

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Козлова Павла Владимировича
на тему: «Экспериментальное исследование процессов излучения и
горения в высокотемпературных газовых смесях»
по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа посвящена исследованиям процессов излучения газов за фронтом ударной волны (ударно нагретых газов) в неравновесных условиях, воспроизводящих вход летательных аппаратов в атмосферу планет Солнечной системы (Земли, Марса и Венеры) и воспламенение углеводородных горючих смесей в камерах сгорания. Задачи, решенные в диссертации, являются актуальными и важными, поскольку результаты исследований могут быть использованы для усовершенствования разрабатываемых моделей: термозащиты летательных аппаратов при полете в условиях неравновесного тепло - и массообмена, которые трудно воспроизвести в существующих гиперзвуковых аэродинамических установках; механизмов химических реакций, описывающих горение пропана, образование выхлопных газов и сажи в камерах сгорания.

Диссертация включает обширный экспериментальный материал, полученный автором, и состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Главы диссертации содержат описание исследований, на основе которых получены новые результаты. Перечень литературы насчитывает 181 источник и достаточно полно отражает имеющиеся публикации по исследованиям спектров испускания газов за фронтом ударной волны и процессов горения горючих смесей, содержащих пропан. Общий объем диссертации - 152 страницы, 105 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы. Обозначены предмет и объект исследований. Обсуждаются степень разработанности

темы, практическая значимость работы, научная новизна, личный вклад автора и степень достоверности полученных результатов.

В первой главе диссертации приведен аналитический обзор работ, посвященных современному состоянию основных направлений экспериментальных исследований процессов излучения и горения в высокотемпературных газовых смесях, полученных на ударных трубах.

Рассмотрены особенности конструкций гиперзвуковых аэродинамических ударных труб: ударные трубы с одной или двумя диафрагмами; ударные трубы с гиперзвуковым соплом. Предложена классификация ударных труб по способу нагрева толкающего газа в камере высокого давления и получения рабочего газа с высокой удельной энтальпией торможения: ударные трубы с импульсным электродуговым подогревом и установкой адиабатического сжатия (скорость ударной волны ≥ 8 км/с); ударные трубы с детонационным горением водородно-кислородной смеси (скорость ударной волны не выше 8 км/с).

Из сопоставления измеренных и рассчитанных с использованием столкновительно - излучательных моделей NEQAIR и NARA спектров испускания за фронтом ударной волны установлены основные закономерности в измеренных спектрах испускания следующих рабочих газов: воздуха, атмосферных газов - Титана спутника Сатурна, планет Марса, Венеры, Сатурна и Урана в зависимости от скорости ударной волны (6.8 - 13.64 км/с) и начального давления рабочего газа (0.1 - 0.5 Тор) в диапазоне длин волн от 170 до 1390 нм; смесей газообразного топлива (этана, н-гептана, изо-октана и н-декана) и воздуха, с добавлением аргона и при наличии неконтролируемых примесей паров воды, при температурах (950 - 1750 К), давлениях (1.4 - 50 атм.) и коэффициенте избытка топлива (1 - 1.88).

Обсуждается метод определения пространственного положения областей относительно фронта ударной волны, в которых излучение возникает: при условии неравновесного распределения энергии по внутренним степеням свободы компонент газовой смеси (область

неравновесного излучения); в условиях локального термодинамического равновесия состояния газа за фронтом ударной волны; в условиях, при которых устанавливается распределение энергии (подобно больцмановскому распределению с некоторой эффективной температурой) по отдельной внутренней степени свободы компоненты газовой смеси и т.д. (область равновесного излучения).

Показано, что современные данные о временах задержки воспламенения горючих смесей на основе пропана ограничены и относятся к давлениям менее 20 атм.

На основе обзора, автором сформулированы цель диссертационной работы и задачи, решенные в диссертации: исследование абсолютных интенсивностей спектров испускания ударно нагретых газов (аргона, молекулярного кислорода, воздуха и смеси углекислого газа с молекулярным азотом) в диапазоне длин волн от 115 до 1100 нм в диапазонах давления от 0.25 Тор до 5 Тор и скорости ударной волны в диапазоне от 7.7 км/сек до 11.4 км/сек; определение времени задержки воспламенения пропан-воздушных и пропан-кислородных смесей при температурах 1050 – 1780 К и давлении 30 атм.

Во второй главе диссертации приведено подробное описание созданной автором двух-диафрагменной ударной трубы с детонационным горением для измерения абсолютных величин интенсивностей спектров испускания ударно нагретых газов. Главными достоинствами и нововведениями в конструкцию гибридной ударной трубы являются: сочетание камеры сгорания с камерой высокого давления ударной трубы; усовершенствованный диафрагменный узел, в котором используется диафрагма с контролируемой толщиной и глубиной насечек. Усовершенствование конструкции ударной трубы позволило: впервые обеспечить высокие скорости ударных волн ($=11.4$ км/с) в камере низкого давления, воспроизводящие условия входа космических аппаратов в атмосферу Земли; добиться повторяемости результатов измерений; защитить

воспламенитель в камере сгорания от воздействия ударной волны, отраженной от диафрагмы узла; снижение влияния потока толкающего газа (кислородно – водородная смесь) на закручивание и унос отделившихся лепестков диафрагмы узла.

Особо следует отметить разнообразие измерительной аппаратуры и методов спектроскопии испускания, разработанных и используемых автором в исследованиях. Достоверность и обоснованность экспериментальных результатов подтверждается тем, что они получены независимыми методами. Созданная в рамках диссертации экспериментальная база спектроскопической диагностики может быть использована в фундаментальных и прикладных исследованиях не только излучательных характеристик ударно нагретых газов, но и, например, электрических разрядов в газах и жидкостях, что повышает практическую ценность работы.

О высоком научном уровне исследований свидетельствует детальное обсуждение определения эффективного времени излучения компонент газа за ударной волной и описание процедуры калибровки измерительной аппаратуры. Оптимизация времени экспозиции спектров испускания позволило выполнить исследования абсолютных интенсивностей спектров испускания ударно нагретых газов с высоким наносекундным разрешением.

Третья глава диссертации посвящена анализу результатов исследований спектральных характеристик аргона, молекулярного кислорода, молекулы оксида азота, воздуха и смеси углекислого газа с молекулярным азотом в условиях, соответствующих различным участкам траектории спуска космического аппарата. Приведено сравнение с результатами других работ. Данная глава занимает центральное место в диссертации и интересна тем, что на основе полученных результатах соискателем установлены основные закономерности излучения исследуемых газов в зависимости от скорости ударной волны и начального давления газа в камере низкого давления ударной трубы.

В результате анализа атомных спектров аргона определен интервал времени, в котором значение соотношения между приведенной интенсивностью излучения (отношение значений интенсивности и диаметра камеры низкого давления), исследуемых атомарных линий и соответствующей интенсивностью фона сохраняется. Это позволило правильно учитывать величину фона при определении длительности и приведенных интенсивностей излучения линий атомов аргона за фронтом ударной волны. Установлено, что длительность излучения аргона, максимальные значения приведенных интенсивностей излучения линий аргона и фона увеличиваются с повышением начального давления в камере низкого давления ударной трубы. Зависимость приведенных интенсивностей излучения атомных линий аргона от скорости ударной волны имеет менее выраженный характер. Разработанный автором подход для обработки результатов измерений имеет практическую ценность, поскольку может быть применен в исследованиях быстротекущих процессов излучения, например, в электрических разрядах в газах и жидкостях.

Практическую значимость имеют новые сведения о спектрах испускания молекулы и атома кислорода за фронтом ударной волны, воспроизводящей условия входа космического аппарата в плотные слои атмосферы Земли с орбитальной и сверхорбитальной скоростями. Данные могут быть использованы в исследованиях радиационного нагрева поверхности спускаемых космических аппаратов. Показано, что в спектре излучения молекулярного кислорода преобладают интенсивности молекулярных полос системы Шумана-Рунге. С увеличением скорости ударной волны интенсивность молекулярных полос и атомарных линий возрастает. Установленная закономерность особенно выражена в неравновесной области за фронтом ударной волны. Для молекулярного кислорода она наблюдается в широком диапазоне изменения скорости ударной волны. Для атомарного кислорода неравновесная область не имеет сильно выраженного характера.

Практический интерес и ценность имеют полученные автором данные о спектральном составе излучения за фронтом ударной волны. При использовании в качестве рабочего газа воздуха и смеси углекислого газа с азотом за фронтом ударной волны наблюдается сложный спектральный состав, обусловленный не только физико – химическими процессами с участием исходных компонент рабочего газа, а также присутствием неконтролируемых примесей в газе и люминесценцией кварцевого стекла окон камеры низкого давления под действием вакуумного ультрафиолета. При использовании в качестве рабочего газа воздушной смеси в спектре обнаружены: бета, гамма и дельта полосы молекулы оксида азота; полосы второй положительной и первой отрицательной систем молекулы и иона молекулы азота, соответственно; полосы фиолетовой системы молекулы циана; линии атомов водорода, натрия, лития, углерода, иона кальция, азота и кислорода. Для смеси углекислого газа с азотом наблюдаются: полосы четвертой положительной системы молекулы оксида углерода; полосы фиолетовой и красной систем молекулы циана; полосы системы Свана молекулы диуглерода; атомные линии углерода, кислорода, кальция, меди, натрия, лития и калия.

Практическую ценность имеют сведения о характере зависимости приведенных спектральных яркости и интенсивности (или поверхностной плотности) излучения возбужденных компонент исследуемых смесей от времени. Установлено, что они определяются, главным образом, скоростью распространения ударной волны. Из наблюдений временных зависимостей исследуемых величин определены эффективные времена излучения, приведенные спектральные и (интегральная по времени) яркости излучения в абсолютных единицах возбужденных компонент за фронтом ударной волны.

Достоверность результатов определения приведенной интегральной по времени яркости излучения в исследуемом диапазоне длин волн подтверждается из их сравнения с экспериментальными данными, полученными исследовательскими группами за рубежом.

В четвертой главе диссертации приведено описание средств измерений и конструкции ударной трубы, разработанных автором, и результаты исследований с их использованием времён задержек воспламенения в пропан-кислородной смеси (в диапазоне температур 1250 - 1770 К), разбавленных аргонем (91% объемного содержания в смеси), и в пропан-воздушной смеси (в диапазоне температур 1050 - 1780 К) при давлении 30 атм. и различных значениях коэффициента избытка пропана при 0.5, 1 и 2. Заметное место в главе отводится тестированию нового метода, предложенного автором, для определения тепловых потоков и времён задержек воспламенения горючих смесей в ударной трубе.

Полученные результаты имеют практическую ценность, поскольку восполняют недостающие экспериментальные данные о временах задержки воспламенения горючих смесей и могут быть использованы для разработки моделей механизмов химических реакций, описывающих горение пропана, образование выхлопных газов и сажи в камерах сгорания. Особого внимания заслуживают новые сведения о временах задержки воспламенения богатых горючих смесей при давлении 30 атм. с коэффициентом избытка пропана (= 2).

Для обеих смесей установлено, что значения времени задержки воспламенения в аррениусовских координатах увеличиваются с ростом температуры и удовлетворительно аппроксимируются прямой линией в исследуемом диапазоне изменения коэффициента избытка пропана от 0.5 до 2. С ростом коэффициента избытка пропана время задержки воспламенения горючей смеси увеличивается. Достоверность результатов измерений времени задержки воспламенения горючей смеси подтверждается путем сравнения с результатами измерений других авторов в диапазоне температур 1000 - 1800 К.

Новый метод определения времён задержек воспламенения горючих смесей в ударной трубе основан на применение быстродействующего термоэлектрического датчика для измерения тепловых потоков. Из

сравнения с результатами измерения времён задержек процесса воспламенения горючих смесей различными методами показано, что использование термоэлектрического датчика для измерения тепловых потоков в ударных трубах является перспективным и позволяет уточнить время задержки воспламенения пропан-воздушной смеси при повышенных температурах.

В Заключении приведены основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту.

Все полученные лично автором диссертации основные результаты являются принципиально новыми и состоят в следующем.

1. Разработана оригинальная конструкция гибридной ударной трубы, основанная на сочетании камеры сгорания с камерой высокого давления и с усовершенствованным диафрагменным узлом ударной трубы.

2. Получены новые экспериментальные данные об интенсивностях излучения в абсолютных единицах измерения в спектрах испускания молекулы и атома кислорода за фронтом ударной волны, воспроизводящей условия входа космического аппарата в атмосферу Земли с орбитальной и сверхорбитальной скоростями.

3. Разработана оригинальная конструкция термоэлектрического датчика и предложен новый метод для измерения тепловых потоков и времён задержек воспламенения горючих смесей в ударной трубе.

4. Получены новые экспериментальные данные о временах задержки воспламенения богатых пропан - кислородных и пропан - воздушных смесей при давлении 30 атм. с коэффициентом избытка пропана ($\phi = 2$).

Совместное использование различных взаимодополняющих и независимых экспериментальных методов позволяет сделать вывод о достоверности полученных автором результатов. По материалам диссертационной работы автором сделано множество докладов на специализированных научных семинарах, всероссийских и международных конференциях. Результаты исследований опубликованы в 15 научных статьях

в реферируемых зарубежных и отечественных периодических изданиях, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus и RSCI. Результаты разработок защищены двумя патентами Российской Федерации.

Практическая значимость работы состоит в том, что её результаты могут быть использованы для разработки моделей: механизма химических реакций, описывающих горение пропана, образование выхлопных газов и сажи в камерах сгорания; моделей термозащиты космических аппаратов.

Название работы соответствует содержанию исследований. Представленная работа, судя по автореферату и тексту диссертации, является завершённым исследованием. Автореферат отражает содержание диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней. Диссертация представляет собой специально подготовленную рукопись, содержит совокупность новых научных результатов, имеет внутреннее единство и полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Работа выполнена на высоком научном уровне, однако имеются замечания и вопросы.

1. На рис. 1.5 (см. стр.18) приведена диаграмма сопоставления измеренных и рассчитанных фотометрических величин спектров испускания воздуха. Замечание касается терминологии, используемой автором в подписи к рисунку и обозначению величин, откладываемых по осям ординат и абсциссы. Под спектральной и суммарной (по длинам волн) плотностями излучения, автором, как можно лишь догадываться, подразумеваются энергетические яркости (или лучистости) источника излучения. Для ясности изложения, в подписи к рисунку или при обсуждении данных тексте важно отметить, что они являются приведенными по диаметру камеры низкого давления ударной трубы. Кроме того, следует подчеркнуть, что длина волны, отложенная по оси абсцисс, относится не только к спектральной интенсивности лучистости источника, но также соответствует максимальному значению суммарной по длинам волн яркости источника

излучения. Поскольку суммарная по длинам волн яркость источника излучения не может зависеть от длины волны.

2. Измеренные и рассчитанные с помощью программ NEQAIR и NARA спектры, приведенные на многих рисунках (например, на рис.1.5 и 1.6, стр. 18) являются не отождествленными. Это снижает информативность анализа результатов. Почему в спектрах испускания воздуха при высоких температурах (см. рис. 3.18, стр.75) не наблюдается первая положительная система азота в диапазонах VIS/NIR (500 - 890 нм) и IR (890 - 1390 нм)?

3. Что автор подразумевает под термином равновесная спектральная яркость источника излучения, приведенным в подписи на рис.1.10 (стр.23). По-видимому, уместней определить условия, при которых получены спектры испускания: условия локального термодинамического равновесия состояния газа за фронтом ударной волной или условия, при которых устанавливается распределение энергии (подобно больцмановскому распределению с некоторой эффективной температурой) по отдельной внутренней степени свободы компоненты газовой смеси, и т.д.

4. При обсуждении результатов измерений спектров, приведенных на рис.3.1 (стр.56), автор отмечает, что фоновое излучение обусловлено тормозным и фото – рекомбинационным излучениями электронов. Следует принимать во внимание, что параметры фокусирующей оптики осветительной и размеры диспергирующей системы (дифракционной) решетки обычно выбираются так, чтобы сечение входного параллельного пучка не превышало рабочее сечение диспергирующей системы. Если сечение входного параллельного пучка превышает рабочее сечение диспергирующей системы, то фоновое излучение может также возникать в результате рассеяния входного пучка на внутренних элементах конструкции спектрального прибора. Контролировалось ли степень полноты заполнения исследуемым излучением дифракционной решетки при измерениях и калибровке спектральных приборов?

5. Хорошо известно, что не всю поверхность вольфрамовой ленты вторичного эталонного источника излучения можно использовать для калибровки спектральных приборов в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазоне. Данный элемент поверхности подобного источника выделяется с помощью специального указателя. Кроме того, важно, чтобы вектор нормали к поверхности вольфрамовой ленты ориентировался параллельно оптической оси осветительной системы спектроскопического оборудования. Учитывались ли данные требования при калибровке спектральных приборов?

6. Известно, что гиперзвуковые ударные трубы без отражения ударной волны не имеют достаточных времен испытаний в результате утечки газа из сильно сжатой области через пограничный слой. С точки зрения автора, излучение пограничного слоя может давать вклад в излучение из сильно сжатой области?

7. В тексте диссертации не оговорено, каким общим требованиям должна удовлетворять гиперзвуковая аэродинамическая установка для экспериментального моделирования входа летательных аппаратов в атмосферу планет Солнечной системы (Земли, Марса и Венеры)?

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. 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» (по физико-математическим наукам), 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 № 14 «Плазмохимия и физикохимия импульсных процессов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук» (ИНХС РАН)


Шахатов Вячеслав Анатольевич

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 647-59-27 (тональный режим + доб. номер 3-24), e-mail:

shakhatov@ips.ac.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.08 - «Физика плазмы»

Адрес места работы: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 29.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН).

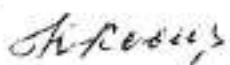
Тел.: +7 (495) 647-59-27 (тональный режим + доб. номер 3-24), e-mail:

shakhatov@ips.ac.ru

Подпись ведущего научного сотрудника Шахатова Вячеслава Анатольевича удостоверяю:

Ученый секретарь ИНХС РАН

д.х.н., доцент



Костина Юлия Вадимовна