T_2 \leq 1300$ К практически не окисляются в ходе гомогенных реакции из (3.19) с образованием CO_2 и H_2O , т.к. концентрации H_2 и CH_4 малы или изменяются незначительно в силу низких температур реагирующей среды. Известно [98], что вторая и третья газофазные реакции окисления из (3.19) интенсивно начинается при $T_2 > 1300$ К.

Отметим, что колебания температуры в окрестности нагреваемой поверхности в моменты времени близкие к зажиганию $t = t_*$ (кривые 3, 4 на рис. 3.4) связаны с эффектом выделения тепла от реакции синтеза древесины, с одной стороны, и с релаксационны-

ми процессами теплопроводности, а так же выдувом газообразных продуктов разложения из разгорающихся пор, с другой стороны.

Представляет интерес исследование влияния зависимости содержания начальной объемной доли влаги $\varphi_{2н}$ на скорость процесса горения древесины. С уменьшением объемной доли влаги с $\varphi_{2н} = 0.25$ до $\varphi_{2н} = 0.2$ и $\varphi_{2н} = 0.15$ для значения $\varphi_{1н} = 0.374$ (порода березы под № 4 в табл. 3.2) имеет место уменьшение времени зажигания t_* = 1.648, 1.445, 1.258 мин. Это связано, в основном, с уменьшением затрат тепловой энергии на испарение связанной воды в древесине.

Следуя [31], исследуем влияние кратковременного воздействия излучения на процесс зажигания сосны, когда температура поверхности (максимальная) достигает определенного значения T_σ при $Q_w = q_w + q_\sigma$ ($q_\sigma \neq 0$), а затем реагент разрушается только под действием конвективного теплового потока $Q_w = q_w$ ($q_\sigma = 0$). Из анализа рис. 3.7 видно, что время задержки зажигания (t_*) образца сосны с ростом T_σ уменьшается при низких температурах $T_\sigma < 725$ К, а потом сохраняет практически постоянное значение при высоких температурах $T_\sigma \geq 725$ К. Уменьшение t_* связано с тем, что поглощенный лучистый поток тепла в прогретом слое образца, с увеличением T_σ , растет. Поэтому при дальнейшем увеличении $T_\sigma \geq 725$ К имеет место быстрый рост температуры поверхности образца (кривые 3 и 4 на рис. 3.2) и зажигание реагента в силу низкой теплопроводности сухой древесины и при $T_\sigma > 725$ К поглощенная энергия излучения практически не влияет на время задержки зажигания.

На рис. 3.8 приведены результаты, полученные в ходе зажигания образца сосны с различной начальной температурой T_n и начальной влаги (объемной доли $\varphi_{2н}$). Видно, что время зажигания образца, предварительно нагретого до температуры 370 К, меньше, чем образцов при $T_n < 370$ К. Это обусловлено уменьше-

нием затрат энергии на нагрев и испарения связанной воды в древесине. Этот результат качественно согласуется с экспериментальными данными статьи [13].

На рис. 3.9 приведена величина линейной скорости процесса горения сосны от времени для входных данных рис. 3.2. Видно, что имеет место постепенно ускоряющееся распространения пламени и быстрый рост температуры реагента (см. кривые 3 и 4 на рис. 3.4), при этом среднее значение скорости горения древесины по порядку величины согласуется с экспериментальными данными [2].

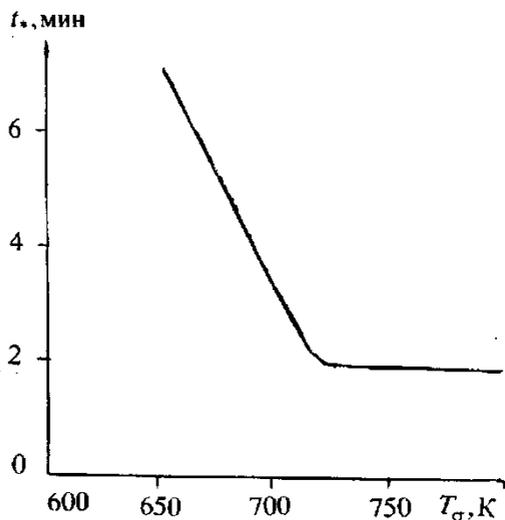


Рис. 3.7. Зависимость времени зажигания сосны от температуры T_σ , отвечающей кратковременному воздействию потока излучения.

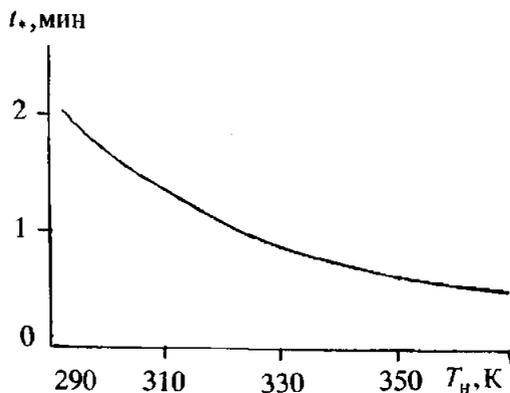


Рис. 3.8. Зависимость времени зажигания сосны от начальной температуры реагента.

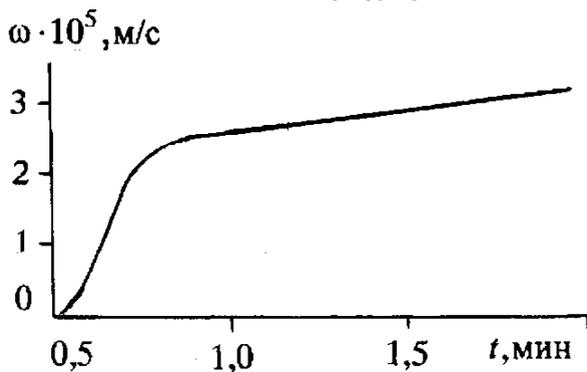


Рис. 3.9. Зависимость линейной скорости горения сосны ω по глубине образца x_1 при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ от времени.

Выводы

1. Дана постановка задачи о зажигании пространственной стенки из дерева, расположенной на подложке из бетона, с учетом процессов сушки, пиролиза, окисления газообразных и конденсированных продуктов и конкретной базы данных.

2. Установлено, что время зажигания древесины определяется интенсивностью внешнего очага горения, породой древесины, процессами сушки, пиролиза, экзотермической реакцией окисления оксида углерода, а так же начальным содержанием влаги и начальной температурой образца.

3. Показано качественное и количественное согласование некоторых результатов расчета с известными экспериментальными данными [31, 85].

Контрольные вопросы

1. Что такое кинетический и диффузионный режим горения древесины?

2. Указать состав компонентов древесины при ее пиролизе до температуры $T = 900$ К.

3. Привести состав компонентов газовой фазы древесины при $T = 900$ К.

4. Выписать итоговые гомогенные химические реакции в проницаемом слое древесины.

5. Написать уравнение неразрывности газовой фазы пористой древесины с источником.

6. Написать уравнение сохранения количества движения газовой фазы пористой древесины (уравнение фильтрации).

7. Привести закон Герца-Кнудсена для испарения связанной воды в древесине.

8. Прокомментировать время зажигания плотных и неплотных пород древесины.

9. Может ли температура газовой фазы превысить температуру каркаса в древесине?

10. Как влияет содержание начальной объемной доли влаги на скорость горения древесины?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии на примере решения практических задач представлено применение экспериментальных и численных методов исследования природных пожаров. При решении представленных практических задач получены следующие основные научные результаты:

1. Проведена оценка влияния огнезащитной пропитки «ФУКАМ» на пожароопасные свойства древесины сосны, осины и лиственницы. Исследовалось влияние фронта модельного низового пожара на поверхность образцов древесины, а в качестве метода диагностики использовалась ИК-термография. Сравнение пожароопасных свойств древесины, обработанной огнезащитной пропиткой с аналогичными необработанными образцами показало существенное снижение температуры поверхности и невосприимчивость к воспламенению при выбранных параметрах эксперимента.

2. Экспериментально проанализировано влияние различных огнезащитных составов (огне-био защитная пропитка для древесины «ФУКАМ», огнезащитная пропитка с антисептическим эффектом для древесины «Pirilax»-Classic), средства защитное для древесины «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ», а также огнезащитный состав «МИГ-09») на пожароопасные свойства образцов древесины различной геометрии (плоские образцы из сосны, осины и лиственницы и древесный строительный материал для имитации бруса (Блок-хаус), выполненный из сосны). Сравнительный анализ показывает, в зависимости от сорта древесины наилучшие огнезащитные свойства проявляет разный состав – огне-био защитная пропитка для древесины «ФУКАМ» в случае образцов блок-хауса; огнезащитная пропитка с антисептическим эффектом для древесины «Pirilax»-Classic для строительной доски из лиственницы; средства защитное для древесины «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ» для строительной доски из сосны и осины.

3. Определены скорости обугливания плоских и оцилиндрованных образцов древесины, подверженные воздействию очага низового лесного пожара. Без использования предварительной об-

работки огнезащитным составом, скорость обугливания вдоль волокон плоских образцов из сосны при воздействии очага горения низового лесного пожара составила в экспериментах $0,2 \pm 0,05$ мм/мин.

4. Для обеспечения безопасности объектов хозяйственной деятельности человека необходимо производить окашивание периметра объекта шириной не менее 5 м, с удалением скошенных РГМ.

5. Для снижения риска воспламенения заборов, они должны быть продуваемого типа, а обработку поверхности заборов противопожарными растворами следует производить наиболее тщательно с внутренней стороны периметра.

6. Деревянные конструкции из бруса сосны 200 мм x 200 мм с влагосодержанием 36.7% не воспламеняются под воздействием полевого пожара.

7. Полевой пожар переходит в торфяной при существовании проводника горения (чёса) над слоем торфа, даже при небольших запасах полевой растительности ($0,172 - 0,263$ кг/м²).

8. При полевых пожарах многократно возрастают концентрации окисляющих атмосферу газов (CO_2 , CO , SO_2 , NO , NO_2) по сравнению с фоновыми значениями.

9. Массовые природные пожары могут приводить к значительному снижению озона в атмосфере и влиять на образование озоновых дыр.

10. При горении РГМ в приземном слое атмосферы появляются аэрозоли с диаметром частиц менее 2 мкм, которые в невозмущенной атмосфере присутствуют в единичных количествах. При этом количество частиц с диаметром $d > 0,3$ мкм достигает $2 \cdot 10^7$ шт.

11. Дана постановка задачи о зажигании пространственной стенки из дерева, расположенной на подложке из бетона, с учетом процессов сушки, пиролиза, окисления газообразных и конденсированных продуктов и конкретной базы данных.

12. Установлено, что время зажигания древесины определяется интенсивностью внешнего очага горения, породой древесины, процессами сушки, пиролиза, экзотермической реакцией окисле-

ния оксида углерода, а так же начальным содержанием влаги и начальной температурой образца.

13. Показано качественное и количественное согласование некоторых результатов расчета с известными экспериментальными данными.

Список литературы

1. Шойгу С.К., Копылов Н.П., Баратов А.Н. и др. Пожарная безопасность. Энциклопедия. М.: МЧС России. ФГУ ВНИИ ПО МЧС России. ЗАО «Голден-Би», 2007. 405 с.
2. Di Blasi C. Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-Charring Solid Fuels // Progress in Energy and Combustion Science. 1992. Vol. 19. pp. 71–104
3. Atreya A.A., Baum H.R. Model for Opposed Flow Flame Spread Over Charring Materials // Proceedings of the Combustion Institute. 2002. Vol. 29. pp. 227–236.
4. Babrauskas V. Ignition of Wood: A Review of the State of the Art // Interflam. London: Interscience Communications Ltd., 2001. pp. 71–88.
5. Grishin A.M. A., Filkov A.I., Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I. Field Experiment on Grass Fire Effects on Wooden Constructions and Peat Layer Ignition // International Journal of Wildland Fire. 2014. V. 23(3). pp. 445–449.
6. Bartlett, A.I., Hadden R.M., Bisby L.A., Law A. Analysis of cross-laminated timber charring rates upon exposure to nonstandard heating conditions // 14th International Conference and Exhibition, Proceedings. Fire and Materials, 2015. pp. 667–681.
7. Reszka P., Torero J.L. In-depth temperature measurements in wood exposed to intense radiant energy // Experimental Thermal and Fluid Science. 2008. Vol. 32(7). pp. 1405–1411.
8. Frangi A. [and other]. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44(8). pp. 1078–1087.
9. Babrauskas V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations / V. Babrauskas // Fire Safety Journal. 2005. Vol. 40(6). pp. 528–554.

10. *Grishin A.M. [and other]* A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // International Journal of Wildland Fire. 2014. Vol. 23(3). pp. 445–449.

11. *Kuznetsov V.T., Fil'kov A.I.* Ignition of various wood species by radiant energy // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2011. Vol. 47(1). pp. 65–69.

12. *Сивенков А.Б., Асеева Р.М., Серков Б. Б.* Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М.: Академия ГПС МЧС России. 2010. 262 с.

13. *Перельгин Л.М., Уголев Б.Н.* Древесиноведение. М.: Лесная промышленность, 1971. 286 с.

14. *Харук Е.В.* Проницаемость древесины газами и жидкостями. Новосибирск: Наука, 1976. 187 с.

15. *Гришин А.М., Зима В.П., Касымов Д.П.* Методы и устройства для тушения природных пожаров в рамках новой концепции борьбы с природными и техногенными катастрофами // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 4. С. 759–766.

16. *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та. 1981. 277 с.

17. *Зима В.П., Касымов Д.П.* Исследование воздействия очага горения на образцы древесины с помощью ИК-диагностики // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 2. С. 452–456.

18. *Гришин А.М., Зима В.П., Касымов Д.П.* Системный анализ пожарной опасности элементов деревянных строений при воздействии природных пожаров. В сб.: Север России: стратегии и перспективы развития материалы II Всерос. научно-практической конф. 2016. С. 260–263.

19. *Агафонцев М.В., Касымов Д.П.* Применение ИК-термографии при исследовании влияния огнезащитного покрытия на пожароопасные свойства древесины // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тезисы докл. Всерос. школы-конф. молодых ученых с международным участием. Новосибирск, 2016. С. 81–82.

20. *Kasymov D., Agafontsev M.* Investigation of the Fire Hazard Characteristics of Wood Using Infrared Thermography // Proceedings

of the 8th European Combustion Meeting. Dubrovnik. Croatia. 2017. pp. 1484–1488.

21. *Гришин А.М., Якимов А.С.* Математическое моделирование процесса зажигания древесины // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 473–486.

22. *Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Субботин А.Н., Якимов А.С.* Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2004. 320 с.

23. *Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.* Применение термографии при исследовании процессов горения. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2016. 80 с.

24. *Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П., Исаков А.В., Рейно В.В., Цвык Р.Ш.* Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара // Физика горения и взрыва. – 1996. – № 6. – Т. 32. – С. 3–10.

25. Российский статистический ежегодник. 2015: Стат.сб./Росстат. - Р76 М., 2015. – 728 с.

26. *Сухинин А.И.* Температурное поле при распространении пламени по хвое // Проблемы лесной пирологии / Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР. Красноярск, 1975. С. 100–127.

27. *Сухинин А.И., Конев Э.В., Курбатский Н.П.* Некоторые закономерности распространения пламени по слою хвои // Физика горения и взрыва. – 1975. – № 5. – Т. 11. – С. 743–750.

28. *Cohen J.D.* What is the Wildland Fire Threat to Homes? USDA Forest Service Gen.Tech.Rep. PSW-GTR 173. 2000. Pp. 189–195.

29. *Tse S.D., Fernandez-Pello A.C.* On the flight paths of metal particles and embers generated by power lines in high winds - a potential source of wildland fires // Fire Safety Journal, 1998. V.30(4). Pp. 333–356.

30. *Manzello S.L., Suzuki S., Hayashi Y.* Enabling the study of structure vulnerabilities to ignition from wind driven firebrand showers: A summary of experimental results // Fire Safety Journal, 2012. V.54. Pp. 181-196.

31. Кузнецов В.Т., Фильков А.И. Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 74-79.

32. Еналеев Р. Ш., Красина И. В., Гасилов В. С. и др. Зажигание древесины // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №10. – С. 99–106.

33. Lowden L., Hull T. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. – 2013. – № 2(4). Pp. 1–19. – doi:10.1186/2193-0414-2-4.

34. Grishin A.M., Zima V.P., Kasymov D. P On the deepening mechanism of the site of peat combustion // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013, Volume 86, Issue 5, pp. 996-1001.

35. Zima V.P., Kasymov D.P. Investigation of the Effect of the Combustion Site on Wood Specimens with the Use of IR Diagnostics // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016, Volume 89, Issue 2, pp. 466-470.

36. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под. ред. С.В. Пономарева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.

37. Гришин А. М., Зима В. П., Кузнецов В. Т., Фильков А. И. Испытательный комплекс для моделирования лесных, степных и торфяных пожаров. Патент на изобретение № 237/220. Заявка № 2008/17660 от 04.05 2008, опублик. 27.10.2009. Бюл. № 30.

38. Гришин А.М., Голованов А.Н. О влиянии малых акустических возмущений на процессы сушки, пиролиза и зажигания лесных горючих материалов // Сиб. физ.-техн. журн. 1992. Вып. 6. С. 102–106.

39. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Бартак М. Воспламенение и горение древесины под влиянием тепловых потоков

40. Гришин А.М. Физическое и математическое моделирование низовых лесных пожаров и их действия на смоделированную деревянную стену / А.М. Гришин, В.П. Зима, Д.П. Касымов, Е.Л. Лобода // Материалы международной конференции по механике и баллистике «VIII Окуневские чтения». – Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. – 2013. – С. 117-119.

41. Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков. – Монография. – М. : Академия ГПС МЧС России. – 2010. – 262 с.

42. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L. et al. A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // International Journal of Wildland Fire. 2014. V. 23(3). P. 445–449. DOI: 10.1071/WF12069

43. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П. и др. Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара // Физика горения и взрыва, 1996, Т. 32, № 6, с. 3-11.

44. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П. и др. Тепловизионные исследования развития и распространения низового лесного пожара // Оптика атмосферы и океана. Т 10, № 10, 1997. С. 1139-1150.

45. Cohen JD (2000) A brief summary of my Los Alamos fire destruction examination. Wildfire Magazine 9(4), 16–18.

46. Mell WE, Manzello SL, Maranghides A. et al. (2010) The wildland–urban interface fire problem – current approaches and research needs. International Journal of Wildland Fire 19, 238–251. doi:10.1071/WF07131

47. Cohen JD (2000a) Preventing disaster: home ignitability in the wildland-urban interface. Journal of Forestry 98, 15–21.

48. Loboda E.L. Choice for research spectral response of combustion processes using the method of IR diagnostics / E.L. Loboda, V.V. Reyno // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. – 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2074710>.

49. Касымов Д.П. Экспериментальные исследования воздействия низового лесного пожара на модели деревянных конструкций / Д.П. Касымов // Доклады X Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии». – Новосибирск: Параллель. – 2014. – С. 98-101.

50. Касымов Д.П. Экспериментальные исследования воздействия фронта модельного лесного пожара на деревянную преграду / Д.П. Касымов // Материалы XI Международной Школы молодых

ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. – Томск: ТМЛ-Пресс. – 2014. – С. 87-89.

51. *Касымов Д.П.* Лабораторные исследования зажигания моделей деревянной стены в результате действия фронта лесного пожара. / Д.П. Касымов // Теплофизика и энергетика: конференция с международным участием "VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике": тезисы докладов. – Екатеринбург, УрФУ. – 2013. – С. 79.

52. *Касымов Д.П.* Лабораторные исследования воздействия фронта низового лесного пожара на модели деревянных конструкций методом ИК-диагностики / Д.П. Касымов, О.П. Коробейничев // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тезисы докл. Всерос. школы-конф. с международным участием. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. – 2014.– С. 71-72.

53. *Мельников В.С.* [и др.] Термографирование при огневых испытаниях фрагментов зданий и строительных конструкций // Пожарная безопасность. 2015. № 3. С. 83–90.

54. *Vermesi I.* [and other] Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation: Experiments and a-priori predictions // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. pp. 218–225.

55. *Prat-Guitart N.* [and other] Infrared image analysis as a tool for studying the horizontal smoldering propagation of laboratory peat fires // Coal and peat fires: A global perspective. 2015. pp. 121–139. doi

56. *Vavilov V.P.* Thermal/Infrared Nondestructive Testing. NDT Handbooks series / V. P. Vavilov // Spectrum Publisher. Moscow. 2009. Vol. 5. P. 450.

57. *Агафонцев М.В., Касымов Д.П.* Применение ИК-термографии при исследовании влияния огнезащитного покрытия на пожароопасные свойства древесины // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тезисы докл. Всерос. школы-конф. молодых ученых с международным участием. – Новосибирск, 2016. С. 81–82.

58. *Kasymov D., Agafontsev M.* Investigation of the Fire Hazard Characteristics of Wood Using Infrared Thermography // Proceedings of the 8th European Combustion Meeting. Dubrovnik, Croatia, 2017. pp. 1484–1488. URL.

59. Огне-био защитный состав «Фукам»: офиц. сайт производителя. Режим доступа: <http://www.fukam.ru>. Дата обращения: 09.09.2016.

60. Биопирен (антипирен-антисептик) «Пирилакс» : инструкция по применению. ООО «НПО НОРТ». – Режим доступа: https://www.nort-udm.ru/download/passport/pasport+instrukcija_pirilax-classic_red.0.pdf. Дата обращения: 12.10.2017.

61. Средство защитное для древесины сенеж огнебио проф : инструкция по применению ООО «СЕНЕЖ-ПРЕПАРАТЫ». Режим доступа: http://www.strsezon.ru/ognebio_prof.pdf. Дата обращения: 12.10.2017.

62. Биопирен (антипирен-антисептик) «Миг-09»: инструкция по применению. ООО «НПО НОРТ». Режим доступа: https://www.nort-udm.ru/download/passport/Pasport+instrukcija_MIG-09_gotovuj_r-r_red.1.pdf . Дата обращения: 12.10.2017.

63. ГОСТ Р 53292—2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний. Введ. 2009-02-18. Москва: ФРУП «Стандартинформ», 2009. URL : <http://bpl32.ru/bank/normativnyue-dokumenty/gost-r-53292.pdf> (дата обращения: 12.10.2017).

64. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение древесины и ее пожароопасные свойства М.: Академия ГПС МЧС России. 2010. 262 с.

65. *Волокитина А.В.* Защита населенных пунктов от чрезвычайных ситуаций, связанных с природными пожарами (Практические рекомендации). Красноярск: Изд-во РАН, Сибирское отделение, 2002. 63 с.

66. *Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.* Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени

и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК – диагностики // Известия высших учебных заведений. Физика, 2015. Т. 58, No 2. С. 124 – 128. DOI: 10.1007/ s11182 - 015 - 0493 – x

67. *Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V.* Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // *Infrared Physics & Technology*. - 2015. - Vol. 72. - P. 1-7.

68. *Meléndez J., Aranda M., de Cas-tro A.J. et al.* Measurement of forest fire parameters with multi-spectral imaging in the medium infrared // *Quantitative Infra-Red Thermography Journal*. 2006. Vol. 3, Issue 2. P. 183–199.

69. *Rawlins W.T., Lawrence W.G., Marinelli W.J. et al.* Hyperspectral infrared imaging of flames using a spectrally scanning fabry-perot filter // 2nd Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute. March 2001. P. 1–13.

70. *Acem Z., Parent G., Monod B. et al.* Experimental study in the infrared of the radiative properties of pine needles // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. № 34. P. 893–899.

71. *Agueda A., Pastor E, Perez Y et al.* Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels // *International Journal of Thermal Science*. 2010. № 49. P. 543–554.

72. *Boulet P., Parent G., Acem Z. et al.* On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires // *Fire Safety Journal*. 2011. Vol. 46, Issues 1–2. P. 21–26.

73. *Шерстобитов М.В., Цвык Р.Ш.* О различии в эмиссионных ИК-спектрах этанола при свободном диффузионном горении в режиме воздействия воздушного потока при моделировании огненного смерча // *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 1. С. 90–94.

74. *Лобода Е.Л., Рейно В.В.* Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК - методами при горении лесных и степных горючих материалов при различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. № 11. С. 1002–1004.

75. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988. 416 с.
76. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. С. 42–43.
77. *Цвык А.Ш.* ИК-спектры излучения пламени при горении опада кедра // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 11. С.1004–1008.
78. *Гришин А.М., Рейно В.В., Сазанович В.М. и др.* Некоторые итоги экспериментальных исследований горения ЛГМ // Изв. Вузов. Физика. 2009. Т.52, №12. С. 28–37.
79. *Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др.* Среднемасштабные экспериментальные исследования распространения полевого пожара и его воздействие на деревянные конструкции и слой торфа // Проблемы мониторинга окружающей среды: сб. тр. XI Всероссийской конференции с участием иностранных ученых (24–28 октября 2011 г.). Кемерово: КемГУ, 2011. С. 38–43.
80. *Лобода Е.Л.* Физическое и математическое моделирование природных пожаров и применение методов инфракрасной диагностики для исследования: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2012. 287 с.
81. *Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др.* Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2011. № 2(14). С. 91–102.
82. *Лобода Е.Л., Рейно В.В.* Исследования в динамике оптических характеристик инфракрасного излучения факела пламени в зависимости от вида растительных горючих материалов и влагосодержания // XVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: сб. тр. [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011.
83. *Кузнецов В.Т., Фильков А.И.* Воспламенение различных видов древесины лучистым потоком энергии // Физика горения и взрыва. 2011. № 1. С. 74–79.
84. *Глухарева М.И., Дроздов Н.П., Ермакова Л.А. и др.* Справочник лесохимика. М.: Лесная промышленность, 1974. 376 с.

85. *Демидов П.Г.* Горение веществ и способы тушения. М.: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1955. 106 с.
86. *Козлов В.Н., Нимвицкий А.А.* Технология пирогагенетической переработки древесины. М.–Л.: Гослесбумиздат, 1954. 619 с.
87. *Конев Э.В.* Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. 239 с.
88. *Левин Э.Д.* Причины, обуславливающие знак и величину теплового эффекта пиролиза древесины. Химия древесины. Рига: Изд-во Зинатне, 1969. № 4. С. 143–148.
89. *Браунинг Б.Л.* Химия древесины. Москва: Лесная промышленность, 1967. 271 с.
90. *Богомолов В.Д., Соколов В.М., Чудинова А.С.* Кинетические параметры процесса щелочной делигнификации древесины // Лесной журнал. 1976. № 1. С. 109–115.
91. *Уголев Б.Н.* Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесная промышленность, 1986. 366 с.
92. *Гришин А.М., Якимов А.С., Миков В.Л.* Режимы воспламенения стеклопластиковой трубы с учётом смешанной конвекции окислителя // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 2. С. 13–22.
93. *Гришин А.М.* Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2010. № 2 (10). С. 60–70.
94. *Гришин А.М., Пугачева П.В.* Аналитическое решение задачи о зажигании стены деревянного дома в результате действия фронта лесного пожара // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2010. № 3 (11). С. 88–94.
95. *Гришин А.М., Фомин В.М.* Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние. 1984. 319 с.
96. *Гришин А.М.* Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 4. С. 41–89.

97. Гришин А.М., Голованов А.Н., Якимов А.С. Сопряженный теплообмен в композиционном материале // Прикл. механ. и техн. физика. 1991. № 4. С. 141–148.

98. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 739 с.

99. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высшая школа, 1985. 464 с.

100. Campbell E.C. and Fristrom R.M. Reaction kinetics thermodynamics and transport in the hydrogen bromine system // Chem. Rev. 1958. Vol. 38, No. 2. Pp. 173–234.

101. Основы практической теории горения / Под ред. В.В. Померанцева. Л.: Энергия, 1973. 264 с.

102. Мищенко К.П., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1972. 200 с.

103. Вукалович М.П., Ривкин С.А., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во Стандартов, 1969. 430 с.

Содержание

Введение.....	3
ГЛАВА 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПОЖАРА НА ОБРАЗЦЫ ДРЕВЕСИНЫ.....	5
1.1 Экспериментальные исследования воздействия очага горения на образцы древесины с помощью термопарного метода.....	5
1.1.1 Методика эксперимента.....	5
1.1.2. Результаты исследования воздействия очага горения на древесину.....	9
1.2 Исследование воздействия очага горения на образцы древесины с помощью метода ИК-диагностики.....	14
1.2.1. Методика проведения эксперимента.....	15
1.2.2. Результаты экспериментов.....	18
1.3. Исследование влияния огнезащитного покрытия на пожароопасные свойства древесины.....	24
1.3.1. Лабораторное оборудование и методика проведения эксперимента.....	25
1.3.2. Результаты.....	28
Выводы.....	34
Контрольные вопросы.....	37
ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ.....	38
2.1. Выбор спектрального интервала исследования.....	38
2.2. Определение эффективного коэффициента излучения... ..	44
2.3. Влияние влагосодержания растительных горючих материалов на эффективный коэффициент излучения.....	48
2.4. Применение методов ИК-диагностики в полунатурных полевых экспериментах.....	51
Контрольные вопросы.....	60
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ.....	62

3.1. Физическая постановка задачи о зажигании деревянной стены от действия фронта лесного пожара.....	62
3.2. Математическая постановка задачи.....	65
3.3. Коэффициенты переноса, теплофизические и термокинетические постоянные.....	70
3.4. Методика расчета и исходные данные.....	74
3.5. Результаты численного решения и их анализ.....	77
Выводы.....	86
Контрольные вопросы.....	87
Заключение.....	88
Список литературы.....	91

Издание подготовлено в авторской редакции

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 3258 от «25» июня 2018 г. Тираж 50 экз.