

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ
ИМ. В.Е. ЗУЕВА СО РАН

Е.Л. Лобода, В.В. Рейно,
М.В. Агафонцев

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ



Издательство Томского университета
2016

УДК 533.1:535-15:536.521.2

ББК 22

Л68

Рецензенты:

заведующий лабораторией № 34 Института неразрушающего контроля
Томского политехнического университета, доктор технических наук
профессор *В.П. Вавилов*;

заведующий лабораторией экологического приборостроения Института
мониторинга климатических и экологических систем, доктор техниче-
ских наук профессор *А.А. Тихомиров*

Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.

Л68 Применение термографии при исследовании процессов горения. –
Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – 80 с.

ISBN 978-5-7511-2430-4

В работе представлен опыт применения тепловизионной техники для исследования процессов горения. Установлены связи пульсаций температуры в пламени и течения в нем. Дается обоснованный выбор спектральных интервалов для решения задачи как определения поля температуры в пламени, так и регистрации энергетических характеристик экранированных пламенем высокотемпературных объектов.

УДК 533.1:535-15:536.521.2

ББК 22

Издано при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ (договор № 1624) и при поддержке Гранта Президента РФ № МД-5754.2015.1, в рамках Программы ОФН РАН «Фундаментальные проблемы электродинамики и волновой диагностики атмосферы».

ISBN 978-5-7511-2430-4

© Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, М.В. Агафонцев, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Идея написания этой книги возникла в результате накопления определенного количества опыта по применению термографии при исследовании процессов горения, с одной стороны, и с другой стороны, в научной печати стали все чаще встречаться работы, где описывается применение термографии при исследовании процессов с горением и наличием пламени. При этом авторы работ или сознательно умалчивают многие тонкости, или даже не предполагают о тех подводных камнях, существующих на пути применения термографии в исследовании разнообразных видов горения.

Следует отметить, что появление в последнее время разнообразной термографической техники сделало ее применение на первый взгляд более доступной, но на деле подавляющее количество представленных на рынке тепловизоров не относятся к тепловизорам «научного класса» и предназначены скорее для работы в широком спектральном диапазоне и определения теплового контраста, а о точности измерений полей температуры такими приборами можно говорить с большой натяжкой, особенно в случае высоких температур. Большая часть этих тепловизоров имеет неохлаждаемую матрицу, рабочий спектральный диапазон 7–12 мкм, и их быстродействие ограничивается 9 кадрами в секунду при передаче информации в компьютер.

В данной книге будет рассматриваться применение тепловизоров «научно-исследовательского класса» или, по международной классификации, ИК-камер исключительно в средневолновом ИК-диапазоне, так как именно в диапазоне 2,5–5,0 мкм длин волн присутствует основное ИК-излучение пламени. Тепловизоры «научного класса», во-первых, позволяют применять различные узкополосные фильтры, что дает возможность работать с узким участком спектра излучения объекта исследования, благодаря чему можно производить измерения по излучению определенных продуктов горения и

расширить диапазон измеряемых температур при ограниченном динамическом диапазоне матрицы тепловизора, а во-вторых, программное обеспечение таких тепловизоров дает достаточно широкие возможности по настройке, калибровке прибора и обработке полученных термографических изображений.

Несмотря на трудности, которые возникают на пути исследователя при применении термографии, такие как выбор спектрального диапазона исследований, определение эффективных значений коэффициентов излучения и пропускания пламени, неравная борьба с различными паразитными источниками излучения и переотражениями излучения от поверхностей в зоне исследования, термография предоставляет широкий спектр возможностей. Например, достаточно сказать, что инерционность тепловизоров измеряется микросекундами и при уменьшении рабочего окна скорость записи может достигать нескольких десятков тысяч кадров в секунду, что безусловно позволяет детально исследовать быстропротекающие процессы. Полагаем, что читателю нет необходимости объяснять, что традиционные контактные способы измерения температуры вносят возмущения в исследуемую среду, начиная от изменений структуры течения в исследуемом объекте и заканчивая нарушением энергетического баланса, влияющего на протекание химических реакций и процессов теплообмена. Однако полностью отказаться от применения термопар невозможно, так как на сегодня это наиболее доступный способ корректировки эффективного коэффициента излучения пламени.

Необходимо заранее предупредить читателя, что, несмотря на достаточно обнадеживающие результаты по применению термографии для определения полей температуры в пламени, представленные в данной книге, надо отдавать себе отчет в том, что пламенное горение и протекающие в пламени химические реакции недостаточно хорошо изучены, особенно в части оптико-физических характеристик пламени. Например, коэффициент излучения различных продуктов горения может существенно различаться и во времени, и в пространстве, что приводит к следующему выводу – различные участки пламени могут иметь различные коэффициенты излучения. Это создает непреодолимые на данный момент трудности в точном учете коэффициента излучения в турбулентных пламенах, в пламенах со сложными многостадийными химическими реакциями, где в дви-

жущейся зоне микрообъемного горения по мере протекания химической реакции может изменяться эффективный коэффициент излучения. Кроме того, необходимо помнить, что пламя представляет собой трехмерную полупрозрачную высокотемпературную оптическую среду, где каждый элемент объема излучает, и при регистрации двумерного термографического изображения на термограмме будут отображены и области на передней поверхности пламени, и из глубины пламени, и с задней поверхности, при этом излучение внутренних слоев среды ослабляется и складывается с излучением внешних слоев. При применении двумерной термографии разрешить эту проблему не представляется возможным. Очевидно, что дальнейшим развитием термографии будет получение и обработка ИК-изображений методами томографии [1].

Тем не менее результаты, представленные в этой книге, могут быть полезны для исследователей при работе с разнообразными процессами горения и, может быть, развеют многие достаточно распространенные заблуждения относительно термографии.

Авторы книги выражают признательность за помощь в подготовке лабораторного и измерительного оборудования к.ф.-м.н., в.н.с. В.Т. Кузнецову и за помощь в подготовке текста монографии к изданию инженеру кафедры физической и вычислительной механики Л.А. Киселевой.

Глава 1. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАМЕНИ В СРЕДНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ

1.1. О необходимости измерения спектра излучения пламени и выбора узкого спектрального интервала

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.

Необходимо заметить, что ввиду роста доступности тепловизионной техники «ненаучного класса» в литературе стало появляться значительное число публикаций, где авторы без какого-либо обос-

нования применяют тепловизионную технику, не вдаваясь в подробности ни спектральных характеристик прибора, ни спектральных характеристик объекта исследования. При этом, подбирая значения коэффициентов излучения, получают относительно правдоподобные результаты измерений, полагая, что низкая инструментальная погрешность гарантирует хороший результат.

Однако такие подходы приводят к очень грубым осреднениям получаемых результатов. Во-первых, следует отметить, что при работе с высокотемпературными объектами применение средневолновых тепловизоров (с рабочим диапазоном 2–5 мкм) позволяет получить лучший тепловой контраст, чем в случае применения длинноволновых приборов (8–12 мкм). Во-вторых, при работе с высокотемпературными объектами динамический диапазон матриц тепловизора накладывает значительные ограничения на диапазон измеряемых температур, который обычно расширяют за счет режима «Multi-IT», но с потерей разрешения по времени. В-третьих, применение широкого спектрального диапазона при работе с объектами, чей спектр излучения не является непрерывным или существенно отличается от спектра излучения АЧТ, приводит к «размазыванию» термограммы и потере детализации тепловой структуры.

Например, более 20 лет назад в авторском коллективе ИОА СО РАН и ТГУ были получены первые термограммы с помощью тепловизора Inframetrics 760 с рабочим диапазоном 3–12 мкм длин волн на одноэлементном фотоприёмнике. Из анализа изображений термограмм, сделанных в одни и те же моменты времени для одного веса и типа РГМ для разных спектральных интервалов 3–5 и 8–12 мкм, видно, что наиболее информативен для отображения пламени спектральный интервал 3–5 мкм.

На рис. 1.1, *а* показана термограмма распределения яркостной температуры при горении опада хвои кедра в спектральном интервале 3–5 мкм при $T_{\max} = 556\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на рис. 1.2, *в* показана термограмма в спектральном интервале 8–12 мкм при $T_{\max} = 532\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из анализа термограммы можно определить, что в диапазоне 3–5 мкм лучше видно само пламя, приподнятый передний фронт горения, который формируется за счёт продуктов пиролиза. В спектральном интервале 8–12 мкм наблюдается слабая излучательная способность пламени и его тепловизионное изображение почти не просматривается. Инфракрасное изображение в интервале 8–12 мкм определяется наличием

излучения конденсированной фазы продуктов горения. Спектр излучения конденсированных продуктов горения близок к спектру излучения АЧТ и значительно шире среднего ИК-диапазона в сторону длинных волн. При этом величина коэффициента излучения компонентов приближается к значению 1, которая в общем случае требует поправки с учетом концентрации компонентов. На рис. 1.2 показаны термограммы горения штабеля сосновых досок объемом примерно 4 м³. Следует отметить, что даже несмотря на достаточно большую концентрацию конденсированных продуктов горения в пламени в спектральном интервале 8–12 мкм, отчетлива видна только горячая поверхность твердого топлива, а изображение пламени слабое или практически отсутствует.

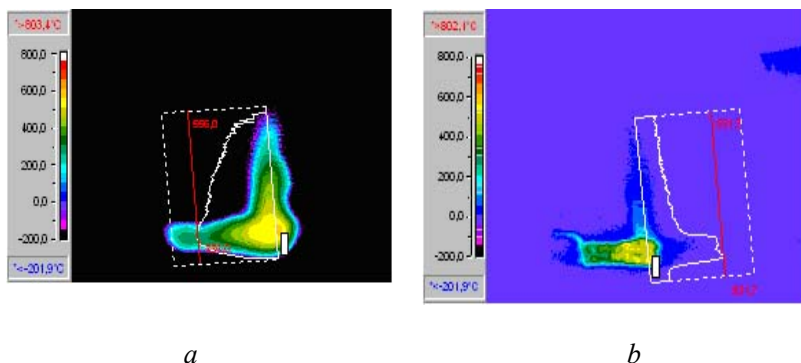


Рис. 1.1. Термограмма пламени при горении РГМ в диапазоне длин волн: *а* – 3–5 мкм; *б* – 8–12 мкм

Из анализа изображений видно, что в спектральном интервале 8–12 мкм изображение более фрагментарно и не замыто излучением пламени. Напротив, в спектральном интервале 3–5 мкм фронтальная поверхность пламени, обращённая к наблюдателю, имеет высокую излучательную способность и слой пламени несколько ослабляет излучение, исходящее от конденсированной фазы продуктов горения. Значения температур на термограммах (рис. 1.2) не скорректированы под реальные значения коэффициентов излучения, которые обычно корректируются по средним показаниям термопар до реальных значений.

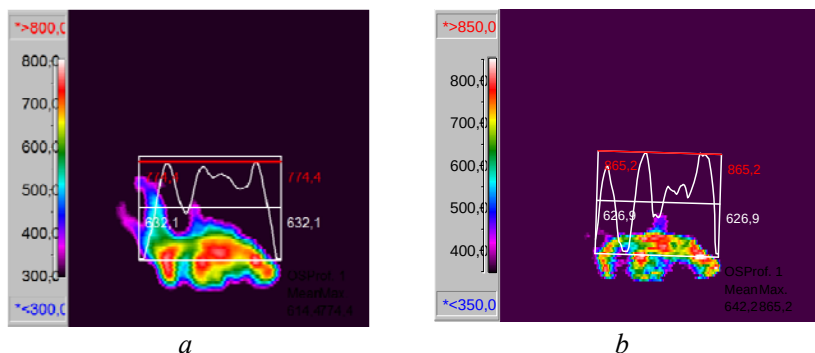


Рис. 1.2. Термограмма горения штабеля сосновых досок в диапазонах длин волн:
a – 3–5 мкм; *b* – 8–12 мкм

Очевидно, что спектр излучения основных газообразных продуктов горения сосредоточен в среднем ИК-диапазоне и для успешной работы необходим тепловизор с рабочим диапазоном длин волн от 2,0 до 5,5 мкм.

Избежать указанных выше недостатков в полной мере или невозможно, или это требует значительных материальных затрат, так как стоимость тепловизоров «научного класса» неприлично высока, а с недавнего времени еще существует запрет на экспорт в Россию быстро действующих тепловизоров со средневолновым рабочим диапазоном (1,5–5 мкм). Тем не менее такие приборы имеются в ряде научных коллективов и тепловизоры такого класса позволяют применять узкополосные оптические фильтры. Применяя фильтры, можно селективно обрабатывать излучение исследуемых объектов по участку спектра излучения, а также расширять динамический диапазон измеряемых температур за счет снижения интегрального потока излучения, падающего на матрицу тепловизора.

Учитывая, 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 [2] 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 [3] 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 [4–6] 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 [7] 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.

Учитывая, что современные тепловизоры позволяют работать в диапазонах длин волн от 2 до 5 мкм, где находятся основные мощные полосы излучения пламени и при этом имеется возможность при помощи узкополосных фильтров производить избирательную съемку, то возникает вопрос правильного выбора спектрального интервала для решения различных задач, таких как получение хорошо детализированного поля температуры в пламени или регистрация объектов, которые пламя экранирует.



Рис.1.3. ИК-камера FlirX6530sc

В своих исследованиях авторы применяли ИК-камеру JADE J530SB, детектор InSb, фирмы Cedip, размер матрицы 320×240 с максимальной частотой 170 кадров в секунду (спектральный рабочий диапазон 2,5–5,5 мкм) и камеру фирмы FlirX6530sc (рис. 1.3), детектор МСТ, размер матрицы 640×512 (спектральный рабочий диапазон 1,5–5,1 мкм) с частотой 100 кадров в секунду.

Далее приводятся результаты экспериментальных исследований по определению спектральных характеристик пламени, образующегося при горении различных горючих материалов, и делается вывод с рекомендациями по выбору различных спектральных интервалов для решения ряда практических задач с применением методов ИК-диагностики.

1.2. Выбор спектрального интервала в среднем ИК-диапазоне для исследования процессов горения

В качестве горючих материалов использовались: растительные горючие материалы (хвоя сосны, кедра, полевые растения), древесина сосны, березы и кедра, каменный уголь сорта ДО, спирт, керосин, бензин, дизельное топливо, пропано-бутановая смесь. Масса образцов растительных горючих материалов (хвоя кедр, сосны, полевые растения) составляла 50 г, масса древесины сосны, березы и кедр – 200 г, масса каменного угля – 300 г, объем жидкостей – 20 мл.

Регистрация спектра излучения пламени производилась при помощи спектрографа SOLAR TII 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 [8]. Погрешность измере-

ния 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. 1.4 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.

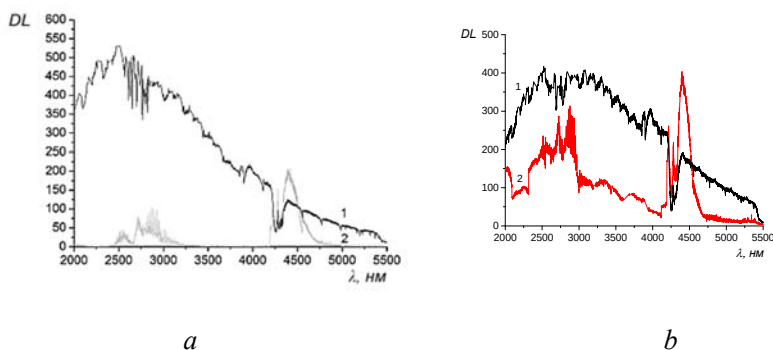
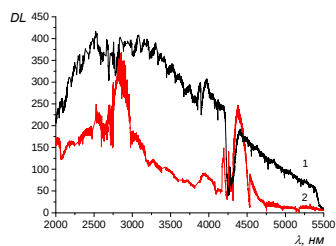
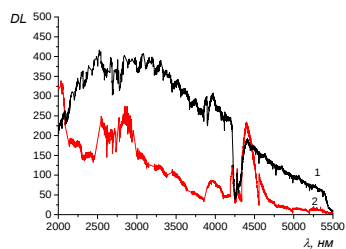


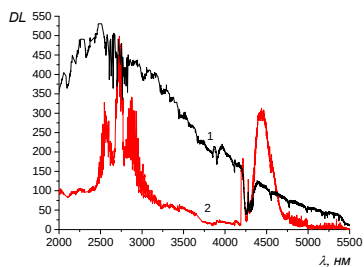
Рис. 1.4. Спектр излучения АЧТ (кривая 1) и пламени (кривая 2), образующегося при горении: *a* – пропан-бутановой смеси; *b* – бензина; *c* – керосина; *d* – дизельного топлива; *f* – хвой кедра; *g* – древесины сосны; *h* – древесины березы; *i* – древесины кедра; *J* – спирта



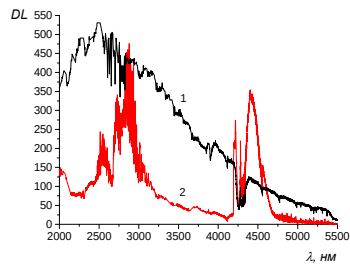
c



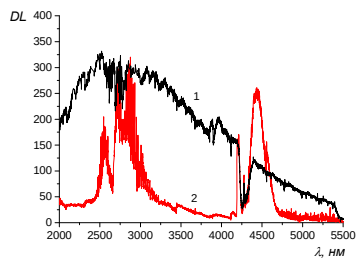
d



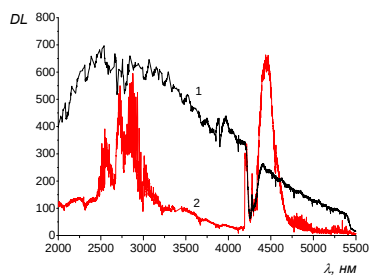
e



f



g



h

Рис. 1.4. Начало см. на с. 12, окончание на с. 17

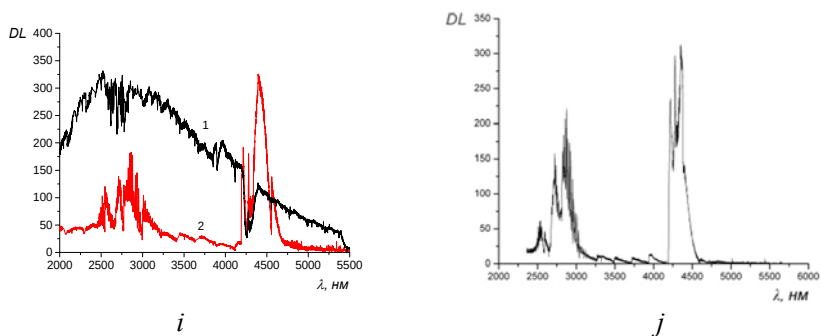


Рис. 1.4. Окончание (начало см. на с. 12)

Следует отметить, что величины интенсивности излучения по оси ординат представлены на рис. 1.4 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. 1.4 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 [4–6]. А спектр излучения пламени, образующегося при горении спирта, на рис. 1.4, *ж* качественно практически идентичен спектру, представленному в работе [7], 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.

При применении методов термографии для исследования процессов горения необходимо учитывать, что тепловизоры, представленные в настоящее время на рынке, по рабочему спектральному диапазону делятся в основном на два типа: с рабочим диапазоном 2–5 мкм и 7–12 мкм. Очевидно, что для исследования процессов горения необходимо применять тепловизоры, позволяющие работать в спектральном интервале 2–5 мкм, так как вторая группа тепловизоров не позволит «увидеть» пламя и может применяться лишь для регистрации экранированных пламенем объектов, таких как горящие дрова или обугленные остатки. Применение же тепловизоров с рабочим спектральным диапазоном 2–5 мкм целесообразно совместно с узкополосными фильтрами, что дает возможность выбрать спектральный интервал для решения конкретной задачи, а в случае решения задачи по определению полей температуры в пламени правильный выбор фильтра обеспечит хорошую детализацию тепловизионного изображения, поправочный эффективный коэффициент излучения, близкий к 1, что позволит уменьшить погрешность измерений. Также следует отметить, что согласно результатам, приведенным в работе [8], необходимо, чтобы технические характеристики тепловизора позволяли производить съемку с частотой не менее 40 кадров в секунду.

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 CO_2 и их вклад в интегральное излучение пламени, ибо в противном случае поправочный эффективный коэффициент излучения пламени будет превышать значение 1.

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

В случае если стоит задача регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов и при этом не требуется регистрация температуры в пламени, то следует выбирать узкий спектральный интервал, лежащий в диапазоне длин волн 3,3–4,0 мкм, где отсутствуют мощные полосы поглощения и излучения основных продуктов горения и в основном присутствует только излучение конденсированных продуктов горения, интенсивность которого относительно невелика.

На правильность написанного выше косвенно указывают результаты обработки данных, полученных при проведении в 2011 г. на базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН широкомасштабных степных пожаров в контролируемых условиях. С помощью постоянно действующего поста мониторинга БЭК, расположенного вблизи полосы горения, были зарегистрированы все газообразные продукты горения (табл. 1.1), а также сгенерированные пожаром мелкодисперсные частицы (рис. 1.5). В последней строке табл. 1.1 приведено количественное сравнение газообразных продуктов горения во время пожара с наличием этих газов в обычных условиях в свободной атмосфере.

Таким образом, видно, что излучение основных газообразных продуктов горения при природном пожаре находится в спектральном интервале от 3,0 до 5,0 мкм, а с учётом излучения паров H_2O – в более широкой полосе частот 2,0–5,0 мкм. При этом количество

мелкодисперсных дымовых частиц размером 0,3 мкм возрастает примерно в 1000 раз в единичном объёме воздуха. Общий вклад всех частиц в энергию спектра излучения РГМ особенно заметен в диапазоне 3,0–4,0 мкм длин волн.

Таблица 1.1

Основные газообразные продукты горения, образующиеся при горении растительных горючих материалов, и полосы поглощения этих газов, окисляющих атмосферу

Газообразный продукт горения	Интервал длин волн $\Delta\lambda$, мкм	Величина поглощения газов, %	Ширина спектрально-го интервала на уровне 0,5	Соотношение газа при пожаре отн. норм. атмосферы
Углекислый газ CO_2	4,27–4,24	80	4,2–4,33	550/400 ppm
Угарный газ CO	4,6; 4,72; 4,76	70	4,54–4,8	10/1 мкг/м ³
Сернистый газ SO_2	3,98÷4,02			128/5 мкг/м ³
Окись азота NO	3,42	10		150/8 мкг/м ³
Закись азота N_2O	3,42	30		150/5 мкг/м ³
Метан CH_4	3,31	50		1.88/1.51 ppm

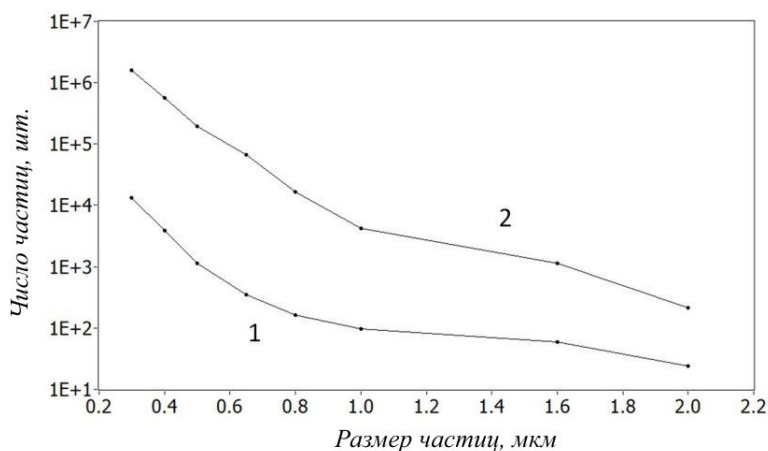


Рис. 1.5. Распределение по размерам количества частиц в атмосфере, образующихся при пожаре: 1 — фоновое число частиц в атмосфере (объём 1 л) до пожара; 2 — число частиц после пожара

Исходя из анализа полученных в этом разделе экспериментальных данных можно сделать вывод, что при исследовании процессов горения с применением методов термографии необходимо:

1. Применять тепловизоры с рабочим диапазоном 2–5 мкм, с охлаждаемой матрицей и позволяющие производить запись с частотой не менее 40 полных кадров в секунду.

2. Для решения задачи по определению полей температуры в пламени применять узкополосные фильтры, в полосу пропускания которых будут попадать полосы излучения продуктов горения, интенсивность которых не превышает интенсивность излучения АЧТ для максимальной температуры в пламени.

3. Для рассмотренных в данном разделе видов горючих материалов целесообразно использовать спектральный интервал 2,5–3,0 мкм, чтобы определить поля температуры в пламени.

4. Для регистрации объектов, экранированных пламенем, образованным при горении рассмотренных горючих материалов, целесообразно использовать спектральный интервал 3,3–4,0 мкм. При использовании спектрального интервала 2,5–3,0 мкм при регистрации излучения экранированного пламенем объекта в интегральную величину регистрируемого излучения излучение от пламени будет вносить значительный вклад, что следует учитывать при расчетах истинных значений.

5. Использование спектрального интервала 4,0–4,7 мкм нецелесообразно для измерения температуры, так как при этом необходимо будет учитывать концентрации CO и CO₂ и оценивать их вклад в интегральное излучение пламени, особенно CO₂.

1.3. Определение поправочного эффективного коэффициента излучения пламени и его зависимость от состава продуктов горения

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 результаты 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 [9]:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{dR/d\lambda}{dR_{BB}/d\lambda}. \quad (1.1)$$

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:

$$\varepsilon_{eff}(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{BB}(\lambda) d\lambda}, \quad (1.2)$$

где $I_f(\lambda)$ – интенсивность излучения пламени на длине волны λ ; $I_{BB}(\lambda)$ – 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 термopара (лучше несколько термopар), при помощи которой определяется температура термopары в пламени. Поскольку чаще всего приходится иметь дело с нестационарными пламенами, наиболее предпочтительно применять термopары с постоянной времени около 10 с. Для этих целей лучше всего подходят термopары типа ХА (К) (хромель-алюмель) с диаметром спая 250–500 мкм. Такие инерционные характеристики термopары позволяют инструментальным путем осреднить значительную часть пульсаций температуры в пламени, что упростит дальнейшую процедуру подбора ε_{eff} . Обычно в

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

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.

Наличие в ИК-камере шкалы энергетической яркости или в цифровых уровнях АЦП превращает тепловизор в измерительный прибор – радиометр. С помощью простых арифметических вычислений линейных значений амплитуды тепловизионного сигнала появляется возможность вычислить локально такие оптико-физические параметры, как коэффициенты излучения, поглощения и прозрачности различных участков пламени, учесть тепловой фон окружающей среды, переотражение и помехи от горячих объектов, находящихся в поле зрения камеры.

Например, можно вычислить коэффициент излучения мишени (ϵ), используя уравнение

$$\epsilon = \frac{U_m - U_\phi}{U_0 - U_\phi} \epsilon_0, \quad (1.3)$$

где U_0 – величина энергетической яркости эталонного источника АЧТ; U_m – величина энергетической яркости от пламени; U_ϕ – величина уровня окружающего теплового фона; ϵ_0 – коэффициент излучения модели АЧТ. Для высокотемпературных объектов можно пренебречь уровнем фона, и тогда формула (1.2) значительно упрощается.

Следует отметить, что при проведении измерений вблизи топок, крупномасштабных пожаров для защиты корпуса ИК-камеры от пе-

регрева 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.

Программное обеспечение инфракрасных камер «научно-исследовательского класса» позволяет использовать много полезных функций при регистрации быстропротекающих процессов горения, например, режим одновременного включения всех детекторов фотоприёмной матрицы, возможность увеличения динамического диапазона регистрируемых температур методом сшивки нескольких калибровок. Имеется возможность использовать различные режимы запуска начала регистрации скоротечных процессов горения от внешних и внутренних импульсных источников, включая режим от самого излучения пламени, превышающего некий порог.

1.4. Определение коэффициентов излучения при различном влагосодержании РГМ

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 хвой 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&DEK-1200G с точностью 10^{-2} кг, влагосодержание РГМ – при помощи анализатора влажности A&DMX-50 с точностью 0,01 %. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанции Meteoroscan 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 $\delta T/T \cdot 100\% \leq 5,3\%$, для 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. Данные термопар регистрировались при помощи комплекса [10].

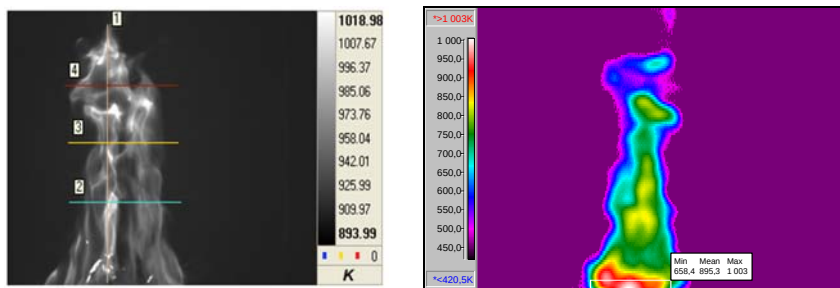


Рис. 1.6. Термограмма факела пламени: *a* – полученная на тепловизоре JADE J530SB в спектральном диапазоне 2,5–2,7 мкм; *b* – полученная на тепловизоре Inframetrics-760 в спектральном диапазоне 3–5 мкм

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 $0,2 \times 0,2$ м на (почву) грунт исследовательского стола – полигона. Зажигание образцов производилось при помощи точечного источника зажигания [10] в центре образца, что обеспе-

чивало полусферический фронт горения. Тепловизоры располагались на расстоянии 3 м от исследуемого образца.

На рис. 1.6, *a* приведена термограмма факела пламени, полученная при помощи тепловизоров JADE J530SB (при $\epsilon = 0,61$ 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 $\epsilon = 0,72$ влагосодержание $w = 3,6\%$).

Сравнивая рис. 1.6, *a* и 1.6, *b*, видно, что при использовании диапазона длин волн 2,5–2,7 мкм отчетливо наблюдаются отдельные, хорошо излучающие области с высокими температурами. Вероятно, 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 [11]. Неравномерность профилей температуры в сечениях обусловлена случайным характером процесса горения.

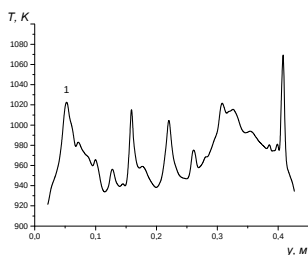
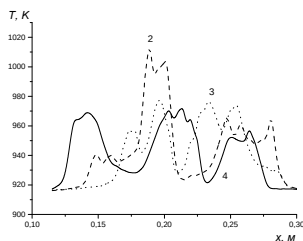
*a**b*

Рис. 1.7. Профиль температуры в факеле пламени: *a* – в вертикальном сечении 1 (см. рис. 1.6, *a*); *b* – в горизонтальных сечениях 2–4 (см. рис. 1.6, *a*)

Результаты сравнения скорректированных значений коэффициентов излучения пламени в диапазонах длин волн 2,5–2,7 и 3–5 мкм ($\epsilon_{eff} [2,5; 2,7 \text{ мкм}]$, $\epsilon_{eff} [3; 5 \text{ мкм}]$) после обработки данных распреде-

ления температуры в реперных точках тепловизионных измерений с термопарными датчиками приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2
Зависимость коэффициента излучения ϵ факела пламени на разной высоте от влаго-
содержания 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 окно прозрачности 3–4,2 мкм и сильные линии поглощения в области 4,2–4,5 мкм в основном CO_2 [12, 13]. При этом излучение пламени складывается из излучения частиц, генерируемых в пламени, и высокотемпературного спектра излучения за пределами области поглощения низкотемпературным атмосферным CO_2 [12, 13]. Следует отметить, что для спектрального диапазона 3–5 мкм значение коэффициента излучения значительно ниже вследствие его низкой избирательности из-за ширины спектра.

1.5. Регистрация экранированных пламенем объектов

При проведении экспериментальных исследований процессов, сопровождающихся пламенным горением, зачастую возникает задача определения энергетических характеристик экранированных пламенем объектов. Интуитивно понятно, что регистрируемое излучение складывается из излучения самого пламени и излучения исследуемого объекта, ослабленного и рассеянного слоем пламени.

В работе [14] приведены результаты исследований по влиянию слоя пламени на регистрацию АЧТ в спектральном интервале 7,5–13 мкм при диапазоне изменения температуры АЧТ от 253 до 1773 К. Следует отметить, что в данной работе приведена зависимость регистрируемой интенсивности излучения от характеристик исследуемых объектов для указанного диапазона длин волн. Однако в этом диапазоне длин волн отсутствует достаточно интенсивное излучение от самого пламени, что показано на спектре излучения пламени в работе [14]. Кроме того, там же приведены зависимости коэффициента излучения пламени для указанного диапазона длин волн от толщины слоя пламени. Стоит подчеркнуть, что данные зависимости пригодны лишь для указанного спектрального интервала, так как в других интервалах возможно присутствие излучения от паров воды и CO_2 , образующихся при горении, концентрация которых может зависеть от типа горючего, его химического состава и влагосодержания.

В этой связи представляет интерес исследование оптических свойств пламени в тех спектральных интервалах, где присутствуют мощные линии излучения продуктов горения, поэтому в этих спектральных интервалах возможно применять методы ИК-диагностики для определения полей температуры в пламени, а также учитывать влияние других высокотемпературных объектов на результаты измерений. Далее приводится описание результатов экспериментальных исследований по определению оптических свойств пламени в среднем ИК-диапазоне, образующегося при горении растительных горючих материалов.

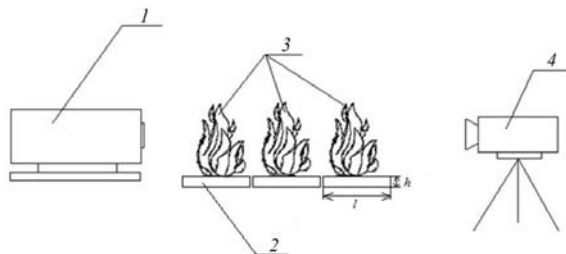


Рис. 1.8. Схема экспериментальной установки: 1 – модель абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100; 2 – слой растительных горючих материалов длиной l и высотой h ; 3 – пламя, образующееся при горении; 4 – тепловизор JADE J530SB

На рис. 1.8 приведена схема экспериментальной установки, где источники излучения и регистрирующая аппаратура находятся на одной оптической оси.

В качестве модели АЧТ использовался излучатель АЧТ-45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 573 до 1373 К. Слой растительных горючих материалов состоял из естественной смеси растений, произрастающих в районе г. Карасук Новосибирской области. Длина слоя l варьировалась от 0,2 до 0,8 м, а высота слоя менялась от 0,05 до 0,08 м. Влагосодержание горючих материалов составляло 7,9 %, значение которого определялось при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью до 0,01%. Масса слоя определялась при помощи электронных весов AND HL-400 с точностью до 0,1 г и варьировалась от 50 до 210 г. Число слоев менялось от 1 до 3. Зажигание слоя горючих материалов производилось равномерно по всей длине l . 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.

Энергетическая яркость ИК-излучения пламени и модели АЧТ и их распределение температуры регистрировались при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосными дисперсионными оптическими фильтрами с полосой пропускания: 2,5–2,7; 2,64–3,25; 3,1–3,3; 3,7–3,9; 4,0–5,0 мкм и фильтром с центром полосы пропускания

4,0–5,5 мкм, позволяющими измерять температуру в диапазоне 583–1773 К, и частотой регистрации 50 кадров/с. Съемка производилась с объективом, имеющим фокусное расстояние $F = 50$ мм, а матрица тепловизора имела разрешение 320×240 пикселей. Расстояние от тепловизора до АЧТ составляло 3 м, а расстояние от тепловизора до плоскости центра пламени –2 м. Дополнительно температура в пламени на оси АЧТ контролировалась при помощи термопар типа WR с диаметром спая 50 мкм и постоянной времени 0,09–0,1 с. Температура пламени дополнительно контролировалась термопарами и по данным термопар корректировалось среднее значение коэффициента излучения (ϵ_λ). После зажигания и появления пламени апертура АЧТ закрывалась экраном на 5–10 с, чтобы исключить его влияние на процесс горения и регистрацию пламени и сравнить результаты измерений с влиянием АЧТ и без него.

На рис. 1.9 приведены спектр АЧТ и кривая Планка для соответствующей температуры. Очевидно, что в целом характер кривых совпадает, но в интервалах 2,6–3 и 4,2–4,3 мкм наблюдаются «провалы», вызванные влиянием поглощения излучения газом CO_2 и парами H_2O , присутствующими в атмосфере.

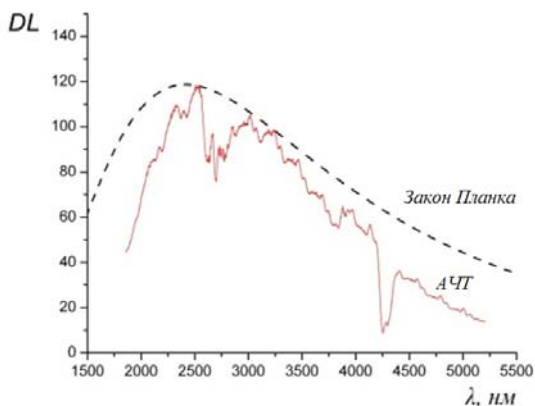


Рис. 1.9. Спектр излучения АЧТ-45/100/1100, полученный при помощи спектрографа ТП MS2001i фирмы SOLAR (Беларусь), и кривая Планка для соответствующего спектрального интервала

На рис. 1.10 приведены спектр излучения пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, который практически совпадает с данными [2], и спектр излучения пламени, образующегося при горении этилового спирта.

Из рис. 1.10, *a* видно, что в спектральном интервале 3–4 мкм присутствует излучение, которого нет на рис. 1.10, *b*. Это излучение обусловлено в основном наличием конденсированных продуктов горения (см. рис. 1.5), которых не образуется при горении этилового спирта.

В результате проведения эксперимента было обнаружено, что регистрируемая тепловизором температура АЧТ при появлении перед ним пламени возрастает не более чем на 10 % от истинной температуры АЧТ– T_{BB} (рис. 1.11) для спектральных интервалов: 2,5–2,7; 2,64–3,25; 3,1–3,3 и 3,7–3,9 мкм. При этом регистрируемая температура АЧТ имеет многократные изменения температуры с малой амплитудой, как и изменения температуры в пламени, измеренные вне оси видимости АЧТ (см. рис. 1.11).

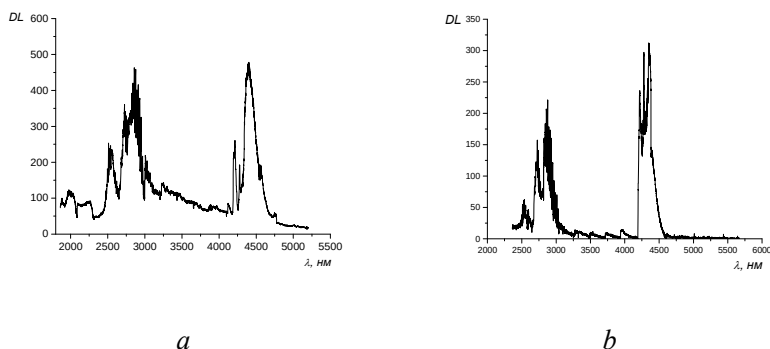


Рис. 1.10. Спектры излучения пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов (*a*) и этилового спирта (*b*), полученные при помощи спектрографа SOLAR TPI MS2001i

При этом термопары, размещенные в пламени на оси излучения АЧТ, не регистрировали каких-либо изменений между временем, когда АЧТ было закрыто экраном, и временем, когда экран отсутствовал (см. рис. 1.11, кривая *I*).

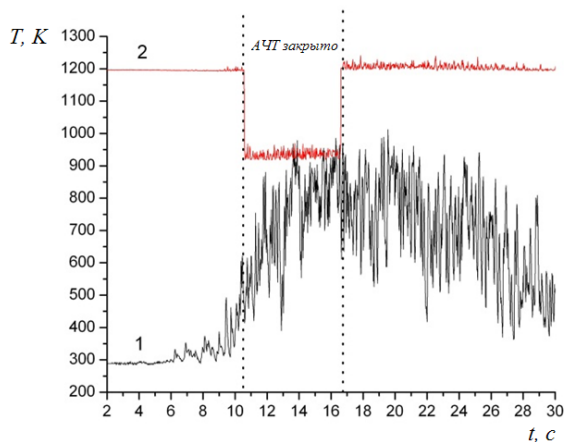


Рис. 1.11. Изменение температуры пламени, регистрируемой термопарой (кривая 1) и тепловизором в спектральном диапазоне 2,5–2,7 мкм (кривая 2)

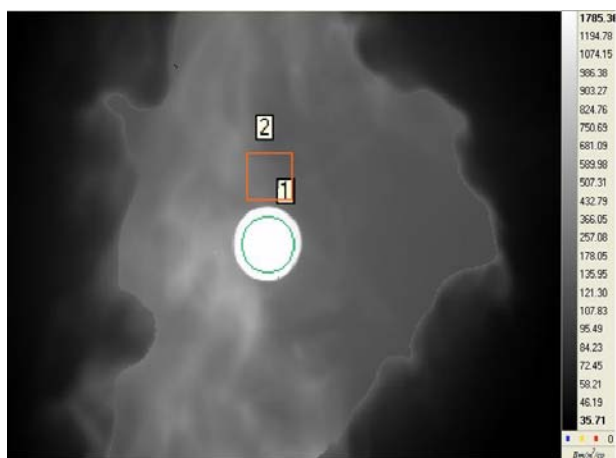


Рис. 1.12. Тепловизионное изображение распределения энергетической яркости фронта горения растительных горючих материалов и АЧТ

Для анализа результатов тепловизионных измерений на ИК-изображении в единицах энергетической яркости выбирались две области с одинаковой площадью (рис. 1.12).

В качестве значений энергетической яркости L использовались средние значения L для областей 1 и 2, что позволяло избежать влияния неоднородностей внутри пламени. При отсутствии пламени среднее значение L в области 1 (см. рис. 1.12) соответствовало значению энергетической яркости АЧТ (L_{BB}).

В результате экспериментов было установлено, что при температуре АЧТ меньше 1100 К зарегистрировать излучение АЧТ не удаётся, так как в этом случае максимальные температуры в пламени превышают температуру АЧТ и соответственно максимумы интенсивности излучения тоже, что приводит к экранированию излучения АЧТ слоем пламени. А при температурах АЧТ от 1100 К и выше, что превышает максимальные значения температуры в пламени с учётом его коэффициента излучения, установлена следующая зависимость:

$$L_{\Sigma} = \tau_f L_{BB} + L_f, \quad (1.4)$$

где L_{Σ} – суммарная энергетическая яркость АЧТ и пламени; L_{BB} – энергетическая яркость АЧТ; L_f – энергетическая яркость пламени; τ_f – коэффициент ослабления излучения АЧТ слоем пламени.

Таблица 1.3

Значения $\bar{\tau}_f$ пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, для различных спектральных интервалов

Спектральный интервал, мкм	T_{BB}, K	Число слоев пламени	$\bar{\tau}$	$\bar{\tau} \pm \Delta\tau$	σ
2,5–2,7	1200	1	0,638	0,619–0,656	0,0316
	1300	2	0,585	0,561–0,608	0,0206
	1300	3	0,686	0,662–0,709	0,0242
2,64–3,25	1300	1	0,974	0,966–0,982	0,0081
		2	0,982	0,974–0,989	0,0074
4–5	1300	1	0,024	0,013–0,034	0,0106
		2	0		
		3	0		
4,35 (полоса пропускания 180 нм)	1300	1	0		
		2	0		
		3	0		
3,1–3,3	1300	1	0,626	0,608–0,644	0,0185
3,7–3,9	1300	1	0,916	0,906–0,926	0,0102
		2	0,92	0,911–0,929	0,0089

В табл. 1.3 приведены средние значения $\bar{\tau}_f$, доверительные интервалы $\bar{\tau}_f \pm \Delta\tau_f$ и среднеквадратическое отклонение σ при разном числе слоев пламени в различных спектральных интервалах.

Таблица 1.4

Значения $\bar{\tau}_f$ пламени, образующегося при горении спирта, для различных спектральных интервалов

Спектральный интервал, мкм	T_{BB}, K	Число слоев пламени	$\bar{\tau}$	$\bar{\tau} \pm \Delta\tau$	σ
2,5–2,7	1300	1	0,358	0,303–0,413	0,0563
3,1–3,3	1300	1	0,764	0,713–0,815	0,0516
3,7–3,9	1300	1	0,914	0,906–0,922	0,0080

Аналогичные результаты были получены для пламени, образующегося при горении этилового спирта (табл. 1.4).

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что для регистрации высокотемпературных реперных или опорных объектов с известным коэффициентом излучения $\epsilon \approx 1$ в ИК-диапазоне через слои пламени необходимо правильно выбирать спектральный интервал исследования в зависимости от конкретных целей. В случае если необходимо одновременно проводить измерения температуры в пламени и определять характеристики экранированного пламенем высокотемпературного объекта, наиболее подходящими являются спектральные интервалы 2,5–2,7; 2,64–3,25; и 3,1–3,3 мкм. При этом температура исследуемого объекта должна быть больше максимальной температуры в пламени. Если температура объекта будет меньше максимальной температуры пламени, то пламя частично или полностью экранирует объект и достоверные сведения о нем получить не представится возможным, и как следствие, невозможно будет получить путем расчета и некоторые оптико-физические параметры пламени.

В случае если нет необходимости ИК-приборами измерять температуру в пламени, то наиболее удобными для регистрации высокотемпературных объектов являются спектральные интервалы, где нет вообще излучения от пламени или оно мало, например, интервал 3,7–3,9 мкм. Применение же спектрального интервала 4–5 мкм и спектрального интервала шириной 180 нм с цен-

тром 4,35 мкм нецелесообразно, так как в данных спектральных интервалах пламя является непрозрачным, а измерение температуры в пламени затруднено в связи с необходимостью учета концентраций продуктов горения СО и СО₂ и их вклада в интегральное излучение пламени.

Глава 2. ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

2.1. Об измерении поля температуры в пламени

Определение полей температуры в пламени контактными методами представляет достаточно сложную работу для экспериментатора. Применение гребенок термопар не дает возможности получить хорошее пространственное разрешение, применение координатных устройств требует стационарности процесса и невозможно при измерении полей температуры в нестационарных пламенах. Кроме того, применение термопар приводит к ряду физических эффектов, таких как изменение структуры течения в пламени, сток тепла из зоны горения по свободным концам термопары и т.д. Необходимо также помнить о том, что инерционность термопар накладывает ограничения на временное разрешение результатов измерений.

Практически всех этих проблем удается избежать при применении термографии в узких спектральных интервалах, в частности, в интервале длин волн 2,5–2,7 мкм. Например, на рис. 2.1 приведены поля средней и мгновенных температур факела горелки, где происходит сжигание дизельного топлива с паровой газификацией [15]. Очевидно, что пламя в горелке существенно не стационарно, что подтверждается пульсациями гидродинамических и термодинамических параметров [16].

Аналогичная ситуация с распределением температуры в пламени наблюдается и при исследовании диффузионного горения как жидких топлив (бензин, керосин, спирт, дизельное топливо), так и твердых (опад хвои, смесь сухих горючих материалов, древесина сосны, березы, кедра). При построении графиков изменения температуры в отдельно взятой точке факела пламени наблюдаются многократные пульсации температуры с различной амплитудой. Такие пульсации отмечаются как в лабораторных условиях, так и в полунатурных исследованиях природных пожаров, что будет показано в гл. 3.

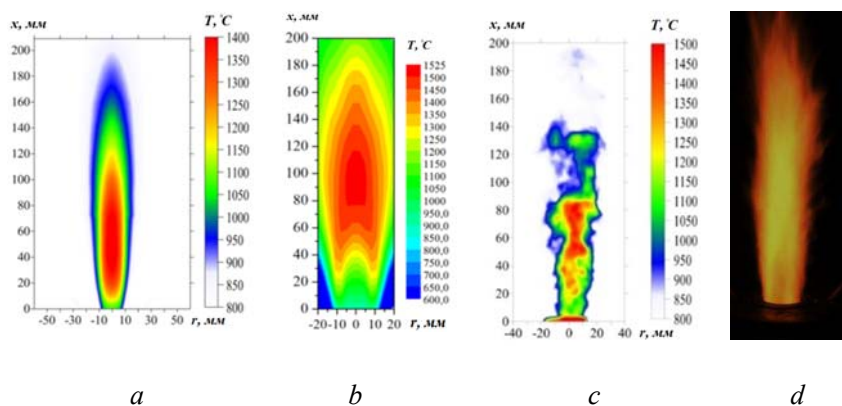


Рис. 2.1. Факел пламени горелки с паровой газификацией: *a* – поле средней температуры (тепловизионные измерения) [15]; *b* – поле средней температуры (термопарные измерения) [15]; *c* – поле мгновенной температуры (тепловизионные измерения) [15]; *d* – фотография исследуемого факела пламени [15]

В этой главе представлены результаты анализа экспериментальных данных по изменению температуры в пламенах.

2.2. Определение поля температуры в пламени и частотный анализ пульсации температур

При обработке экспериментальных данных было замечено, что пространственная структура температуры в факеле пламени меняется достаточно быстро. Был проведён сравнительный анализ изменения температур во времени и сравнение полученных тепловизионных результатов по характерным частотам с показаниями термопары.

В качестве образцов использовались описанные выше материалы. Масса образцов варьировалась в диапазоне от 50 до 200 г, влажность образцов изменялась в пределах от 3,6 до 21,6 %. Обработка последовательностей термограмм (одна реализация – 42500 кадров) и профилей температур проводилась методом быстрого преобразования Фурье. Тепловизионные профили температур выбирались в факеле пламени на 20 уровнях, расположенных на горизонтальной прямой и аналогично на вертикальной прямой (рис. 2.2).

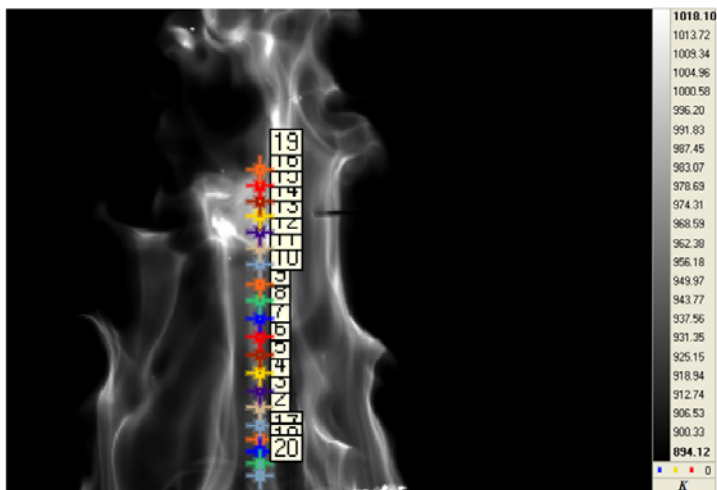


Рис. 2.2. Термограмма факела пламени при горении РГМ, среднее значение коэффициента излучения $\varepsilon = 0,77$, влажность РГМ $w = 5,9\%$; в спектральном диапазоне 2,5–2,7 мкм

Используя БПФ, были получены частотные спектры температуры в каждой точке из приведённых на вертикальной прямой, которые затем усреднялись. На рис. 2.3, *a* приведен осредненный частотный спектр изменения температуры для точек на рис. 2.2.

Из рис. 2.3, *a* видно, что в диапазоне около 0,01 Гц присутствуют колебания температуры со значительной амплитудой, которые для наглядности колебаний температуры с другими частотами на графиках не приводятся. В диапазоне 2–7 Гц присутствуют характерные частотные максимумы колебаний температуры с амплитудой до 8 К. Аналогичные результаты были получены и для точек, расположенных на горизонтальной прямой. Это позволяет сделать вывод о том, что эти частоты являются характерными для данного физического процесса горения и имеют определенную природу, связанную с пространственными параметрами турбулентной высокотемпературной среды. Для исключения влияния эффекта масштаба варьировались размер очага горения и масса образцов, а также влагосодержание образцов. Изменение этих параметров не повлияло на частотный спектр температуры.

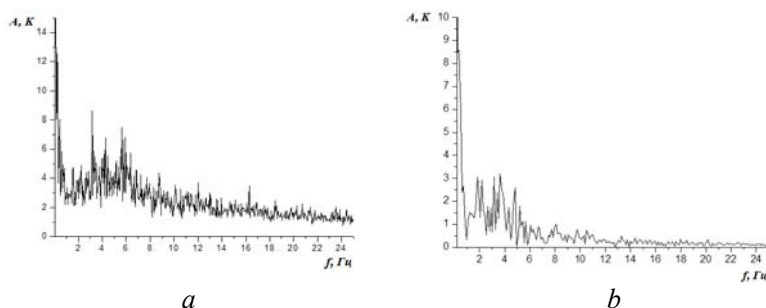


Рис. 2.3. Частотный спектр температуры в факеле пламени: *a* – по данным тепловизора JADE J530SB со спектральным диапазоном 2,5–2,7 мкм; *b* – по данным с термопары типа WR (вольфрам-рений) с диаметром спая 50 мкм

На рис. 2.3, *b* приведен частотный спектр изменения температуры термопары, длительность реализации данных 250 с. Из рис. 2.3, *b* видно, что в диапазоне 2–6 Гц, так же как и на рис. 2.3, *a*, присутствуют характерные частотные максимумы колебаний температуры с амплитудой в несколько градусов. Вероятно то, что амплитуда изменения температуры термопары ниже, чем в показаниях тепловизора, это связано с тем, что термопара вносит изменение в структуру факела пламени и имеет инерционность. К тому же при низкой скорости горючих газов пламени необходимо учитывать потери количества тепла спаем на излучение и вследствие имеющейся теплопроводности вдоль проводов термопары [17].

Следует отметить, что совпадение частотных характеристик как при измерении температуры тепловизором, так и термопарой говорит об обусловленности этих колебаний физическими процессами горения. В работе [18] приводится частотный анализ для температур, измеренных термопарами при горении лесных горючих материалов, где выделяются частоты 6–7 Гц, которые, по мнению автора, связаны с собственными колебаниями элементов горючих материалов.

На рис. 2.4 приведены спектры изменения температуры в пламени, образующемся при горении растительных горючих материалов, полученные по результатам обработки термограмм в спектральном интервале 2,64–3,25 и 4,0–5,0 мкм. Из рисунка видно, что в спектральном интервале 4,0–5,0 мкм отсутствуют ярко выраженные

пульсации температуры. Кроме того, следует отметить, что применение спектрального интервала 4,0–5,0 мкм и интервала с центром 4,35 мкм и полосой пропускания 180 нм для измерения полей температуры в наших условиях некорректно, так как интенсивность излучения продуктов горения СО и СО₂ в этих спектральных интервалах превышает интенсивность излучения АЧТ, соответствующего реальной температуре в пламени, что приводит к значительному завышению полученных значений температуры.

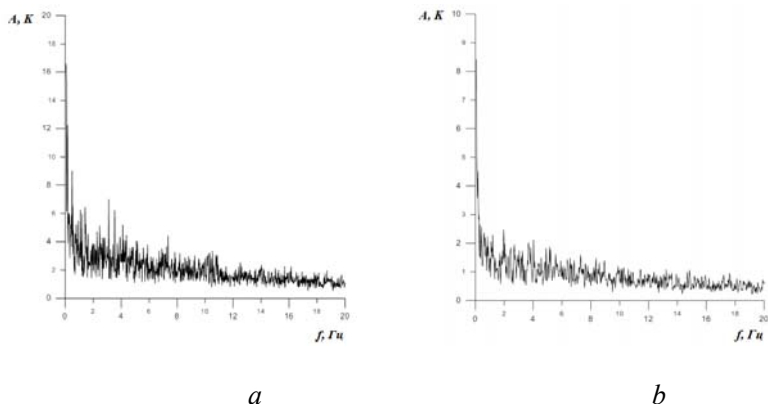


Рис. 2.4. Спектр изменения температуры в факеле пламени: *a* – по данным тепловизора JADE J530SB со спектральным диапазоном 2,64–3,25 мкм; *b* – по данным тепловизора JADE J530SB со спектральным диапазоном 4,0–5,0 мкм

Аналогичные эксперименты были проведены и для спирта. На рис. 2.5 приведены спектры изменения температуры в пламени, образующемся при горении спирта, для разных спектральных интервалов измерения.

Из рис. 2.5 видно, что при измерениях в спектральном интервале 2,5–2,7 и 3,1–3,3 мкм в спектре изменения температуры присутствует частотный максимум около 4,6–4,8 ГГц. В случае измерений в спектральном интервале 3,7–3,9 такой частотный максимум не наблюдается, так как в этом спектральном диапазоне излучение пламени спирта мало.

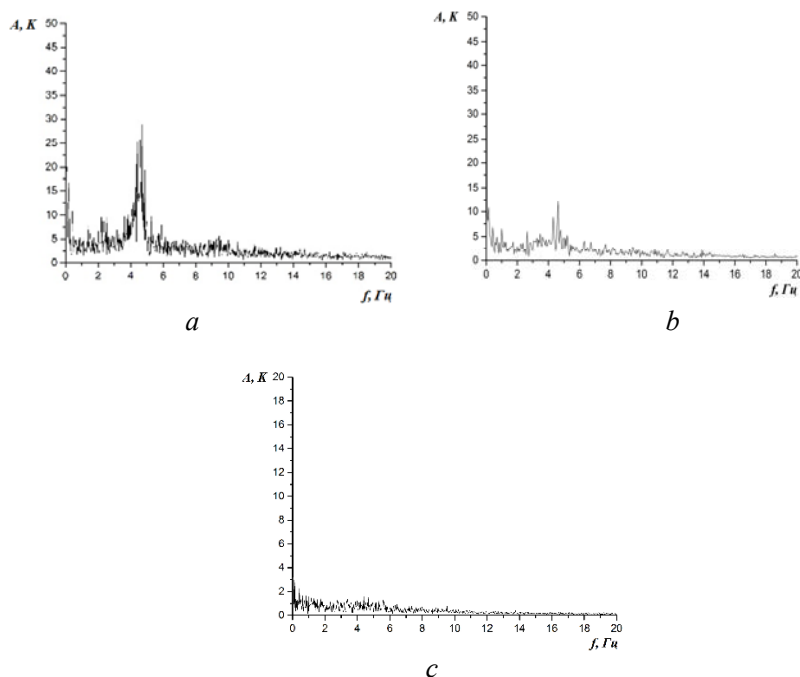


Рис. 2.5. Спектры изменения температуры в пламени, образующемся при горении спирта, по данным измерений в спектральных интервалах: 2,5–2,7 мкм (a), 3,1–3,3 мкм (b), 3,7–3,9 мкм (c)

Очевидно, что наличие разных частотных максимумов в спектрах изменения температуры в пламени связано со структурой течения в пламени, которая различается для спирта и для растительных горючих материалов. Учитывая, что все частотные максимумы присутствуют при обработке термограмм в диапазоне длин волн от 2,5 до 3,3 мкм, то очевидно, что пульсации температуры обусловлены в большей части движением разогретых паров воды и углекислого газа в пламени (см. рис. 2.2, 2.6). В работе [19] приводится диаграмма режимов турбулентного горения. Вероятно, что характерные частотные максимумы в спектре изменения температуры в пламени связаны в первую очередь с турбулентностью течения в пламени, а не, как утверждалось в работе [18], с собственными колебаниями

элементов горючих материалов. Определение этой связи представляет интерес для дальнейших исследований.

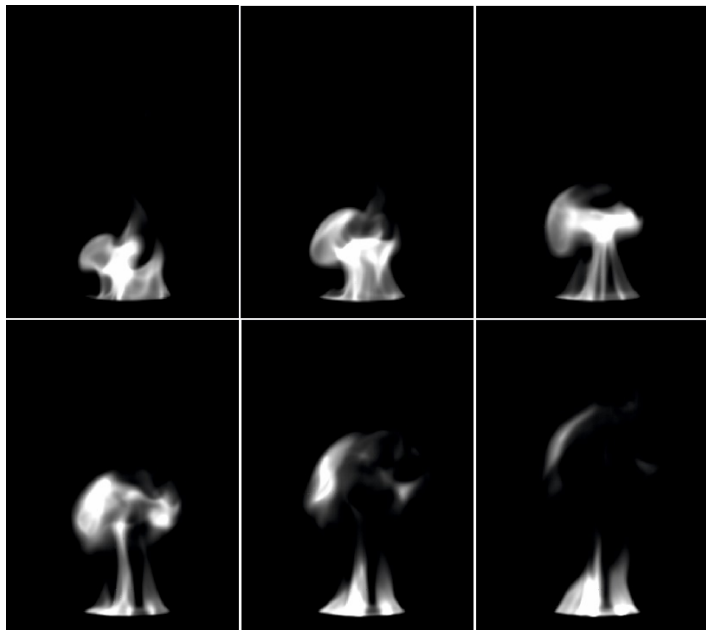


Рис. 2.6. Последовательность термограмм пламени при горении этанола

Наиболее наглядно причину пульсаций температуры в пламени можно видеть на рис. 2.6, где приведена последовательность термограмм. На рис. 2.6 видно, что в нижней части пламени образуется область высоких температур, которая вследствие сил плавучести поднимается вверх, расширяется и весь этот процесс повторяется с частотой около 4 раз в секунду.

Резюмируя результаты обработки экспериментальных данных, можно сделать следующие выводы:

1. Температура в пламени многократно изменяется во времени, и в спектре температуры пламени, образующемся при горении растительных горючих материалов, присутствуют характерные частотные максимумы от 2 до 7 Гц, в спектре изменения температуры при горении спирта этот максимум находится в окрестности 4,6–4,8 Гц.

Эти пульсации температуры связаны с пространственной структурой течения в пламени продуктов горения и степенью турбулентности высокотемпературной среды.

2. Для получения детализированных тепловизионных изображений пламени с хорошим пространственным и частотным разрешением необходимо использовать матричные тепловизоры с узкими спектральными интервалами и частотой полных кадров не менее 20 Гц.

2.3. О связи пульсаций температуры в диффузионном пламени с турбулентностью

Физико-химические процессы, связанные с горением и распространением пламени в технологических устройствах и при природных пожарах, реализуются, как правило, в условиях турбулентности [20]. Разные участки фронта пламени переносятся вместе с газом с различными скоростями, которые складываются из осредненной и пульсационной составляющих. В результате этого фронт пламени приобретает сложную форму, хаотически искривляется, площадь поверхности пламени возрастает, что приводит к увеличению скорости выгорания реагентов. Турбулентное горение представляет собой нестационарный процесс турбулентного смешения продуктов сгорания со свежей смесью и воспламенение ее вследствие повышения температуры. В этих условиях закономерности ламинарного распространения пламени теряют силу. Решающими факторами становятся турбулентные пульсации и связанная с ними интенсивность турбулентного перемешивания.

В зависимости от масштаба турбулентности и величины турбулентных пульсаций возможен различный механизм горения в турбулентных потоках [21].

Если линейные масштабы турбулентности малы по сравнению с толщиной ламинарного пламени, а турбулентные пульсации малы по сравнению со скоростью распространения ламинарного пламени, то процесс горения реализуется в режиме объемного горения. Модель объемного горения основана на предположении, что турбулентное пламя по своей структуре не отличается от ламинарного [22]. Турбулентное пламя, так же как и ламинарное пламя, состоит из зоны подогрева и зоны объемной химической реакции. При этом

мелкомасштабная турбулентность прежде всего воздействует на процессы переноса в пламени. Для объёмной модели полностью применима теория ламинарного пламени с заменой молекулярных коэффициентов переноса на турбулентные.

Для случая, когда масштаб турбулентности больше ширины зоны реакции, Г. Дамкёллер [23] предложил модель пламени, в которой предполагается, что под действием турбулентных пульсаций плоский фронт пламени искривляется и превращается в клубок ламинарных фронтов. В этом режиме ламинарные пламена разделяют зоны несгоревшей и полностью сгоревшей смеси. Перемещение таких зон в потоке сопровождается интенсивными пульсациями температуры и концентрации реагента.

Достаточно интенсивная турбулентность может вызвать не только искривление, но и дробление фронта ламинарного пламени на отдельные участки [24]. Горение происходит не в растянутой зоне, подобной фронту ламинарного пламени, а в отдельных микрообъемах, распределенных по всей зоне турбулентного горения. Здесь отсутствуют ламинарные или микромасштабные фронты пламени, так как они не успевают сформироваться на границах между объемами исходной смеси и продуктов реакции вследствие их быстрого относительного движения и конечного периода индукции. В соответствии с гипотезой Сполдинга [25] горение происходит во многих отдельных вихрях. Существенной особенностью модели является дробление этих вихрей вследствие процессов диссипации на все меньшие объемы, поверхности раздела которых с горячими газами достаточны для поддержания реакции.

Однако, несмотря на многочисленные исследования [26–30], проблема описания турбулентного горения остается одной из самых сложных. Многие стороны этой проблемы не только не исследованы теоретически и экспериментально, но и не достигли уровня конкретизации, который позволил бы с уверенностью говорить о завершении этапа постановки задачи. Ответы на многие вопросы, связанные с исследованием горения в турбулентных пламенах, может дать бесконтактное экспериментальное исследование структуры турбулентного пламени.

При исследовании процессов горения различных топлив применение методов термографии позволяет отказаться от использования большого числа термпар. Благодаря этому возможно исследование

полей температуры в пламени без внесения возмущений в него и возможна визуализация температурных неоднородностей [31–35]. И применением быстродействующих тепловизоров установлено, что температура в пламени многократно изменяется во времени [8, 31, 34] и в спектре изменения температуры присутствуют характерные частоты [8, 31]. Эти частоты вызваны перемещением в пламени температурных неоднородностей, что связано со структурой течения. В работах [14, 18, 36] представлены поля скоростей, линии тока и температурные неоднородности в пламени, образующемся при сжигании углеводородных топлив. Из представленных в [14, 18, 36, 37] результатов очевидно, что пульсации температуры в пламени имеют непосредственную связь с турбулентным режимом течения в пламени. В математических моделях [38–41], описывающих распространение лесных пожаров, непосредственно учитывается вклад турбулентности в пламени в распространение фронта горения.

В этой связи представляет интерес определение размеров температурных неоднородностей в пламени, определение масштабов турбулентности в нем и сравнение полученных результатов. Далее приводится описание результатов экспериментальных исследований по определению спектров изменения температуры в пламени, определению размеров температурных неоднородностей, а также сравнение с полученными теоретически масштабами турбулентности в пламени, образующемся при горении растительных горючих материалов и некоторых жидких углеводородных топлив.

2.4. Экспериментальная установка для определения спектров пульсаций температуры и измерения температурных неоднородностей

На рис. 2.7 представлена экспериментальная установка, включающая в себя АЧТ и пламя как источники ИК-излучения, которое регистрируется тепловизором, расположенным на одной оптической оси.

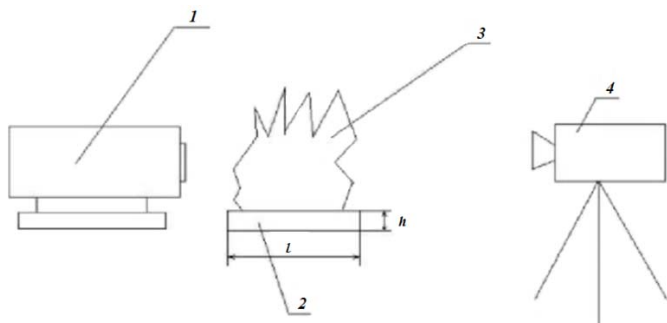


Рис. 2.7. Экспериментальная установка для определения оптических свойств пламени: 1 – АЧТ-45/100/1100; 2 – слой РГМ (l – длина, h – ширина); 3 – пламя; 4 – тепловизор (JADE J530SB)

Модель АЧТ-45/100/1100 позволяет варьировать температуру от 573 до 1773 К. В качестве РГМ использовалась смесь полевых горючих материалов, характерных для юга Новосибирской области, а также хвоя кедра. Горючие материалы располагались на одной оптической оси с тепловизором и АЧТ. Высота слоя варьировалась от 5 до 8 см. Масса РГМ изменялась от 50 до 200 г ($\pm 0,1$ г).

Влагосодержание РГМ не превысило 8 %. Также в качестве горючих материалов использовались спирт, бензин, керосин, дизельное топливо массой 10–20 г, которые наливались в емкость диаметром 15 см.

Расстояние между тепловизором и АЧТ составило 3 м, а между тепловизором и центром пламени – 2 м.

Температура в пламени регистрировалась при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром 2,5–2,7 мкм. Выбор этого фильтра обусловлен рекомендациями [31, 42] и анализом спектра излучения исследуемых в данной работе горючих материалов, приведенного в [42]. Все измерения проводились в диапазоне температур от 583 до 1773 К со скоростью записи 177 Гц. Матрица тепловизора имела размер 320×240 точек. Фокусное расстояние объектива было равно 50 мм.

Коэффициент излучения пламени корректировался по сравнению с излучением АЧТ и с измерениями температуры в пламени с помощью термопар типа WR с диаметром слоя 50 мкм и постоянной времени 0,1 с.

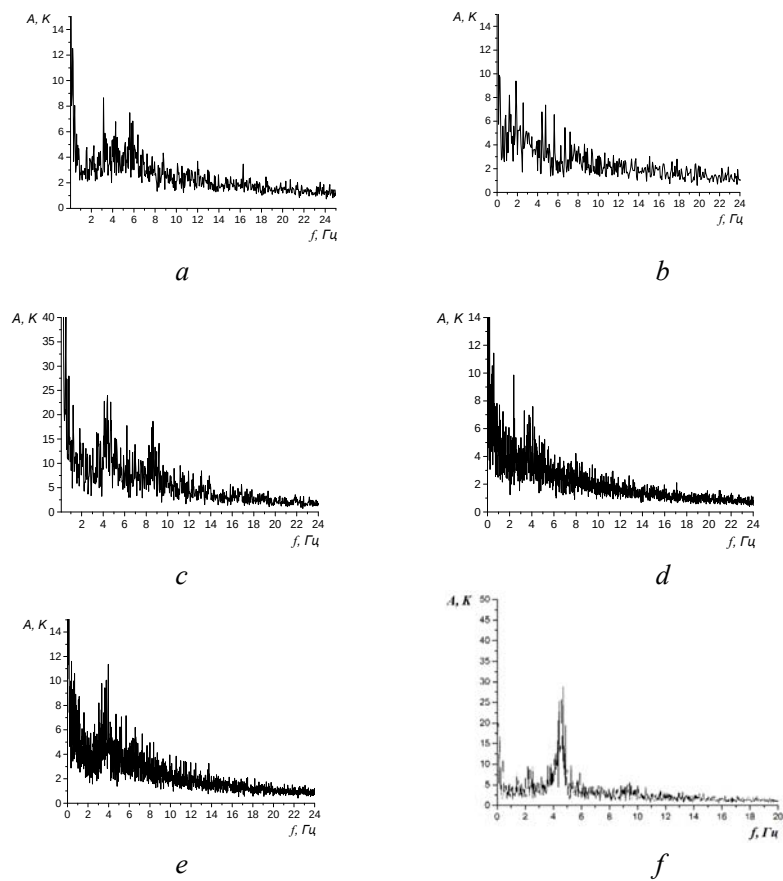


Рис. 2.8. Спектры изменения температуры в пламени: *a* – растительные горючие материалы (смесь трав); *b* – хвоя кедра; *c* – бензин; *d* – керосин; *e* – дизтопливо; *f* – спирт

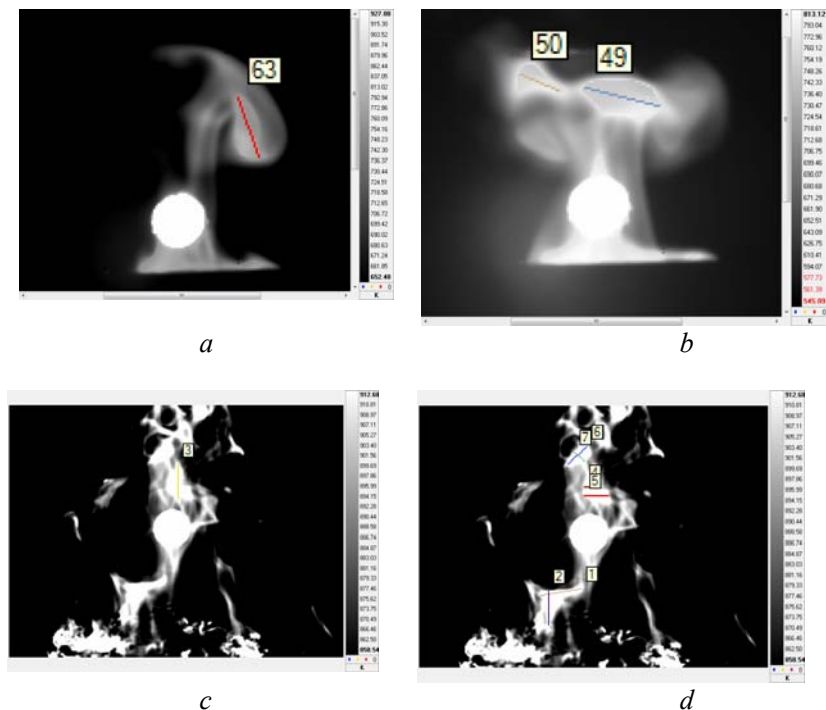


Рис. 2.9. Измерение размеров температурных неоднородностей в пламени, образующемся при горении этилового спирта (*a, b*) и хвои кедра (*c, d*)

Используя подход, описанный в предыдущей главе, с помощью БПФ были получены спектры изменения температуры в пламени для рассмотренных в данной работе горючих материалов. На рис. 2.8 представлены спектры изменения температуры.

Как видно из рис. 2.8, в спектре изменения температуры в пламени присутствуют выраженные частоты, наличие которых обусловлено структурой течения в пламени и перемещением разогретых неоднородностей и их размером.

Для оценки размеров неоднородностей производилась покадровая обработка термограмм, где в каждом кадре выбирались хорошо выраженные температурные неоднородности в факеле пламени и при помощи инструментов программного обеспечения Altair опре-

делялись их размеры. На рис. 2.9 на примере пламени, образующегося при горении этилового спирта и хвои кедра, показаны крупные температурные неоднородности в пламени и инструменты по определению их геометрических размеров. Так как температурные неоднородности имеют неправильную геометрическую форму и изменяются в размерах и форме во времени, то в качестве конечного результата измерения размера неоднородности в определенный момент времени бралось среднее значение по нескольким измеренным направлениям.

2.5. Сравнение результатов экспериментальных измерений с теоретическими оценками масштабов турбулентности

В работе [43] представлены теоретические оценки масштабов турбулентных вихрей, в которых происходит микрообъемное горение газа, проявляющееся на термограммах в виде температурных неоднородностей. Масштабы турбулентности определяются следующим образом:

$$b = \frac{\sqrt{k}}{f} = f^{-1} \frac{\sqrt{\langle T'T' \rangle}}{T} \sqrt{gL}, \quad (2.1)$$

где L – высота факела пламени; f – частота пульсации температуры в спектре; T – температура в пламени.

Соотношение (4) в [43] преобразовано в вид

$$Ri_t Fr_t = 1, \quad (2.2)$$

где $Ri_t = \frac{gH\sqrt{\langle T'T' \rangle}}{TU^2}$, $Fr_t = \frac{U^2}{gb}$, $H = \sqrt{\frac{gL}{f^2}}$.

В табл. 2.1 представлены результаты теоретических оценок масштабов турбулентности для течения в пламени и показатели измерения размеров температурных неоднородностей в пламени.

Таблица 2.1

Сравнение результатов экспериментальных измерений размеров температурных неоднородностей и показателей теоретических расчетов масштабов турбулентности по спектрам изменения температуры

Тип горючего	L , м	$f \pm \Delta f$, Гц	$b \pm \Delta b$, м	$b_{\text{exp}} \pm \Delta b_{\text{exp}}$, м	Ri_t	Fr_t
Этиловый спирт	0,3	4,6 $\pm$ 0,5	0,0032 $\pm$ 0,0002	0,0033 $\pm$ 0,0015	0,05596	17,8712
Бензин	0,7	4,8 $\pm$ 0,8	0,025 $\pm$ 0,005	0,024 $\pm$ 0,004	0,2014	4,9659
		8,6 $\pm$ 0,5	0,014 $\pm$ 0,001	0,015 $\pm$ 0,003	0,1124	8,8973
Керосин	0,7	2,5 $\pm$ 0,1	0,157 $\pm$ 0,006	0,019 $\pm$ 0,005	0,2907	3,4402
		4,0 $\pm$ 0,5	0,098 $\pm$ 0,014	0,012 $\pm$ 0,004	0,2180	4,5869
Дизельное топливо	0,5	4,0 $\pm$ 1	0,025 $\pm$ 0,0055	0,019 $\pm$ 0,006	0,1846	5,4183
Смесь растительных горючих материалов	1,2	3,2 $\pm$ 0,2	0,049 $\pm$ 0,003	—	0,1752	5,7068
		4,5 $\pm$ 0,5	0,035 $\pm$ 0,004	—	0,1246	8,0252
		5,8 $\pm$ 0,5	0,027 $\pm$ 0,002	0,018 $\pm$ 0,008	0,0967	10,3436
Хвоя кедра	0,8	2 $\pm$ 0,5	0,062 $\pm$ 0,013	—	0,3289	3,0401
		5 $\pm$ 0,5	0,029 $\pm$ 0,003	—	0,1316	7,6003
		8 $\pm$ 0,5	0,019 $\pm$ 0,001	0,022 $\pm$ 0,011	0,0822	12,1604
Древесина сосны	1,2	4 $\pm$ 1	0,051 $\pm$ 0,01	—	0,1402	7,1335
		7 $\pm$ 0,1	0,029 $\pm$ 0,004	0,011 $\pm$ 0,007	0,0801	12,4836
Древесина кедра	1,2	4 $\pm$ 1	0,042 $\pm$ 0,011	—	0,1309	7,6394
		7 $\pm$ 1	0,024 $\pm$ 0,004	0,023 $\pm$ 0,007	0,0748	13,3689
Древесина березы	1,2	5 $\pm$ 1	0,036 $\pm$ 0,007	—	0,1068	9,3630
		10 $\pm$ 0,5	0,017 $\pm$ 0,002	0,017 $\pm$ 0,002	0,0534	18,7260

Сравнивая значения b и b_{exp} , представленные в табл. 2.1, видим, что в целом средний размер температурных неоднородностей практически совпадает с теоретической оценкой масштабов турбулентности, однако больший разброс значений по сравнению с теоретическими расчетами обусловлен, по мнению авторов, с тем, что при обработке термограмм приходится иметь дело с двумерным изображением, а в действительности температурные неоднородности трехмерны и изменяют свои размеры по всем направлениям при своем перемещении в пламени.

Следует отметить, что при обработке термограмм наиболее четко выделялись температурные неоднородности небольшого размера, соответствующие частотам в спектре изменения температуры от 6 Гц, а более крупные температурные неоднородности в ряде случаев было невозможно измерить ввиду «размытой» их границы. Этой ситуации соответствуют прочерки в таблице.

Существенное расхождение экспериментальных и расчетных данных для горения керосина связано с высокой амплитудой пульсаций температуры в пламени и отсутствием ярко выраженных границ областей температурных неоднородностей.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что для оценки масштабов турбулентности течения химически реагирующего газа допустимо применять методы термографии, с помощью которых можно получать спектр изменения температуры в исследуемой среде, а по полученному спектру с помощью приведенных в данной работе соотношений получать оценочные значения масштабов турбулентности.

Кроме того, представляет интерес проведение PIV-измерений [44] с целью получения мгновенных полей скорости и линий тока, которые позволят измерить размеры вихрей в конкретный момент времени.

Глава 3. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГРАФИИ В НЕКОТОРЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

3.1. Опыт применения термографии в полунатурных полевых экспериментах

Коллективом кафедры физической и вычислительной механики, в состав которого входили и авторы этой книги, 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.



Рис. 3.1. Вид экспериментальной площадки с установленными деревянными щитами (1)

В мае 2011 г. на БЭК ИОА СО РАН проводился эксперимент [45] для исследования распространения пожара и воздействия его на деревянные постройки (рис. 3.1) 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: $1000 \times 100 \times 15$, $1000 \times 100 \times 20$, $1000 \times 100 \times 25$ и $1000 \times 50 \times 25$ мм. Доски шириной 100 мм сбивались в сплошной щит, а доски $1000 \times 50 \times 25$ мм сбивались с промежутками 50 мм, как забор из штакетника (рис. 3.1), также был установлен брус $700 \times 200 \times 200$ мм из сосны с естественным влагосодержанием 36,7 %, которого он достиг за 1 год хранения на открытом воздухе.

На заднем плане рис. 3.1 видна мачта поста мониторинга ИОА СО РАН. С помощью приборов поста мониторинга определялся газовый состав продуктов горения (см. табл. 1.1), 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. 3.2).



Рис. 3.2. 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 верхне-

го 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 [46].

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 – 11,3 %; Мышиный горошек – 9,1 %; Ежа сборная – 10,8 %. Запас СГМ на экспериментальной площадке изменялся в пределах 0,172–0,263 кг/м².



Рис. 3.3. Зажигание экспериментальной площадки

Зажигание производится по всей ширине площадки (рис. 3.3). Распространение фронта пожара и его структура в видимой области контролировались с помощью видеокамеры Sony DCR-DVD505E, в инфракрасной области – с помощью тепловизоров JADE J530SB (с частотой съемки 50 кадров в секунду) и Inframetrics-760. Тепловизор JADE J530SB использовался с дисперсионным 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 видеокамера располагались на автовышке на высоте 20 м над поверхностью земли.

На рис. 3.4 показано воздействие фронта степного пожара на деревянные щиты.



Рис. 3.4. Воздействие фронта степного пожара на деревянные щиты

В результате эксперимента было обнаружено (рис. 3.5), что наименьшие повреждения получил щит из штакетника (доски 1000×50×25 мм, сколоченные с промежутками 50 мм).



Рис. 3.5. 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 [47, 48]: в деревянный щит заделывалась термопара, 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: $\epsilon_{\text{эф}} = 0,68$. На рис. 3.6 приведена термограмма щита из штакетника.



Рис. 3.6. Термограмма щита из штакетника

Из рисунка видно, что температура поверхности штакетника достигает значений 826–870 K, что согласуется с работой [49]. На рис. 3.7 приведена термограмма щита из досок толщиной 25 мм непосредственно перед воспламенением забора.

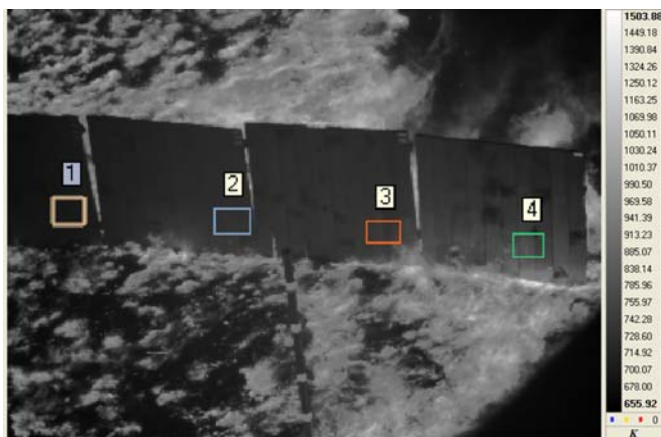


Рис. 3.7. Термограмма забора из доски толщиной 25 мм

Видно, что температура поверхности (области 1–4 на рис. 3.7) в зоне последующего воспламенения достигает 895–937 К, что превышает примерно на 60 градусов температуру поверхности штакетника (области 1–3 на рис. 3.6) 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 [47].



Рис. 3.8. Термограмма горения образца чёса

На рис. 3.8 приведена термограмма горения образцов 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).

Было зафиксировано, 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 1 на рис. 3.9). При этом температуры в зоне горения достигали значений 1020 К.

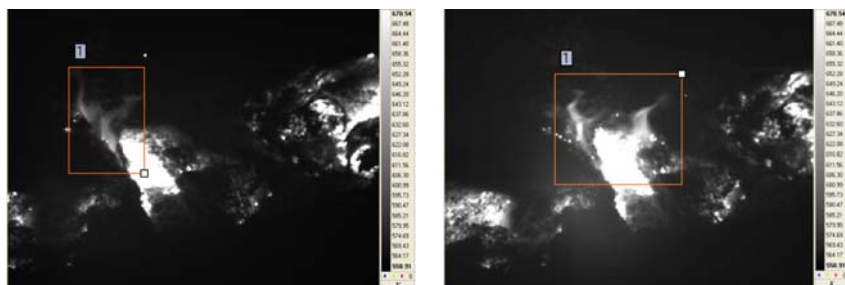


Рис. 3.9. Пламенный режим горения на границе между образцами чёса и вершинного торфа

Во всех натурных 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 сильный, то полоса шириной 3 м не обеспечивала достаточной защиты от переноса пожара за пределы экспериментальной площадки.

Из данных фактов можно сделать 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. Было установлено, 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 $0,172\text{--}0,263 \text{ кг/м}^2$ недостаточно для воспламенения жилых домов из бруса, а их воспламенение возможно только при довольно продолжительном воздействии огня, что возникает на практике при захламленной 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.

3.2. Определение температур во фронте степного пожара

Для определения $\varepsilon[\lambda_1; \lambda_2]$ использовался описанный выше способ. При этом было получено удовлетворительное согласование показаний термопар и тепловизора JADE J530SB при $\varepsilon [2,5; 2,7 \text{ мкм}] = 0,79$. Для тепловизора Inframetrics-760 удовлетворительное согласование температур достигалось при $\varepsilon [3; 5 \text{ мкм}] = 0,65$. Различие коэффициентов излучения обусловлено разным спектральным диапазоном работы тепловизоров, в первую очередь его шириной.

На рис. 3.10, *a* и *b* приведены термограмма и распределение температур в точках 1, 2, 3, которые находятся в непосредственной близости от термопар, а на рис 3.10, *c* приведены результаты измерений при помощи термопар. Кривые 1–3 на рис. 3.10, *c* соответствуют показаниям термопар, расположенных рядом с точками 1–3 на рис. 3.10, *a*, кривые 4 и 5 соответствуют показаниям термопар, расположенных выше точки 3 на 30 и 60 см соответственно. Очевидно совпадение максимальных температур во фронте горения, полученных тепловизором и термопарами. Однако необходимо отметить, что полученная при помощи тепловизора нестационарность температуры во фронте горения обусловлена скоростью съемки (50 Гц) и отсутствием инерционности, свойственной термопарам.

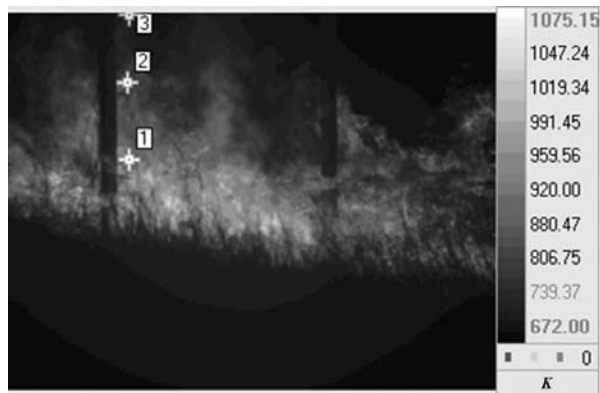
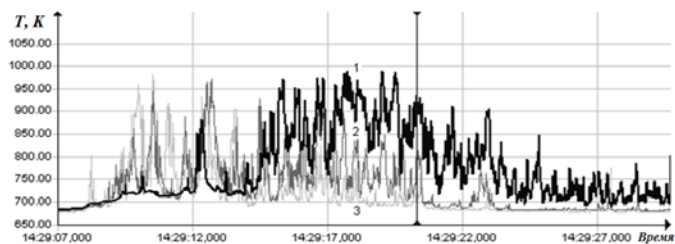
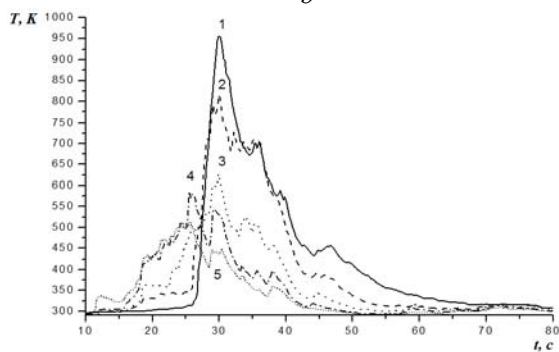
*a**b**c*

Рис. 3.10. Термограмма: *a* – изменение температур во фронте пожара в точках 1, 2, 3; *b* – по данным, полученным с тепловизора JADE J530SB; *c* – изменение температур во фронте пожара по зарегистрированным показаниям термопар

При анализе профиля температур во фронте горения можно сделать вывод, что температуры на передней и задней кромках фронта горения колеблются в диапазоне 730–950 К и достигают максимума около 1100 К в глубине фронта горения, что согласуется с [50]. Полученные в результате измерений значения температур в целом ниже на 100–150 К величин, опубликованных в [50], что можно объяснить меньшим запасом и различным составом СГМ.

На рис. 3.11 приведены термограмма и вертикальные профили температуры во фронте пожара, полученные при помощи тепловизора JADE J530SB.

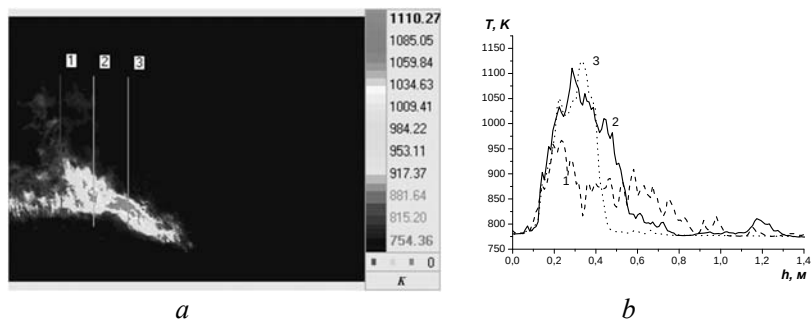


Рис. 3.11. Термограмма (*a*) и профили температуры (*b*) во фронте степного пожара, образованного от точечного источника зажигания: 1, 2 и 3 – соответствуют сечению 1, 2 и 3 на рис. 3.11, *a*

Из анализа рис. 3.11 видно, что максимальные температуры внутри фронта степного пожара наблюдаются на высоте 0,2–0,7 м, что связано со структурой растительного покрова и согласуется с высотой доминирующих растений.

При анализе профиля температур во фронте горения можно сделать вывод, что температуры на передней и задней кромках фронта горения колеблются в диапазоне 730–950 К и достигают максимума около 1100 К в глубине фронта горения, что согласуется с [38, 50]. Полученные в результате измерений значения температур в целом ниже на 100–150 К величин, полученных выше и опубликованных в [50], что можно объяснить меньшим запасом СГМ.

Следует отметить, что в диапазоне 8–12 мкм наличие дыма или дымовой завесы слабо влияет на регистрацию и наблюдение нагрет-

тых объектов (рис 3.12,а,б). Поэтому применение этого спектрального интервала в тепловизорах, установленных на борту летательных аппаратов, позволяет пилотам авиалесоохраны наблюдать кромку пожара сквозь густой дым и принимать правильное решение о высадке пожарного десанта за кромку для тушения пожара или локального применения средств тушения.

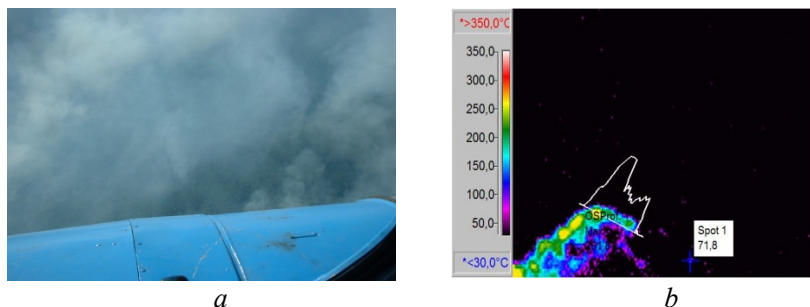


Рис. 3.12. Изображение лесных пожаров (а); термограмма кромки пожара (б)

Пространственное разрешение инфракрасного изображения пламени обеспечивается форматом фотоприёмной матрицы, размер матрицы 320×240 пикселей уже обеспечивает неплохое качество. При наблюдении очагов горения на больших дистанциях следует применять сменные объективы с узким полем зрения (телевики) и матрицы больших размеров, например, 640×512. Хотя такого детального разрешения объектов, какое мы привыкли наблюдать в видимом диапазоне, в инфракрасном диапазоне вы не получите в силу дифракционного ограничения, так как длина волны примерно в 10 раз больше.

3.3. Экспериментальное исследование беспламенного горения с применением термографии. Определение коэффициента излучения фронта горения торфа

Одним из случаев применения термографии при исследовании процессов горения является определение полей температуры в зоне беспламенного горения. Далее представлены результаты некоторых

экспериментальных исследований зоны беспламенного горения на примере горения образцов торфа.

С целью определения коэффициента излучения тлеющей поверхности торфа был проведен ряд экспериментов. В качестве образцов торфа был взят высушенный при температуре 100 °С (влажность $w = 0,8 \%$) образец № 1 из разд. 3.1. В качестве источника зажигания использовался опад хвой сосны с $w = 2,5 \%$. Масса образцов определялась при помощи электронных весов AND HL-400 с точностью 0,1 г, влажность образцов – при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0,01 %.

В качестве образцов были взяты торфы (табл. 3.1, образец № 1, 2). Образцы брались размерами 150×150×100 мм. Предварительно образцы высушивались при температуре 100 °С до влажности $w = 0,5–0,8 \%$. В качестве источника зажигания использовался опад хвой сосны с $w = 2,5 \%$. Масса образцов определялась при помощи электронных весов AND HL-400 с точностью 0,1 г, влажность образцов – при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0,01 %. Образец помещался на грунт, термоизолировался с трех сторон. С одной стороны образца торфа укладывался слой из опада хвой массой 100–205 г., высота слоя опада совпадала с высотой образца торфа. На расстоянии 10 мм от края образца торфа на глубину 20–80 мм помещались 5 термопар (хромель-алюмель 500 мкм). Температура поверхности торфа дополнительно регистрировалась при помощи тепловизора JADE J530SB с погрешностью измерений, не превышающей 1 %. Использовался дисперсионный оптический фильтр со спектральным интервалом 2,5–2,7 мкм, позволяющий измерять температуру в диапазоне 583–1773 К. При измерениях использовались калибровки завода-изготовителя. После прогорания слоя ЛГМ, когда показания термопар указывали на достижение устойчивой температуры горения торфа, образец торфа поворачивался горячей поверхностью в сторону тепловизора и производилась съемка.

На рис. 3.13 приведена термограмма тлеющей поверхности образца торфа.

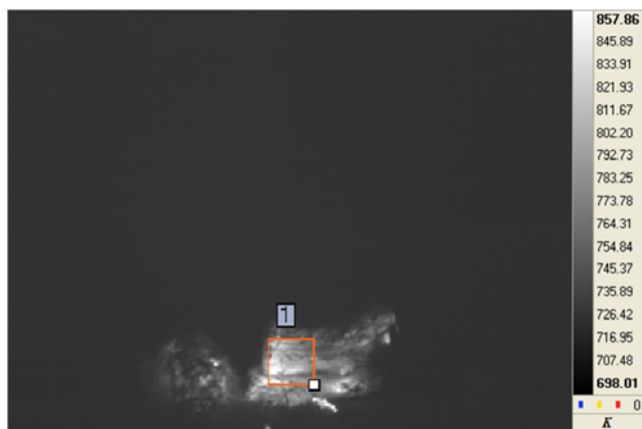
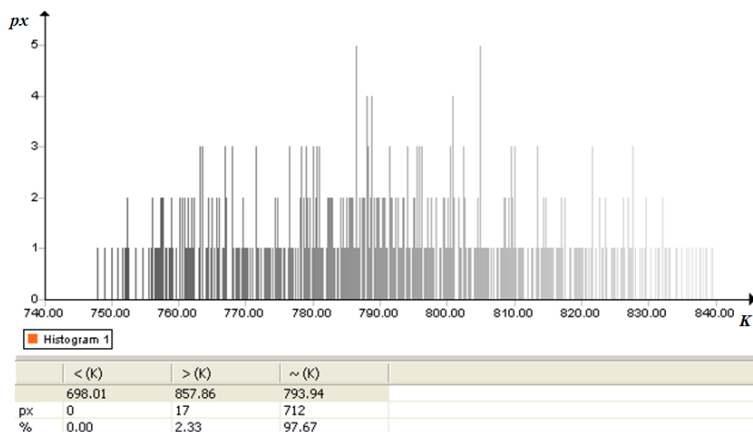


Рис. 3.13. Термограмма поверхности тлеющего образца торфа

Область *I* на рис. 3.13 имеет следующие характерные температуры: максимальная температура – 878,81 K, минимальная температура – 747,59 K, средняя температура – 795,67 K, среднеквадратическое отклонение – 29,91 K. На рис. 3.14 приведена гистограмма температуры для области *I* рис. 3.13. Из гистограммы очевидно, что наиболее часто встречаемая температура в этой области лежит в диапазоне 780–810 K.

Рис. 3.14. Гистограмма температуры для области *I* рис. 3.13

На рис. 3.15 приведен спектр излучения торфа до границы 5,5 мкм, полученный при помощи спектрографа SOLAR TII MS2001i в сравнении с расчётной кривой Планка. При сравнении этих кривых видно, что спектр излучения торфа близок к спектру абсолютно черного тела, провалы на огибающей спектра торфа вызваны наличием свободного углекислого газа в атмосфере.

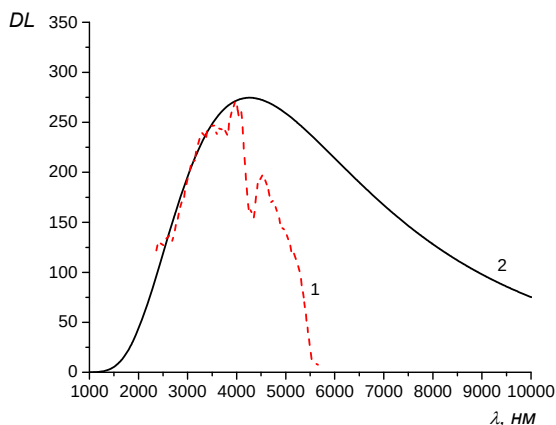


Рис. 3.15. Спектр излучения торфа (кривая 1) и закон Планка (кривая 2)

Учитывая сходство спектра излучения торфа со спектром АЧТ, для определения ε использовался следующий метод. Бралось максимальное значение температуры, полученное термопарой, подбирались область на поверхности образца в непосредственной близости от термопары, затем по гистограмме выбиралась наиболее часто встречаемая температура в этой области и при помощи программного обеспечения, которым укомплектован тепловизор, находили коэффициент излучения для наилучшего согласования температуры термопары и температуры поверхности, полученной при помощи тепловизора. Аналогичные операции проводились для остальных термопар. В результате были получены значения ε [2,5–2,7 мкм] = $0,95 \pm 0,01$.

3.4. Экспериментальное определение глубины фронта горения торфа

В качестве исследуемых образцов использовались образцы торфа из различных болот Томской области, в том числе входящих в известную систему Васюганских болот. Ботанический состав образцов, глубина залегания h , степень разложения R и зольность z приведены в табл. 3.1.

Необходимо отметить, что образцы 1 и 2 различаются глубиной залегания и плотностью и практически не отличаются ботаническим составом.

Таблица 3.1

Ботанический состав и характеристики образцов торфа

№ обр.	Тип торфа	h , м	Состав растительных остатков	Содержание, %	R , %	z , %	ρ , кг/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Сфагновый верховой (фускум-торф)	0–0,1	Сфагнум бурый	90	5		20,4
			Сфагнум магелланский	5			
			Сфагнум узколистный	+			
			Кустарнички	5			
			Клюква мелкоплодная	+			
			Хамедафне обыкновенная	+			
			Сосна обыкновенная	+			
2	Сфагновый верховой (малланикум-торф)	0,1–0,3	Сфагнум бурый	15	5		156, 25
			Сфагнум магелланский	85			
			Кустарнички	+			
			Клюква мелкоплодная	+			
			Хамедафне обыкновенная	+			
			Багульник болотный	+			
			Пушица влагалищная	+			

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
3	Низинный	0–0,4	Гипновые мхи :	10	45		690
			Дрепанокладус крючковидный	45			
			Дрепанокладус Зен- дтнера	5			
			Бриум ¹	+			
			Осока	10			
			Осока двухтычинко- вая	15			
			Осока ситничек	+			
			Осока волосистоп- лодная	+			
			Вахта трехлистная	15			
			Хвощ топяной	+			
			Береза пушистая	+			
4	Травяно- сфагновый переход- ный	0– 0,35	Кора и древесина сосны	25	35	7,5	152,8
			Кора и древесина березы	5			
			Кора карликовой березки	10			
			Пушица	30			
			Осока волосистоп- лодная	10			
			Хвощ	5			
			Сфагнум магеллан- ский	10			
			Сфагнум централь- ный	5			
5	Шейхце- риево- сфагновый переход- ный	0,4– 0,5	Сфагнум балтийский	65	10,5	3,33	121,4
			Сфагнум узколист- ный	10			
			Пушица	10			
			Шейхцерия	5			
			Корешки вересковых кустарников	5			
			Клюква	5			
			Древесина сосны и березы	Еди- ничное			

¹ Определение точной видовой принадлежности невозможно.

Необходимо отметить, что образцы 1 и 2 различаются глубиной залегания и плотностью и практически не отличаются ботаническим составом.

Образцы торфа предварительно подвергались сушке в сушильном шкафу ШСП-0.5-200 при температуре 373 К для достижения влагосодержания, при котором проводились эксперименты. Образцы вырезались различного размера от $0,03 \times 0,03 \times 0,03$ до $0,35 \times 0,15 \times 0,15$ м с сохранением его первоначальной структуры, которые после этого укладывались в термоизолированный кожух. Зажигание производилось равномерно по всей плоскости. В одной серии экспериментов зажигание производилось с верхней стороны образца, а в другой – с боковой стороны. Плотность образцов приближалась к естественной и варьировалась в пределах $\rho = (20,4\text{--}690) \text{ кг/м}^3$. Масса образцов определялась при помощи электронных весов AND HL-400 с точностью 0,1 г, влагосодержание – при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0,01 %. Влагосодержание исследуемых образцов варьировалось в пределах $w = (0,7\text{--}17,3) \%$. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанции Meteoscanner RST01923. Температура воздуха варьировалась в пределах $T_e = (288\text{--}293) \text{ К}$. Относительная влажность воздуха изменялась в пределах $\varphi = (20\text{--}35) \%$, атмосферное давление $P_e = (9,94 \cdot 10^4\text{--}1,02 \cdot 10^5) \text{ Па}$.

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали для влагосодержания $\delta w/w \cdot 100 \% \leq 3,3 \%$, для массы $\delta m/m \cdot 100 \% \leq 1,2 \%$, атмосферного давления $\delta P_e/P_e \cdot 100 \% \leq 6,0 \%$, температуры воздуха $\delta T/T \cdot 100 \% \leq 5,3 \%$, относительной влажности воздуха $\delta \varphi/\varphi \cdot 100 \% \leq 2,5 \%$ и времени $\delta t/t \cdot 100 \% \leq 4,3 \%$.

После зажигания образец выдерживался в течение 10–35 мин в зависимости от скорости распространения фронта горения и приближения его к противоположной стороне образца, где производилось зажигание. После чего образец разрезался при помощи остро отточенного лезвия. Этот подход обусловлен тем, что, имея малую скорость распространения фронта горения порядка $5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ [51], за время разрезания и раскладывания образцов, которое не превышало 20 с, фронт горения не мог переместиться на расстояние, превышающее погрешность измерений.

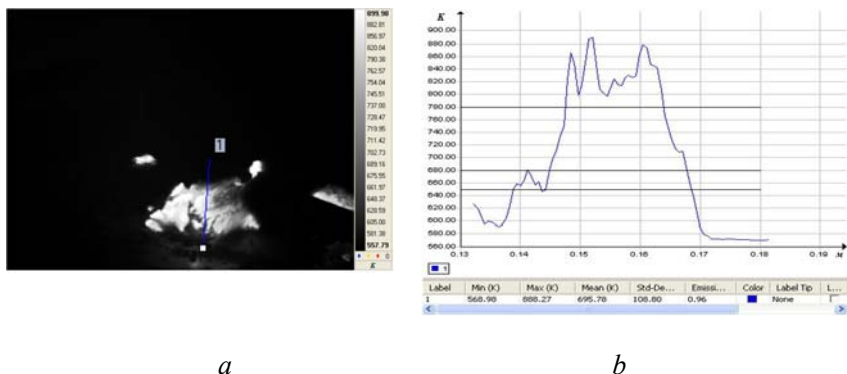


Рис. 3.16. Термограмма (а) и профили температуры (b) в сечении 1 для образца торфа № 1 размерами $0,14 \times 0,1 \times 0,11$ м с $w = 6,4\%$, $\rho = 20,4$ кг/м³ при $\epsilon = 0,96$. Зажигание образца производилось с верхней стороны



Рис. 3.17. Термограмма (а) и профили температуры (b) в сечениях 1–3 для образца торфа № 5 размерами $0,08 \times 0,08 \times 0,06$ м с $w = 13,1\%$, $\rho = 121,4$ кг/м³ при $\epsilon = 0,96$. Зажигание образца производилось с верхней стороны

Распределение температуры на срезе образцов регистрировалось при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосным дисперсионным оптическим фильтром F0616 со спектральным интервалом 2,5–2,7 мкм, позволяющим измерять температуру в диапазоне 583–1773 К с погрешностью измерений, не превышающей 1 %. При измерениях использовались калибровки завода-изготовителя для выбранно-

го типа объектива и фильтра. Съемка производилась с расстояния 1 м с объективом, имеющим фокусное расстояние $F = 50$ мм, а матрица тепловизора имела разрешение 320×240 пикселей. При такой геометрии эксперимента и выбранных оптических характеристиках тепловизора пространственное разрешение было значительно меньше 1 мм, а программное обеспечение тепловизора позволяет с точностью до 1 мм определять размеры исследуемого объекта.

При всех температурных измерениях при помощи тепловизора использовался коэффициент излучения $\varepsilon = 0,96$, который был предварительно определен для всех образцов торфа с использованием реперных термопар по методике, аналогичной описанной в [47], имел незначительные различия и изменялся в пределах: $\varepsilon = 0,95\text{--}0,96$.

На рис. 3.16 и 3.17 представлены термограммы и профили температуры разрезов для образца торфа № 1 (рис. 3.16,а) и № 5 (рис. 3.17,а) соответственно при условии зажигания образца сверху. На рис. 3.16,б и 3.17,б изображены изотермы 650, 680 и 780 К (прямые линии).

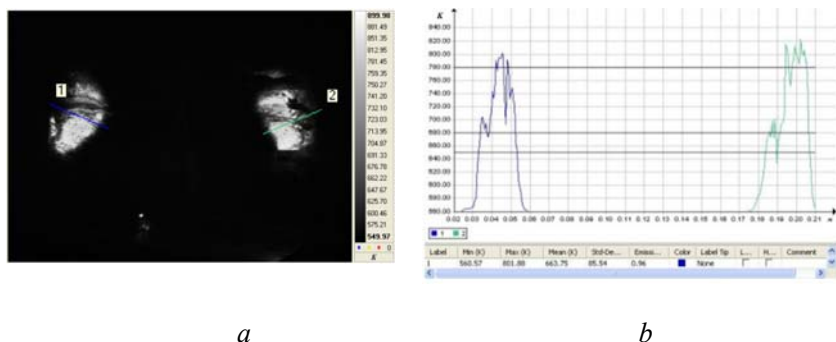


Рис. 3.18. Термограмма (а) и профили температуры (б) в сечениях 1–3 для образца торфа № 5 размерами $0,08 \times 0,08 \times 0,06$ м с $w = 13,1\%$, $\rho = 121,4$ кг/м³ при $\varepsilon = 0,96$. Зажигание образца производилось с боковой стороны

На рис. 3.18 приведены термограмма и профили температуры для разрезов образца торфа № 5, когда зажигание образца производилось сбоку. Как на рис. 3.17,б, так и на рис. 3.18,б наблюдается перегиб температурных кривых в районе изотерм 650 и 680 К, объясняемый тем, что в этом месте происходит смена процесса пиролиза торфа на его горение. В подавляющем большинстве эксперимен-

тов этот перегиб существует в диапазоне температур 680 ± 25 К, поэтому в дальнейшем для определения глубины фронта горения торфа использовался подход [38], в котором глубина фронта лесного пожара определяется как расстояние между изотермами 780 К, только в случае торфа следует брать изотерму 680 К.

В табл. 3.2 приведены результаты экспериментов по определению глубины фронта горения торфа при зажигании образцов.

Таблица 3.2

Результаты экспериментального определения глубины фронта горения торфа

Номер образца	w, %	Глубина фронта горения, мм	Примечание
1	2	3	4
1	7	25 ± 3	Зажигание сверху
1	7	27 ± 3	Зажигание сбоку
1	6,4	24 ± 3	Зажигание сверху
1	6,4	27 ± 2	Зажигание сбоку
2	6,4	14 ± 2	Зажигание сверху
2	6,4	16 ± 3	Зажигание сбоку
2	0,7	14 ± 2	Зажигание сверху
2	0,7	16 ± 3	Зажигание сбоку
3	2,6	12 ± 2	Зажигание сверху
3	2,6	13 ± 2	Зажигание сбоку
4	13,1	23 ± 2	Зажигание сверху
4	13,1	26 ± 2	Зажигание сбоку
4	17,3	18 ± 1	Зажигание сверху
4	17,3	21 ± 2	Зажигание сбоку
5	13,1	20 ± 1	Зажигание сверху
5	13,1	24 ± 2	Зажигание сбоку

Следует отметить, что в горизонтальном направлении распространения фронта горения его глубина больше, чем в случае вертикального распространения. Это обусловлено возможностью поступления окислителя в зону горения с двух сторон: сверху и со стороны движения фронта, что также объясняет то, что скорость распространения торфяного пожара по поверхности выше, чем в вертикальном направлении, это же отмечено в работах [52, 53]. Различие этих величин не превышает 20 %. Однако с ростом плотности образца раз-

личие между глубиной фронта горения в разных направлениях его распространения уменьшается ввиду того, что уменьшается пористость образца и соответственно снижается коэффициент фильтрации, в результате чего ухудшается доступ окислителя к фронту горения.

Кроме того, было определено, что размеры образцов, изменявшиеся в диапазоне от $0,03 \times 0,03 \times 0,03$ до $0,35 \times 0,15 \times 0,15$ м, на глубину фронта горения и температуры во фронте горения не влияют. Также не оказывает существенного влияния и влагосодержание торфа в диапазоне $w = (0,7-17,3) \%$.

Важными факторами, влияющими на глубину фронта горения, являются плотность торфа и степень его разложения. Например, образцы № 1 и 2 практически не различаются ботаническим составом и взяты в одном и том же месте. Их существенное различие заключается в разной плотности. При этом у образца № 2 глубина фронта горения меньше, чем у образца № 1. В случае с низинным торфом (образец № 3) при увеличении плотности в несколько раз в сравнении с образцами вершинного торфа (образцы № 1, 2, 4, 5) глубина фронта горения близка к глубине фронта горения вершинного торфа образца № 2 при $\rho = 156,25 \text{ кг/м}^3$.

В результате экспериментов установлено следующее:

1. Глубина фронта горения торфа изменяется в пределах 10–28 мм.
2. Глубина фронта горения торфа зависит от типа торфа, степени его разложения и плотности.
3. Глубина фронта горения торфа слабо зависит от влагосодержания, изменяющегося в диапазоне $w = (2,6-17,3) \%$ и не зависит от размеров образца в диапазоне от $0,03 \times 0,03 \times 0,03$ до $0,35 \times 0,15 \times 0,15$ м.
4. Местоположение передней кромки фронта горения торфа следует определять по изотерме $680 \pm 25 \text{ К}$.
5. При беспламенном горении торфа (пиролизе) в отсутствие ветра торф выгорает примерно на 94 % от первоначальной массы тела, образуя объёмный хрупкий каркас.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной книге представлены результаты экспериментальных исследований процессов горения некоторых видов топлив с применением термографии, получены основные принципы и обоснован выбор спектральных интервалов работы тепловизоров для решения различных исследовательских задач. Также показана связь пульсаций температуры в пламени с турбулентностью течения в нем и приведены некоторые примеры практического применения тепловизоров при исследованиях природных пожаров.

Авторы надеются, что монография окажется полезной ряду ученых, решившихся на применение термографических методов при исследовании горения, а также приведет к более широкому применению термографии в научных поисках. Пожалуй, самым главным сдерживающим фактором в использовании термографических методов сегодня является большая цена тепловизоров «научного класса» и специальных узкополосных фильтров. Например, стоимость применяемых авторами фильтров составляла без учета стоимости калибровки около 300–400 евро, а желание более детально исследовать свойства пламен в разнообразных узкополосных интервалах длин волн и в комбинированных интервалах не было реализовано только из-за недоступной цены изготовления желанных фильтров, которая начиналась от 10 тыс. евро.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2009. 544 с.
2. *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.
3. *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. Andover, USA. March 2001. P. 1–13.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *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.
9. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988. 416 с.
10. *Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т. и др.* Комплекс установок для исследования природных пожаров // Изв. вузов. Физика. 2009. № 2/2. С. 84–90.
11. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 287 с.
12. *Цвык А.Ш.* ИК-спектры излучения пламени при горении опада кедр // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1004–1008.

13. 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.
14. Pastor E., Rigueiro A., Zárate L. et al. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques // Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Viegas (ed.). 2002. Rotterdam: Millpress, 2002.
15. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Loboda E.L. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929226 (Novosibirsk, Russia, November 25, 2014).
16. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С. и др. Сажепаровой режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, №3. С. 411–414.
17. Льюис Б., Пуз Р.Н., Тэйлор Х.С. Физические измерения в газовой динамике и при горении. М.: ИЛ, 1957. Ч. II. 316 с.
18. Голованов А.Н. Малые энергетические возмущения в задачах механики реагирующих сред и охраны окружающей среды: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 1999. 372 с.
19. Chaudhuri S., Akkerman V.K., Chung K. Law Spectral formulation of turbulent flame speed with consideration of hydrodynamic instability // Physical Review E 84, 026322. 2011.
20. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968. 592 с.
21. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion. Berlin: Springer, 1999. 300 p.
22. Shelkin K.I. Influence of tube non-uniformities on the detonation ignition and propagation in gases // Exp. Theor. Phys. 1940. № 10. P. 823–827.
23. Damköhler G. Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammengeschwindigkeit in Gasgemischen // Zs. Elektrochem. 1940. Vol. 46. German. S. 601.
24. Libby P., Williams F.A. Turbulent Reacting Flows. Academic Press Inc., 1994. 237 p.
25. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames," Thirteenth Symposium (International) on Combustion in the USA. 1971. P. 649–657.
26. Gran I.R., Ertesvåg I.S., Magnussen B.F. Influence of Turbulence Modeling on Predictions of Turbulent Combustion // AIAA Journal. 1996. Vol. 35, № 1. P. 106.
27. Lilleheie N.I., Byggstøyl F. and Magnussen B.F. Numerical Calculations of Turbulent Diffusion Flames with Full Chemical Kinetics // Task Leaders Meeting, IEA. Amalfi, Italy, 1988.

28. Bray K.N.C., Champion M., Libby P.A. et al. Finite rate chemistry and presumed pdf models for premixed turbulent combustion // Combustion and Flame. 2006. № 46. P. 665–673.

29. Егоров А.Г., Тизилов А.С., Ниязов В.Я. и др. Исследование влияния закрутки спутного высокоскоростного потока воздуха на геометрические параметры алюминиево-воздушного факела // Химическая физика. 2014. Т. 33, № 10. С. 58.

30. Архипов В.А., Егоров А.Г., Иванин С.В. и др. Численное моделирование аэродинамики и горения газовзвеси в канале с внезапным расширением // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 6. С. 39–48.

31. Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P. The Use of Infra-red Thermography to Study the Optical Characteristics of Flames from Burning Vegetation // Infrared Physics and Technology 2014. № 67. P. 566–573.

32. Лобода Е.Л., Кузнецов В.Т. Экспериментальное исследование воспламенения торфа под воздействием потока лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 6. С. 86–92.

33. Qian C., Saito K. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique // Combustion Institute/Central and Western States (USA) and Combustion Institute/Mexican National Section and American Flame Research Committee. Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings. April 23-26, 1995. P. 81–86.

34. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels // QIRT. 2006 (URL:<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf>).

35. Dupuy J., Vachet P., Maréchal J. et al. Thermal infrared emission–transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner // International Journal of Wildland Fire. 2007. № 16. P. 324–340.

36. Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Лобода Е.Л. и др. Исследование структуры закрученного потока в модели вихревой камеры сгорания методом лазерной доплеровской анемометрии // Письма в журнал технической физики. 2012. Т. 38, № 24. С. 39–45.

37. Kairuki J., Dawson J.R., Mastorakos E. Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off // Combustion and Flame. 2012. № 159. P. 2589–2607.

38. Albini F.A. Physical model for fire spread in brush // Proceedings of the 2 Int. Symposium on Combustion. Pittsburg, 1967. P. 553–560.

39. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Томск: Томский государственный университет, 1997. 390 с.

40. Morvan D., Dupuy J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // Combustion and Flame. 2004. Vol. 138, No. 3. P. 199–210.

41. *Perminov V.A., Loboda E.L., Reyno V.V.* Mathematical modeling of surface forest fires transition into crown forest fires // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929225 (Novosibirsk, Russia, November 25, 2014).
42. *Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонов М.В.* Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.
43. *Loboda E.L., Matvienko O.V., Agafontsev M.V. et al.* Estimation of the turbulence scale in flame using the method of IR diagnostics // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 96802K (Tomsk, Russia, November 19, 2015).
44. *Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Шадрин Е.Ю. и др.* Визуализация структуры потока в вихревой топке // Письма в журнал технической физики. 2014. Т. 40, № 19. С. 104–110.
45. *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.
46. *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.
47. *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.
48. *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. С. 229–232.
49. *Кузнецов В.Т., Фильков А.И.* Воспламенение различных видов древесины лучистым потоком энергии // Физика горения и взрыва. 2011. № 1. С. 74–79.
50. *Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др.* Физическое моделирование степных пожаров в природных условиях // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 100–105.
51. *Борисов А. А., Борисов Ал.А., Горелик Р.С. и др.* Экспериментальное исследование и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1984. С. 5–22.

52. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В. и др. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79, № 3. С. 1–6.

53. Суков Я.В. Исследование параметров зажигания и горения торфа с помощью физического и математического моделирования: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2010. 23 с.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЦП – аналого-цифровой преобразователь
АЧТ – абсолютно черное тело
БПФ – быстрое преобразование Фурье
БЭК – базовый экспериментальный комплекс
DL – Digital Level (цифровой уровень)
ИК – инфракрасный
КИ – коэффициент излучения
ЛГМ – лесные горючие материалы
РГМ – растительные горючие материалы
СГМ – степные горючие материалы

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
<i>Глава 1. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАМЕНИ В СРЕДНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ</i>	6
1.1. О необходимости измерения спектра излучения пламени и выбора узкого спектрального интервала	6
1.2. Выбор спектрального интервала в среднем ИК-диапазоне для исследования процессов горения	11
1.3. Определение поправочного эффективного коэффициента излучения пламени и его зависимость от состава продуктов горения	18
1.4. Определение коэффициентов излучения при различном влагосодержании РГМ	22
1.5. Регистрация экранированных пламенем объектов	26
<i>Глава 2. ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ</i>	34
2.1. Об измерении поля температуры в пламени	34
2.2. Определение поля температуры в пламени и частотный анализ пульсации температур	35
2.3. О связи пульсаций температуры в диффузионном пламени с турбулентностью	41
2.4. Экспериментальная установка для определения спектров пульсаций температуры и измерения температурных неоднородностей	43
2.5. Сравнение результатов экспериментальных измерений с теоретическими оценками масштабов турбулентности	47
<i>Глава 3. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГРАФИИ В НЕКОТОРЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ</i>	50
3.1. Опыт применения термографии в полунатурных полевых экспериментах	50
3.2. Определение температур во фронте степного пожара	58
3.3. Экспериментальное исследование беспламенного горения с применением термографии. Определение коэффициента излучения фронта горения торфа	61
3.4. Экспериментальное определение глубины фронта горения торфа	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
ЛИТЕРАТУРА	73
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	78

Научное издание

ЛОБОДА Егор Леонидович
РЕЙНО Владимир Владимирович
АГАФОНЦЕВ Михаил Владимирович

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Редактор *Е.В. Лукина*
Компьютерная вёрстка *Г.П. Орловой*

Подписано в печать 09.09.2016 г.
Формат 60x84¹/₁₆. Печ. л. 5; усл. печ. л. 4,65; уч.-изд. л. 4,45.
Тираж 100 экз. Заказ

ООО «Издательство ТГУ», 634029, г. Томск, ул. Никитина, 4