

## **ОТЗЫВ официального оппонента**

**на диссертационную работу Козлова Павла Владимировича  
«Экспериментальное исследование процессов излучения и горения в  
высокотемпературных газовых смесях», представленную к защите на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

**Актуальность темы.** Основная часть диссертационной работы Козлова П.В. посвящена исследованию излучательной способности газов нагретых до высокой температуры, вплоть до  $\sim 10000$  К. Исследования в этом направлении представляют значительный интерес для совершенствования систем тепловой защиты спускаемых космических аппаратов, особенно при скоростях порядка второй космической скорости, а также для физики сильных ударных волн, анализа спектров метеоритов в атмосфере и моделирования кинетических процессов в ударных волнах. Все это стимулирует дальнейшие экспериментальные исследования по определению потоков излучения за фронтом сильной ударной волны в широком диапазоне спектра излучения при низких начальных давлениях и высоких скоростях ударной волны. Еще одной областью применения методов исследования излучения высокотемпературных газов является измерение характеристик воспламенения ударно нагретых горючих смесей, таких как задержка воспламенения и фотоэмиссионные характеристики горения применительно к самовоспламенению углеводородных топлив в различных условиях. Изучение этих явлений представляет значительный интерес для разработки и совершенствования различного рода энергетических установок.

**Обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна.** Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением в исследовании современных экспериментальных методов и средств анализа получаемых данных, а также возможностью

получения информации по нескольким параллельным каналам. Дополнительным подтверждением надежности получаемых данных является их хорошая корреляция в области совпадающих условий с данными других авторов.

Научная новизна работы заключается в получении и интерпретации новых экспериментальных данных по интенсивностям излучения ударно нагретых газов и газовых смесей в абсолютных величинах для условий, моделирующих параметры входа космических аппаратов в атмосферу Земли и других планет. Представленные данные по интегральным разверткам излучения (панорамным спектрам), полученным в интервале длин волн 200–1100 нм и временные зависимости выделенных спектральных линий существенно расширяют диапазон имеющихся в литературе экспериментальных данных.

Несмотря на значительный прогресс в изучении процесса горения пропана в различных условиях имеющиеся данные по временам задержки воспламенения ограничены и относятся к давлениям менее 20 атм. Представленная в работе информация расширяет диапазон имеющихся экспериментальных данных, особенно это касается «богатых» смесей, для которых экспериментальные данные по временам задержки воспламенения отсутствуют. Практическая значимость результатов работы состоит в возможности применения полученных данных для тестирования имеющихся и разработки новых программных кодов для проведения прогностических расчетов термостойкости летательных аппаратов при полете в условиях неравновесного тепло- и массообмена. Предложен подход, позволяющий за счет оптимизации процесса детонационного горения в камере высокого давления ударной трубы, впервые в мировой практике для установок подобного типа достичь скорость ударной волны в воздухе, равной 11.4 км/с. Данные по временам задержек воспламенения пропана, а также пропан-воздушных и пропан-кислородных смесей являются основой для тестирования редуцированных кинетических механизмов, которые

используются для моделирования процесса горения пропана в различных камерах сгорания.

**Объем и краткая характеристика диссертационной работы.** Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется предмет и методы исследования.

В главе 1 представлен обзор литературных источников, посвященных экспериментальным данным, полученным на ударных трубах. Рассмотрены основные типы ударных труб, применяемых в настоящее время для исследования радиационных характеристик ударно-нагретых газов, а также измерения времен задержек воспламенения. Представлены результаты измерения фотоэмиссионных характеристик ударно-нагретого воздуха, а также атмосферных газов других планет, полученные на различных экспериментальных установках. сделан обзор данных по экспериментальному исследованию процессов воспламенения ударно-нагретых горючих смесей.

В главе 2 приведено описание экспериментальной установки и необходимые мероприятия по ее подготовке и настройке для проведения экспериментов. Основные достоинства экспериментальной установки – использование двух-диафрагменной ударной трубы, что позволяет получать более интенсивные ударные волны, и оснащение многоканальной фотометрической аппаратурой с высоким временным разрешением. Заслугой автора является создание метода высокоточной калибровки в широком спектральном диапазоне (200–1100 нм), основанного на сопряжении вольфрамовой ленточной лампы с дейтериевой дуговой лампой. Основными измеряемыми параметрами являются давление в отсеках ударной трубы, скорость ударной волны, интенсивность и спектральный состав излучения газа.

В главе 3 представлены результаты измерения интегральных (панорамных) и временных спектральных характеристик ударно нагретых газов аргона, кислорода, воздуха, а также смеси  $\text{CO}_2/\text{N}_2$ , моделирующей атмосферы

Венеры и Марса. Проведен анализ полученных интегральных по времени спектрограмм излучения. Выделены особенности временных осциллограмм для наиболее типичных линий спектра. Результаты измерений, проведенных автором, хорошо согласуются с литературными экспериментальными данными, полученными при сравнимых условиях. На основе собственных измерений и анализа литературных данных автором идентифицированы основные частицы (молекулы, атомы и ионы), дающие основной вклад в наблюдаемые спектры.

В главе 4 представлены результаты измерения времен задержки воспламенения в высокотемпературных пропан-воздушных смесях и пропан-кислородных смесях, сильно разбавленных аргоном, при давлении 30 атм коэффициентах избытка топлива 0.5, 1.0 и 2.0. Полученная информация расширяет объем экспериментальных данных для тестирования кинетических механизмов, которые используются для моделирования процесса горения пропана в различных камерах сгорания. Новым элементом, проведенных измерений является попытка измерить излучательную способность горючей смеси при воспламенении за ударной волной.

В целом диссертация П.В. Козлова является законченным исследованием, представляет решение актуальных задач, объединенных общим подходом, обеспечивающим возможность получать большой объем информации для использования в целом ряде практических приложений, а также для тестирования моделей физической и химической кинетики возбуждения и дезактивации электронно-возбужденных состояний, ответственных за испускание излучения на соответствующих длинах волн.

**Замечания по работе.** К содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. Известно, что в падающей ударной волне пограничный слой может оказывать влияние на параметры исследуемого газа. По этой причине в работе следовало бы сделать оценку степени влияния пограничного слоя на характеристики излучения ударно-нагретого газа.

2. Интерпретация полученных экспериментальных результатов проведена в рамках модели оптически тонкой среды, что в целом, по-видимому справедливо. Однако существует вероятность того, что для некоторых переходов имеет место самопоглощение, что может отразиться на характере эмиссионных спектров. В диссертационной работе следовало бы провести анализ такой возможности.
3. Временная эволюция свечения на длине волны 213 нм при нагреве молекулярного кислорода и воздуха за ударной волной демонстрирует ярко выраженный пик. Однако в тексте диссертации не совсем отчетливо описано, чем обусловлен этот пик излучения – падением температуры за счет диссоциации кислорода или убылью концентрации самого кислорода.

Вместе с тем, указанные замечания не затрагивают обоснованность и справедливость основных результатов и выводов диссертационной работы. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Козлов Павел Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории окисления углеводородов Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН

Смирнов Владимир Николаевич



11.09.2023

Контактные данные:

т ел.: +74959397396, e-mail: IZ@chph\_ras.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 01.04.17 – «Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва»

Адрес места работы: 119991, Москва, ул. Косыгина, 4, Федеральный исследовательский центр химической физики имени Н.Н.Семенова РАН.

Тел.: +74959397396, e-mail: IZ@chph\_ras.ru

Подпись Смирнова В.Н. удостоверяю,  
Ученый секретарь ФИЦ ХФ РАН  
к.ф.-м.н.

М.Н. Ларичев

11.09.2023

