

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Агафонцева Михаила Владимировича
на тему: «Исследование турбулентности в пламени с применением методов
термографии и математического моделирования»
по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

Теплофизика пламен представляет собой фундаментальную проблему, как в связи с приложениями, так и в научных аспектах гидро- и аэротермодинамики турбулентных высокотемпературных многокомпонентных химически реагирующих газовых потоков. Пламя – сложная оптическая среда, излучение от которой зависит от химического состава горючей смеси, продуктов горения, внешних условий и др. Исследования пламен необходимы для установления закономерностей физических процессов распространения природных и техногенных пожаров, разработки новых технологий в различных отраслях современной промышленности с применением высокотемпературных потоков газов, для развития методов диагностики высокоэнтальпийных и плазменных потоков в электродуговых и индукционных плазмотронах.

Тема диссертации М.В. Агафонцева актуальна, потому что направлена на получение новых экспериментальных и расчетных данных фундаментального характера о взаимосвязи полей температуры в пламенах с процессами горения в турбулентных потоках. В экспериментальном плане такое исследование с применением методов ИК-термографии необходимо для повышения точности и расширения диапазонов температурных измерений, бесконтактного контроля температуры в пламенах и на поверхности объектов, экранированных пламенем, с высоким временным и пространственным разрешением.

Принципиальным научным достижением автора является рациональное сочетание новых экспериментальных методов определения полей температуры в пламенах и численного моделирования турбулентного течения в факеле пламени. Именно такой подход позволил разработать новую методику оценки масштаба турбулентности факела на основе результатов регистрации спектров излучения пламени.

Системный подход к проблеме основан на последовательном решении цикла экспериментальных задач, имеющих существенное значение для кардинального

повышения точности и информативности диагностики пламен и потоков плазмы. Во первых, выполнена регистрация спектров излучения пламен с использованием спектрографа SOLAR TII MS2001i с диапазоном измерений 2 – 5.6 мкм. В качестве исследуемых горючих материалов использовались древесины сосны, березы и кедра, хвоя сосны, кедра, полевые растения, спирт, керосин, бензин, дизельное топливо, а также пропан-бутановая смесь.

Во вторых зарегистрировано инфракрасное излучение от факелов пламен для указанных материалов с использованием тепловизора JADE J530SB и получены частотные спектры изменения температуры в шести выбранных оптических интервалах. В частности, в эксперименте с горением этилового спирта продемонстрировано влияние инфразвукового воздействия в интервале частот 3 – 16 Гц на высоту пламени и на спектр пульсаций температуры. На основе анализа спектров изменения температуры сделан убедительный вывод о том, что пульсации температуры в пламени связаны с характером течения и наличием турбулентности.

В третьих, осуществлена регистрация инфракрасного излучения и получено распределение температуры в дозвуковой струе плазмы CO₂ в электродуговом плазмотроне Института теплофизики СО РАН. Показано, что тепловизор JADE J530SB позволяет измерять температуру в потоках плазмы до 4500 К.

Кроме того, методом цифровой трассерной визуализации (PIV) с использованием PIV-системы «Полис» получены поля мгновенной скорости при горении дизельного топлива, бензина, керосина и спирта.

Многоплановая экспериментальная работа автора включает постановку эксперимента, калибровку измерительных приборов, термографические и термодарные измерения температуры в факелах пламен, обработку экспериментальных данных и анализ результатов.

В результате обработки больших массивов экспериментальных данных включая двумерные термограммы пламен, PIV-фотографии турбулентных потоков с горением, оптических спектров излучения и спектров колебаний температур получены приоритетные научные результаты, как фундаментального так и прикладного характера. Определен оптимальный спектральный диапазон для измерений температуры в факеле пламени 2.5 – 3.0 мкм. Установлено, что длина волны 4.35 мкм и диапазон 4.0 – 5.0 мкм не пригодны для регистрации температур экранированных пламенем объектов.

На основе покадровой обработки термограмм выбирались самые яркие температурные неоднородности и с помощью компьютерной программы «Altair» определялись и усреднялись их размеры. На основе гипотезы о подобии полей пульсаций температуры и скорости сделана приближенная оценка масштаба турбулентных вихрей, в которых происходит микрообъемное горение газа. При этом осредненные значения квадратов пульсаций температуры определялись по измеренным спектрам изменения температуры. В результате двух независимых подходов получены согласованные в целом данные о масштабах турбулентности при горении спирта, бензина, керосина, дизельного топлива и древесины разных типов.

На основе сравнительного анализа мгновенных и усредненных по времени термограмм пламени, а также PIV-изображений получены новые экспериментальные данные о детальной структуре факелов, разделенных на семь зон в терминах турбулентного числа Рейнольдса Re_t . Определено, что в целом числа Re_t меняются для разных типов горючего в широком интервале 330 – 5810, при этом относительно плавно изменяясь в каждой из установленных областей.

В диссертации получены важные результаты о характере турбулентности в пламенах и в теоретическом плане. А именно, с использованием метода конечного объема выполнено численное моделирование осесимметричного течения горючей смеси паров дизельного топлива $C_{10}H_{22}$ в воздухе при наличии областей ламинарного, переходного и полностью турбулентного режимов течения, когда скорость горения определяется как химической кинетикой, так и процессами турбулентного перемешивания. Задача, численно решенная с использованием двумерных уравнений Рейнольдса и двухпараметрической $k-\varepsilon$ модели турбулентности, существенно осложнена уравнениями переноса для усредненных пульсаций концентраций химических компонентов топлива, температуры и их корреляции.

В результате рассчитано распределение масштаба турбулентности в факеле $C_{10}H_{22}$, которое качественно коррелирует с термограммой мгновенного поля температурных неоднородностей. Сравнение расчетного поля средней температуры с осредненной по времени термограммой показывает удовлетворительное согласие в центральной части факела.

На основании численного моделирования установлены механизмы формирования восходящей свободно-вынужденной конвективной струи в режиме объемного горения,

генерации турбулентных пульсаций на основном участке течения и затухания турбулентных возмущений на инерционном участке.

В целом такая систематическая проработка экспериментальных аспектов горения широкого набора горючих материалов с применением численного моделирования течения в турбулентном химически реагирующем факеле пламени проделана впервые, что и определяет принципиальную новизну рассматриваемой диссертации.

Научные положения диссертации, предъявленные к защите, обоснованы высоким уровнем исследования как в экспериментальном, так и теоретическом плане. Экспериментальные данные получены с использованием всех возможностей современной оптической аппаратуры для регистрации полей температуры в пламени и дозвуковых струй плазмы в средневолновом ИК-диапазоне и диагностики высокотемпературных потоков газов методом цифровой трассерной визуализации. Данные численных расчетов получены в рамках корректной постановки математической задачи о стационарном горении осесимметричного турбулентного факела с учетом протекания в потоке неравновесной экзотермической реакции. В качестве горючего вещества был рассмотрен н-декан ($C_{10}H_{22}$). Валидация физико-математической модели турбулентного горения осуществлена прямыми сравнениями результатов расчетов аэротермодинамических параметров с экспериментальными данными, полученными автором в этой же работе.

Результаты и выводы диссертации имеют высокую научную значимость как в фундаментальном, так и прикладном аспектах. Диссертация содержит обширный верифицированный экспериментальный, расчетный и справочный материал по теплофизике и аэротермодинамике пламен в разных средах. Этот материал весьма важен и полезен для решения современных задач аэрофизики. Автор внес существенный научный вклад в части экспериментальной теплофизики и вычислительной аэротермодинамики высокотемпературных химически реагирующих многокомпонентных газовых смесей.

Выводы диссертации опираются на тщательный анализ результатов экспериментов и численного моделирования, выполненных автором на высоком научном уровне. Рекомендации по применению результатов диссертации на практике основаны на новых научных сведениях фундаментального характера о явлении горения в турбулентных потоках химически реагирующих газов. Научные и технические

подходы, предложенные автором, позволяют повысить точность и информативность измерений температур в пламенах природного и техногенного характера, а также регистрации ИК-излучения экранированных пламенем объектов. Полученный ценный экспериментальный материал и результаты численного моделирования безусловно будут стимулировать дальнейшее развитие экспериментальных и численных исследований турбулентного горения.

По содержанию диссертации имеется ряд замечаний и вопросов.

- 1) В целом имеется хорошее согласие результатов измерений размеров температурных неоднородностей и теоретических расчетов масштабов турбулентности по спектрам изменения температуры. Однако из этого ряда выпадают данные для древесины сосны (таблица 1) и керосина (таблица 2). В чем может быть причина значительных расхождений экспериментальных и расчетных данных для этих горючих материалов?
- 2) Уравнения Навье – Стокса в разделе 1.2.1 излишни, поскольку они вообще не используются, а решаются уравнения Рейнольдса, приведенные в постановке задачи в разделе 3.4.1.
- 3) Регистрация инфракрасного излучения с использованием тепловизора дает огромный объем числовой и визуальной информации, в том числе в виде двумерных термограмм факелов пламени. Несмотря на высокую информативность этих картин течения их сложно сравнивать с другими данными эксперимента или расчета. Жаль, что не приведены осредненные по времени профили температуры по сечениям факела пламени. Это следовало бы сделать и в разделе 3.4, чтобы наглядно показать эволюцию профилей температуры в зонах 1 – 7 с различными характерными числами Рейнольдса.
- 4) В таблице 3 дизельное топливо выделяется нерегулярным изменением числа Re_t в областях пламени 1 – 7. С чем это может быть связано? Чем обусловлено скачкообразное изменение числа Re_t на границах этих областей? В чем может быть причина качественного различия в распределениях числа Re_t по центральным осям пламен в бензине и керосине на рис. 3.11?
- 5) Автором получен обширный экспериментальный и расчетный материал по физическим характеристикам различных пламен, однако прямых сравнений данных экспериментов и численного моделирования не так много. В этой связи

ценно, что на рис. 3.14 представлено качественное сравнение масштаба турбулентности в факеле $C_{10}H_{22}$, полученного в результате численного моделирования, и термограмма мгновенного распределения температурных неоднородностей в пламени. На рис. 3.15 для этого же эксперимента расчетные изотермы сравниваются с распределением средних температур, при этом в центральной части факела расхождение в экспериментальных и рассчитанных значениях средних температур не превышает $50^{\circ}C$. Вместе с тем, более информативным было бы сравнение экспериментальных и численных профилей средних температур в различных сечениях факела. Такие данные важны и полезны для валидации компьютерных кодов, разрабатываемых для численного моделирования горения в турбулентных газовых потоках.

- 6) Не приведены параметры режима дугового плазмотрона, для которого получено распределение температуры в дозвуковой струе плазмы CO_2 .
- 7) Определение коэффициента излучения ϵ представляет собой отдельную важную задачу экспериментальной теплофизики. Полученные в работе фактические значения ϵ имеют принципиальное значение для измерений температуры пламен при горении бензина, керосина, дизельного топлива и древесины березы, кедра и сосны. Возникает вопрос: к какой зоне пламени эти данные относятся и какова чувствительность коэффициента излучения к температуре?
- 8) В разделе 3.4.2 при постановке задачи в граничных условиях на нижней границе, откуда поступает горючее, не приведены фактические значения параметров, характеризующих пульсации температуры, концентрации горючего и их корреляции.

Вместе с тем, указанные замечания и вопросы не умаляют научной и практической значимости диссертационной работы М.В. Агафонцева, которая вносит существенный вклад в решение современных задач теплофизики и гидродинамики турбулентных течений. Данное экспериментально-теоретическое исследование, выполненное на высоком научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (по физико-математическим наукам).

Научные результаты, предъявляемые Агафонцевым М.В. к защите, достаточно полно опубликованы в научной литературе, автореферат правильно отражает содержание диссертации.

На основании изложенного считаю, что диссертация «Исследование турбулентности в пламени с применением методов термографии и математического моделирования» соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г.). Автор диссертации Агафонцев Михаил Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

КОЛЕСНИКОВ Анатолий Федорович

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией взаимодействия
плазмы и излучения с материалами
ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук»

Контактные данные:

тел.: 8 916 869 43 23, e-mail: koles@ipmnet.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”

Адрес места работы: Россия, 119526, г. Москва, проспект Вернадского 101, корп. 1,
ИПМех РАН

Подпись главного научного сотрудника ИПМех РАН

А.Ф. Колесникова удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМех РАН

к.ф.-м.н.



М.А. Котов

12.03.2020

+7-495-434-32-38

ipm@ipmnet.ru

http://www.ipmnet.ru