

На правах рукописи

КРИКУНОВА Анастасия Игоревна

**КОЛЕБАНИЯ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ В
УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ**

Специальность 01.02.05 —
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, академик РАН
Сон Эдуард Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Маркович Дмитрий Маркович**,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,
директор

Черкасов Сергей Гелиевич,
доктор физико-математических наук,
Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Защита состоится 25 декабря 2017 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.110.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН [www.http://jiht.ru](http://jiht.ru)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.110.03.

Автореферат разослан « » ноября 2017 года.

Телефон для справок: +7 (495) 485-79-77.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.03,

д.т.н.

Директор Леонид Бенцианович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Несмотря на интенсивное развитие отрасли возобновляемой альтернативной энергетики, использование классических природных ресурсов (газ, нефть, уголь) остается основным источником энергии во всем мире. Использование компримированного природного газа, как дешевого экологичного альтернативного топлива, является глобальным трендом энергетики современного мира. Так, согласно данным международного агентства NGV Communications Group [1], мировой парк транспортных средств, работающих на метане, ежегодно возрастает на 25–30%, и по прогнозам к 2020 г. будет достигать 50 млн. единиц. В последнее время возникает тенденция к развитию водного и железнодорожного транспорта на метане. Для воздушного транспорта разрабатываются новые двигатели для самолетов и ракетополетов («СОЮЗ-7»). Тенденция развития чистой энергетики способствует все более широкому применению метана, поскольку он является одним из самых чистых среди органических топлив.

Процессы горения лежат в основе работы большого количества технических устройств и они достаточно подробно исследовались, однако, многие принципиальные проблемы горения все еще остаются необъясненными. Одним из нерешенных и важных вопросов является турбулентное горение. В настоящее время не существует единой модели турбулентности, которая могла бы применяться во всех случаях. В турбулентном горении задача усложняется, поскольку кроме корреляций пульсаций скоростей в рассмотрение требуется вводить корреляции пульсаций температур и концентраций веществ. Кроме того, горение является сложным многостадийным и многомасштабным процессом, который состоит из многочисленных разветвляющихся однозвенных и цепных реакций. Все эти факторы значительно усложняют описание процессов горения. Проблема построения теоретических моделей переходного и турбулентного режимов горения состоит во взаимодействии перемешивания, тепловой конвекции и развития различного типа неустойчивостей. Экспериментальные исследования являются основой построения моделей ламинарного и турбулентного горения. Для устранения одной из проблем — турбулентного перемешивания — следует использовать горение в предварительно перемешанной смеси окислителя и горючего. Еще одна проблема заключается в том, что в поле гравитации, например в земных условиях, при горении возникают конвективные потоки, которые усложняют описание горения. Для устранения этой проблемы наиболее ценными экспериментальными данными являются результаты измерений в условиях невесомости (микрогравитации). Из числа возможных методов изучения горения в условиях микрогравитации существуют три возможности — эксперименты в параболических полетах, в башнях или шахтах («Drop tower»), в которых экспериментальные установки падают в вакууме, и третья возможность — на МКС. Такие работы проводились в экспериментах в

основном по диффузионному горению, где анализировались результаты теории Я.Б.Зельдовича по горению применительно к условиям невесомости.

Несмотря на важность исследования горения в невесомости, в литературе отсутствует достаточное количество данных для полного понимания и предсказания поведения пламени в микрогравитации, современное состояние вопроса требует получения новой информации о характеристиках пламени в условиях, отличных от земных гравитационных [2]. Данная работа посвящена изучению комплексного влияния гравитационных сил и степени обогащенности топлива на характеристики пламени и использованию современных методик для исследования пламени в наземных условиях и при микрогравитации (эксперименты в «Drop tower»).

Целью данной работы является экспериментальное исследование горения, гидродинамики и неустойчивостей конического пламени перемешанного горючего и окислителя (метано-воздушной смеси) в лабораторных земных условиях и при микрогравитации, разработке лабораторных установок и специального оборудования для использования в «Drop tower», использованию современных методов, таких как термоанемометрия, лазерная визуализация траекторий примесных частиц в потоке (Particle Image Velocimetry — PIV), лазерно-индуцированная флуоресценция радикалов ОН (Planar Laser Induced Fluorescence — PLIF ОН), использование высокоскоростных камер (Photron). В основе работы лежит исследование характеристик метано-воздушного пламени предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя, таких как высота факела, скорость горения, растяжение фронта горения, структура фронта по флуоресценции радикалов ОН и поля скоростей, изучение мерцания пламени предварительно перемешанной смеси, выявление зависимости частоты мерцания от гравитационных сил и коэффициента избытка топлива. Измерения и сравнение характеристик проведены в условиях нормальной ($+1g$), «обратной» гравитации (направление распространения волны горения противоположно вектору ускорения свободного падения; $-1g$) и микрогравитации (μg). Обычное горение конического пламени в горелке типа Бунзена происходит в узком интервале концентрации горючего близкого к стехиометрической смеси, для существенного расширения параметров стабильного пламени и характеристик изотермического потока в работе были созданы экспериментальные вихреобразующие устройства, которые позволили расширить диапазон стабильного горения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. исследование характеристик изотермических затопленных струй, формирующихся в профилированном сопле:
 - определение осредненных и пульсационных скоростных характеристик потока методом термоанемометрии для различных степеней турбулентности;

- получение данных о полях скоростей затопленной струи методом PIV;
2. поиск оптимального метода стабилизации конического пламени в широком диапазоне вариаций коэффициента избытка топлива, скорости потока, минимально изменяющего геометрические характеристики факела:
 - численное моделирование процесса стабилизации пламени в программном комплексе «FlowVision»;
 - экспериментальное исследование методом PIV изотермического потока при различных параметрах лабораторных установок в наземных условиях;
 - экспериментальное определение областей стабильного пламени при различных методах стабилизации процесса горения;
 3. исследование характеристик пламени метано-воздушной смеси в условиях нормальной, «обратной» и пониженной гравитации с получением данных о
 - высоте факела и скорости горения;
 - растяжении пламени;
 - частоте пульсаций факела пламени;
 - свечении радикалов ОН методом лазерной индуцированной флуоресценции;
 - полях скоростей в факеле метано-воздушной смеси модифицированным методом Particle Tracking Velocimetry (PTV) в условиях микрогравитации;
 - частоте пульсаций пламени при вариации гравитационных сил, скорости потока и коэффициента избытка топлива смеси;
 - характеристиках поля скоростей, плотностей и температур;
 4. сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных.

Научная новизна:

1. создана лабораторная установка для измерения параметров ламинарного и переходного к турбулентному режиму горения;
2. создана экспериментальная установка для измерения параметров ламинарного и переходного к турбулентному режиму горения на стенде «Drop tower» Центра прикладных космических технологий и микрогравитации (ZARM);
3. впервые получены экспериментальные данные о ламинарном и переходном к турбулентному режиму горения в лабораторных условиях при нормальной гравитации и в условиях микрогравитации;
4. экспериментально выявлено, что изменение направления гравитации расширяет область стабильного пламени и сужает область проскока пламени;

5. получены результаты по влиянию гравитации на растяжение конического пламени;
6. определена скорость ламинарного горения метано-воздушных смесей в условиях нормальной, «обратной» гравитации и микрогравитации.
7. определены частоты пульсаций пламени в условиях нормальной и «обратной» гравитации для широкого спектра вариации скорости потока и коэффициента избытка топлива смеси;
8. предложен критерий оценки зависимости частоты мерцания пламени предварительно перемешанной смеси от гравитации и коэффициента избытка топлива;
9. получены поля скоростей за фронтом горения в условиях микрогравитации.

Практическая значимость работы определяется получением уникальных экспериментальных данных о характеристиках пламени предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя в условиях нормальной, «обратной» и микрогравитации в широком диапазоне скоростей потока и коэффициента избытка топлива. Полученные результаты по измеренным ламинарным скоростям горения в зависимости от гравитационных сил необходимы для разработки моделей горения и верификации численных реализаций моделей горения. Зависимость частоты мерцания факела от гравитации дает возможность учета наблюдаемых явлений по горению в условиях нормальной и микрогравитации. Показано, что численное моделирование на основе выбранных моделей согласуется с полученными экспериментально зависимостями частоты мерцания пламени от коэффициента избытка топлива горючей смеси. Практическая значимость также заключается в рекомендациях по расширению областей стабильного горения предварительно перемешанных смесей горючего и окислителя и разработке методики оценки полей скоростей реагирующих потоков в нестандартных условиях (в частности, на установке «Drop tower» в условиях ограниченного пространства). Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для прогноза поведения пламени при возникновении нештатных ситуаций (пожаров) в космосе (на МКС).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. экспериментальные данные о распределении скоростей, полученные методами PIV и термоанемометрии, в изотермических потоках и при горении в ламинарном и переходном к турбулентному режимам, в лабораторных условиях при нормальной гравитации, «обратной» гравитации и в условиях микрогравитации;
2. экспериментальные данные о расширении области стабильного пламени в зоне уноса и сужении в зоне проскока при изменении направления гравитации;
3. результаты измерений частот пульсаций и мерцания пламени в условиях нормальной и «обратной» гравитации для широкого спектра вариации скорости потока и коэффициента избытка топлива смеси;

4. критерий зависимости частоты мерцания пламени предварительно перемешанной смеси от гравитации и коэффициента избытка топлива;
5. результаты измерений полей скоростей за фронтом пламени в условиях микрогравитации;
6. экспериментальные данные, полученные методом PLIF, о распределении радикалов OH при горении метано-воздушного конического пламени в условиях микрогравитации;
7. экспериментальные данные о высоте факела метано-воздушного пламени и скорости ламинарного горения в условиях нормальной, «обратной» гравитации и микрогравитации;
8. экспериментальные данные о растяжении конического метано-воздушного пламени в зависимости от интенсивности воздействия сил плавучести, скорости подачи горючей смеси и коэффициента избытка топлива смеси.

Достоверность полученных результатов обеспечивается обоснованностью и верификацией методик измерения параметров потока термоанемометрическим методом, методами PIV и OH PLIF, использованием тестированных методик обеспечения микрогравитации на уровне $10^{-6}g_0$ в соответствии с «Руководством по эксплуатации ZARM «Drop tower», соответствием с результатами, полученными другими авторами, и публикациями в реферируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных (3) и российских (5) конференциях:

8th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications (Bremen 2013);

58-я и 59-я научные конференции МФТИ (Долгопрудный 2015, 2016);

Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (Москва 2015);

XXXI International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus 2016);

Одиннадцатая Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта 2016);

Seventh International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion and Atmospheric Phenomena (Сочи 2016);

XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus 2017);

и Видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГПУ – НИИМ МГУ от 16 июня 2015г.

Личный вклад. Автор принимал участие в постановке научных задач и разработке методик исследований; при его непосредственном участии и инициативе были созданы экспериментальные стенды, выполнена отладка методик диагностики, проведены исследования. Обработка, комплексный анализ и обоб-

шение полученных экспериментальных результатов выполнена автором самостоятельно. Автором проведена подготовка статей и докладов на конференциях и для публикации в научных журналах. Выводы и заключения, вошедшие в диссертацию, основываются на полученных в работе результатах.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 в сборниках тезисов докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава содержит обзор литературы и посвящена описанию влияния гравитационных сил на различные характеристики пламени предварительно перемешанной смеси. Также в главе затрагивается важная тема численного моделирования процессов горения, в частности, метано-воздушной смеси; представлен метод частичного локального химического равновесия.

Описана важность проведения исследований горения в условиях невесомости и учета влияния гравитационных сил при интерпретации экспериментальных данных. Показаны ограничения, которые накладываются на пламя в условиях нормальной земной гравитации: невозможность наблюдения некоторых типов пламени, существование максимального геометрического размера пламени при котором силы плавучести не будут играть роли (при атмосферном давлении $L \leq 100$ мкм). Отмечена целесообразность последовательного исследования ламинарного пламени, переходного (слаботурбулизованного), и далее, турбулентного. Также освещена история исследования процессов горения в условиях невесомости и достигнутые результаты. Подчеркивается недостаточное количество экспериментальных данных о характеристиках пламени в условиях невесомости и необходимость проведения дополнительных исследований.

Особое внимание уделяется механизмам развития неустойчивостей в пламени и влиянию гравитационных сил на эти неустойчивости. Так в пламени развивается три основных типа неустойчивости: гидродинамическая, конвективно-диффузионная и рэлей-тейлоровская. Они взаимодействуют друг с другом и проявляются по-разному, в зависимости от гравитационного воздействия. Важное явление, влияющее на различное поведение пламени в невесомости и в гравитационных условиях, является неустойчивость Кельвина-Гельмгольца на границе раздела между продуктами сгорания и окружающим воздухом. Конвективное продвижение вихрей вдоль фронта факела, в условиях нормальной земной гравитации, приводит к мерцанию пламени. В невесомости силы плавучести отсутствуют, поэтому нет конвективного движения вихрей, и пламя

остается неподвижным. Описано такое важное понятие, как растяжение фронта пламени, показано влияние растяжения на скорость ламинарного горения и роль гравитационных сил на это явление. Затрагивается тема пределов воспламенения горючих смесей в условиях невесомости, поскольку эта тема является важной с точки зрения практического применения — предсказание нештатных ситуаций (пожаров) в космосе. Также в главе подробно описан метод частично-локального химического равновесия и его целесообразность применения при описании процессов горения. Показана возможность использования редуцированных кинетических схем без потери в точности расчетов. Приведен пример полной системы реакций горения метана на основе механизма GRI-Mech 3.0 и редуцированная схема Ло [3].

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок и методов исследования, используемых при выполнении работы. Экспериментальные исследования характеристик изотермических потоков и пламени предварительно перемешанной метано-воздушной смеси проводились в условиях микрогравитации, при нормальной земной гравитации, и в случае «обратной» гравитации, когда вектор скорости распространения волны горения направлен противоположно ускорению свободного падения. В условиях пониженной гравитации исследования проводились на базе уникального экспериментального комплекса «Drop tower» в центре прикладных космических технологий и микрогравитации. Экспериментальная установка помещалась в цилиндрическую капсулу диаметром 1 м, высотой 3 м. Оба типа течений (изотермические и реагирующие) формировались при помощи конического сопла с выходным диаметром 15 мм. Коэффициент поджата сопла подбирался таким образом, чтобы профиль сопла был близким к профилю Витошинского. Это обеспечивало прямоугольный профиль скоростей на выходе. Значения чисел Рейнольдса на основе объемного расхода и выходного диаметра сопла варьировались от 500 до 4000, т. е. исследовался поток, как ламинарный, так и слаботурбулизированный. Коэффициент избытка топлива смеси ϕ рассчитывался как отношение мольной доли топлива в эксперименте к мольной доле для стехиометрического состава смеси. Эксперименты проводились для бедных, стехиометрических и богатых метано-воздушных смесей: ϕ варьировалось от 0,8 до 1,3. Исходя из заданных геометрических размеров капсулы, не было возможности иметь камеру смешения достаточных размеров для обеспечения однородности горючей смеси, поэтому перед входом в сопло помещался блок со стеклянными шариками среднего диаметра 2-4 мм, ограниченный сетками, что обеспечивало гомогенизованность смеси. Характеристики изотермической затопленной струи исследовались методом термоанемометрии и PIV. Пламя в условиях нормальной и «обратной» гравитации исследовалось методом высокоскоростной съемки хемиллюминесценции пламени, PIV и OH PLIF. В условиях микрогравитации применялись методы высокоскоростной съемки хемиллюминесценции, OH PLIF и модифицированный метод PTV.

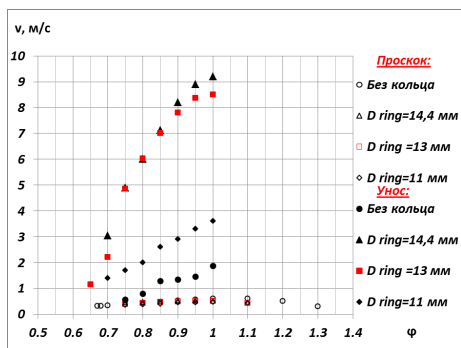


Рис. 1 — Границы проскока и уноса пламени

В **третьей главе** представлены результаты исследований по подбору оптимального метода стабилизации конического пламени с широким диапазоном вариации параметров (скорости потока и коэффициента избытка топлива). Подбран метод, который не влияет на температурные и скоростные характеристики потока, не вносит изменений в состав продуктов сгорания и не изменяет форму пламени в отличие от внешней закрутки потока, использования стабилизирующих тел, таких как проволока, цилиндр, диск, использования пилотного пламени или плазменной стабилизации. В данной работе для расширения области стабильного пламени по скоростям и коэффициентам избытка топлива, использовалось стабилизирующее вихреобразующее тело — кольцо. Подбор геометрических параметров кольца осуществлялся при помощи численного моделирования на основе программного пакета «FlowVision». Получены скорости изотермических и реагирующих потоков на выходе из суживающегося конического сопла. Варьировались такие параметры кольца, как внешний диаметр и толщина, внутренний выходной диаметр оставался постоянным — 10 мм. Также варьировалась твердость сеток, помещаемых перед входом в сопло. Эмпирически оценивались границы проскока и уноса пламени при вариации этих параметров. Результаты представлены на рисунке 1. Для оценки критерия выбора кольца при помощи методов PIV и термоанемометрии были получены профили скоростей и турбулентных пульсаций потока у выходного сечения сопла. Показано, что расширение области горения пламени наиболее оптимально в случае, когда скорость в зазоре между кольцом и стенкой сопла составляет 40-80% от скорости в ядре потока. Показано, что наилучшим способом в данном сопле пламя стабилизируется кольцом с внешним диаметром 13 мм, высотой 2 мм (на этапе численного моделирования показано, что высота не играет значимой роли, поэтому она была выбрана исходя из соображений удобства изготовления стабилизирующего тела).

В **четвертой главе** приведены результаты измерений характеристик пламени в условиях микрогравитации, нормальной и «обратной» гравитации. При помощи высокоскоростной съемки хемилюминесценции пламени получены

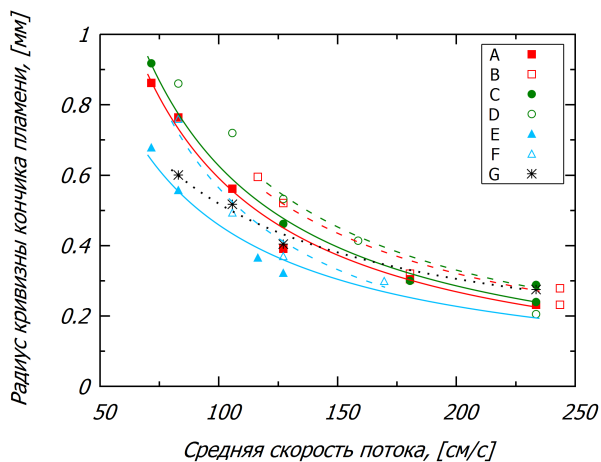


Рис. 2 — Зависимость радиуса кривизны вершины пламени от скорости потока: А — $\phi = 1,0, +1g$; В — $\phi = 1,0, -1g$; С — $\phi = 1,3, +1g$; D — $\phi = 1,3, -1g$; E — $\phi = 0,8, +1g$; F — $\phi = 0,8, -1g$; G — $\phi = 1,0, \mu g$

изображения фронта и его динамика во времени. Обработка изображений позволила получить данные о растяжении фронта. Растяжение определялось через кривизну вершины пламени. Показано, что гравитационные силы влияют на кривизну, а значит и растяжение. Графики зависимости радиуса кривизны вершины пламени от скорости потока представлены на рисунке 2.

В условиях нормальной и «обратной» гравитации зависимости кривизны от скорости потока подобны — с ростом скорости кривизна уменьшается. Тогда как при микрогравитации график радиуса кривизны пересекает аналогичные графики во всех остальных случаях. Это показывает, что при малых скоростях потока значение радиуса кривизны в условиях невесомости ниже, чем при нормальной и «обратной» гравитации, а при скоростях больше 2 м/с, наоборот — выше. В случае горения предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя растяжение изменяет скорость ламинарного горения, а также влияет на стабилизацию и устойчивость фронта пламени. В работе показано, что область стабильного горения (границы проскока и уноса) расширяется при изменении направления распространения волны горения относительно вектора ускорения свободного падения. В условиях «обратной» гравитации в смеси при фиксированном коэффициенте избытка топлива, как унос, так и проскок пламени происходит при больших скоростях, чем при нормальной земной гравитации. Результаты продемонстрированы на рисунке 3. Они свидетельствуют о различной скорости ламинарного горения в зависимости от гравитационных условий. Также проведены измерения ламинарной скорости горения метано-воздушной смеси в условиях микрогравитации, нормальной и «обратной» гравитации при исследовании конического открытого пламени (результаты представлены на ри-

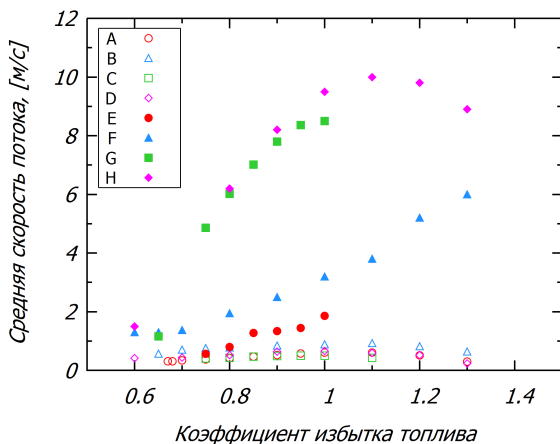


Рис. 3 — Границы проскока (закрашенные значки) и уноса (выколотые значки) конического метано-воздушного пламени: А, Е — случай $+1g$, без кольца; В, F — случай $-1g$, без кольца; С, G — случай $+1g$, с кольцом $D_{\text{ring}} = 13,0$ мм; D, H — случай $-1g$, $D_{\text{ring}} = 13,0$ мм

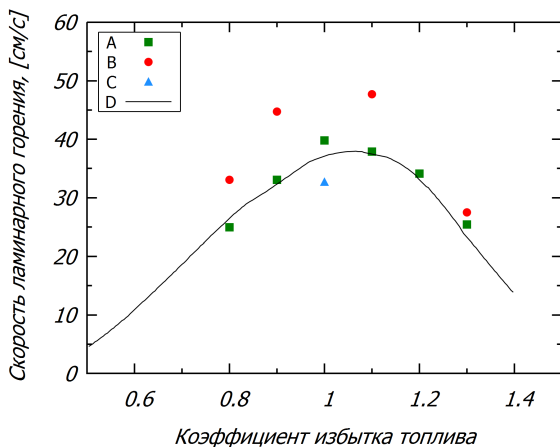


Рис. 4 — Скорости ламинарного горения: А — случай $+1g$, В — случай $-1g$, С — μg , D — расчет в условиях $+1g$ [4] по схеме GRI-Mech 3.0 [5] с использованием кода CHEMKIN-PREMIX [6]

сунке 4). Показано, что в невесомости скорость минимальна, при нормальной земной гравитации скорость повышается, а в условиях «обратной» гравитации еще больше возрастает.

Использование скоростной видеосъемки и метода ОН PLIF позволили оценить динамику фронта пламени во времени. Данные представлены на рисунке 5. Показано пламя с гармонически колеблющейся вершиной в условиях нормальной земной гравитации и пламя без таких колебаний при горении в условиях микрогравитации. С ростом скорости потока возникают высокочастотные колебания вершины пламени, причиной которых являются турбулентные пульсации в потоке (переходный турбулентный режим). Низкочастотные колебания вызывают мерцание пламени, которое объясняется конвективным продвижением вихрей Кельвина–Гельмгольца, формирующихся на границе раздела между движущимися горячими продуктами сгорания и покоящимся холодным окружающим воздухом. Динамика вихря проиллюстрирована полями скоростей, полученных в результате численного моделирования с использованием программного пакета «FlowVision» 3.09.05, рисунок 6.

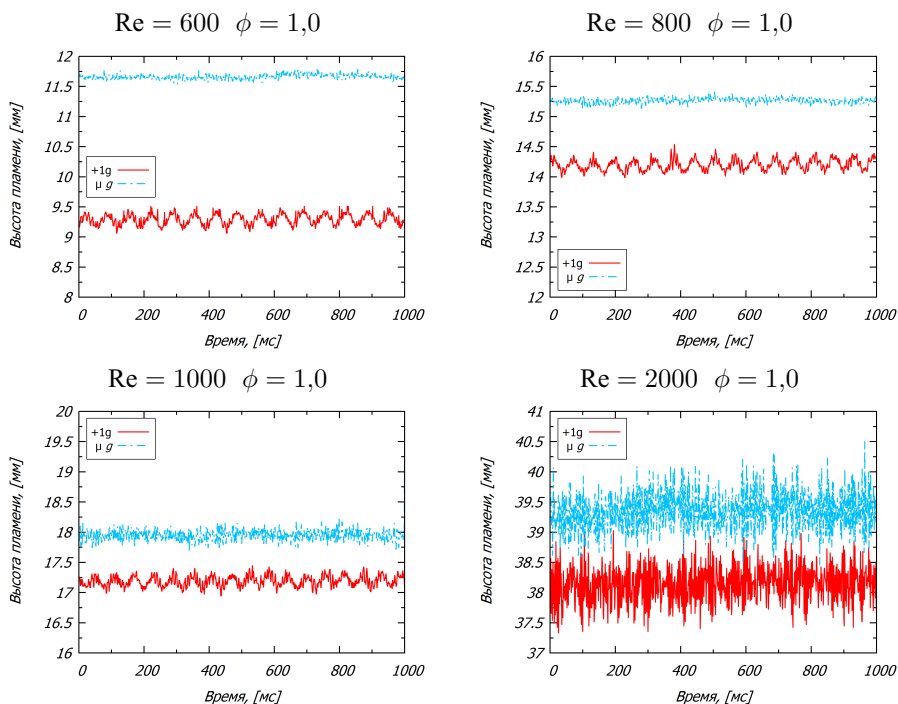


Рис. 5 — Изменение высоты пламени во времени

В работе была измерена частота мерцания пламени. Выведены зависимости частоты от коэффициента избытка топлива (ϕ) и ускорения свободного падения (g):

$$\nu \sim [a_a \phi^3 + b_b \phi^2 + c_c \phi + d_d]^{-1/2},$$

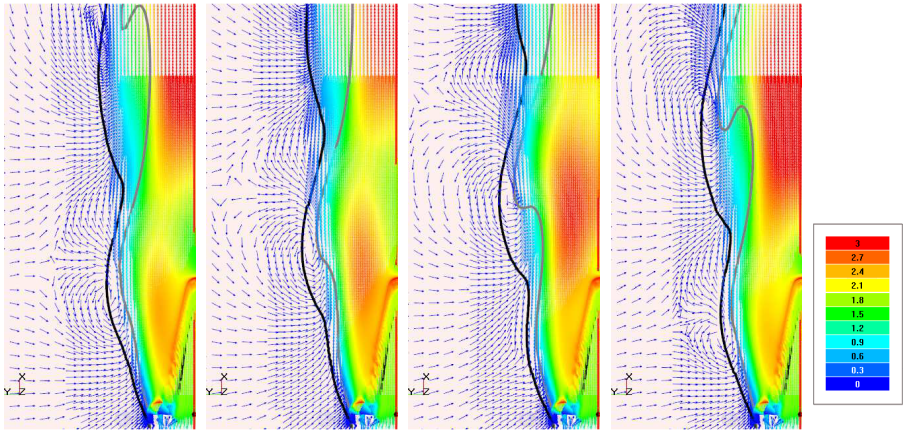
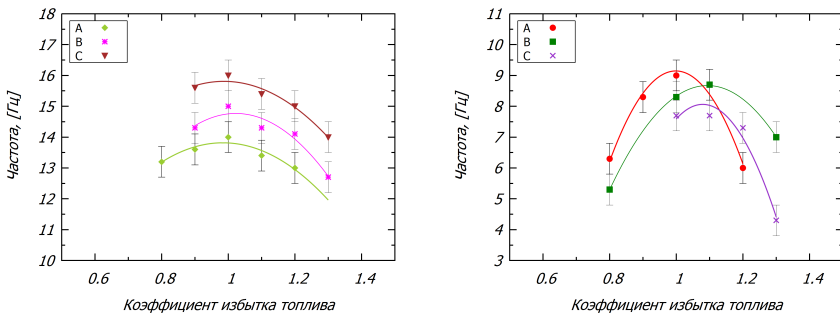


Рис. 6 — Положение вихря в фазах I, II, III и IV на рассчитанных полях скоростей при уровне гравитации $+1g$, $Re = 1000$, $\phi = 1,0$

$$\nu \sim u^{1/3} \frac{\eta^{1/3}}{\rho} g^{1/2} d^{-1/6},$$

коэффициенты a_a , b_b , c_c и d_d зависят от числа Re потока. Зависимости подтверждаются экспериментальными данными и расчетными результатами. На рисунке 7 представлены графики зависимости частоты пульсаций от коэффициента избытка топлива для условий нормальной и «обратной» гравитации.

Также в работе показана возможность оценки поля скорости реагирующего потока за фронтом пламени в условиях ограниченного пространства в капсуле в падающей башне, без использования лазера (рисунок 8).



а) Условия нормальной гравитации б) Условия «обратной» гравитации

Рис. 7 — Зависимость частоты пульсаций от коэффициента избытка топлива для условий $+1g$: $Re = 750$ (A); 1000 (B); 1250 (C)

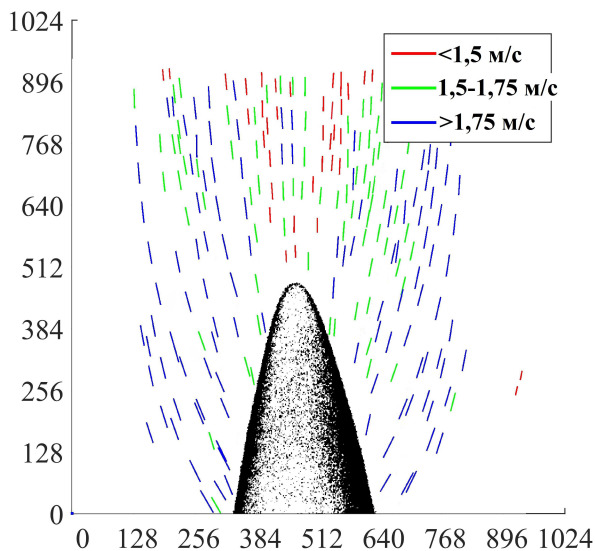


Рис. 8 — Поле скоростей в условиях микрогравитации. $Re = 1000$ $\phi = 1,0$

В **заключении** приведены основные выводы по результатам работы:

1. в условиях микрогравитации факел пламени имеет наибольшую высоту, и с ростом скорости потока его значение приближается к значению в условиях земной гравитации, тогда как в «обратной» гравитации факел в среднем ниже, чем в земных условиях, и с ростом скорости потока разница возрастает;
2. получены данные о скорости ламинарного горения метано-воздушного пламени в условиях микрогравитации, которые могут быть использованы для верификации моделей;
3. получены данные о мерцании факела пламени в зависимости от воздействия внешнего гравитационного поля — в невесомости факел симметричен относительно оси сопла, не подвержен низкочастотным осцилляциям, а с ростом скорости потока ($Re > 1000$) возникают высокочастотные колебания, частота которых схожа с частотой пульсаций пламени в условиях земной гравитации, однако несколько больше; в «обратной» гравитации пламя колеблется с более низкой частотой (6–12 Гц) по сравнению с обычными земными условиями (14–25 Гц);
4. получена оценочно и подтверждена экспериментальными данными зависимость частоты мерцания метано-воздушного пламени от коэффициента избытка топлива; также оценена зависимость частоты мерцания факела от ускорения свободного падения, данные подтвержда-

ются результатами расчетов с использованием программного пакета «FlowVision»;

5. получены уникальные фотографии флуоресценции радикалов ОН в метано-воздушном пламени в условиях микрогравитации.

Литература

1. NGV Communications Group Natural Gas & Other Clean Fuels — 2017 — <http://www.ngvjournals.com/>.
2. Sharp, Lauren M and Dietrich, Daniel L and Motil, Brian J Microgravity fluids and combustion research at NASA Glenn Research Center // *Journal of Aerospace Engineering*. — 2013. — Vol. 26, no. 2. — Pp. 439–450.
3. Lu, Tianfeng and Law, Chung K A criterion based on computational singular perturbation for the identification of quasi steady state species: A reduced mechanism for methane oxidation with NO chemistry // *Combustion and Flame*. — 2008. — Vol. 154, no. 4. — Pp. 761–774.
4. Chen, Z. On the accuracy of laminar flame speeds measured from outwardly propagating spherical flames: methane/air at normal temperature and pressure // *Combustion and Flame*. — 2015. — Vol. 162, no. 6. — Pp. 2442–2453.
5. Smith, G P, and Golden, D M, and Frenklach, M, and et al. — 2017 — <http://www.me.berkeley.edu/grimech/>.
6. Kee, R J and Grcar, J F and Smooke, M D and Miller, J A Report SAND85-8240 // Sandia National Laboratories. — 1985.

Публикации автора по теме диссертации

1. Son E.E. Krikunova A.I. & Saveliev A.S. Premixed Combustion Study: Turbulence in the Nozzle Behind Grids and Spheres // *High Temperature*. — 2016. — Vol. 54, no. 3. — Pp. 403–408 doi:10.1134/S0018151X16030202.
2. Krikunova A.I., Son E.E. Effect of gravity on premixed methane-air flames // *High Temperature*. — 2018 doi:10.1134/S0018151X18010236.
3. Кринунова А.И., Сон Э.Е. Влияние гравитационных сил на процессы горения // *Прикладная физика*. — 2017. — № 3. — С. 21–25.
4. Krikunova A.I. Son E.E. & Saveliev A.S. Premixed conical flame stabilization // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 774, no. 1. — Pp. 012087 doi:10.1088/1742-6596/774/1/012087.

5. *Krikunova A.I. Son E.E.* Experimental study and stereovisualisation of turbulent methane jet flame under microgravity conditions // 8th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications, September 16–19, 2013, Bremen, Germany. Book of abstracts. P. 62.
6. *Krikunova A.I. Klinkov K.V. Son E.E. Eigenbrod C.* Experimental study of methane-air flame // 7th International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion and Atmospheric Phenomena, October 2–7, 2016, Sochi, Russia. Book of abstracts. Tom 2. P. 111.
7. *Krikunova A.I. Saveliev A.S. Son E.E.* Methane-air conical flame: Experimental and numerical investigation // XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, March 1–6, 2017, Elbrus, Russia. Book of abstracts. P. 201.
8. *Krikunova A.I. Son E.E.* Theory and experiments of premixed turbulent combustion // XXXI International Conference on Equations of State for Matter, March 1–6, 2016, Elbrus, Russia. Book of abstracts. P. 194.
9. *Крикунова А.И. Клинков К.В. Сон Э.Е. Eigenbrod С.* Экспериментальное исследование предварительно перемешанных пламен в условиях микрогравитации // Материалы 58-й научной конференции МФТИ. 23–28 ноября 2015 г. Долгопрудный, Россия. <http://conf58.mipt.ru/ru/info/main/>.
10. *Крикунова А.И. Клинков К.В. Сон Э.Е. Eigenbrod С.* Горение метановоздушных пламен в условиях пониженной гравитации // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». 15–17 декабря 2015 г. Москва, Россия, С. 441.
11. *Крикунова А.И. Сон Э.Е.* Теоретическое и экспериментальное исследование горения предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя // Материалы международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. 25–31 мая 2016 г. Алушта, Россия, С. 38.
12. *Крикунова А.И. Савельев А.С.* Исследование характеристик конечного слаботурбулизированного пламени // Материалы 59-й научной конференции МФТИ . 21–26 ноября 2016 г. Долгопрудный, Россия. <http://conf59.mipt.ru/ru/info/main/>.

КРИКУНОВА Анастасия Игоревна

КОЛЕБАНИЯ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Автореферат

[1/textwidth] Подписано в печать		Формат 60×84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно
