

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора —  
директор исследовательского центра  
«Аэрокосмические двигатели и  
химмотология»  
Федерального государственного  
унитарного предприятия  
«Центральный институт авиационного  
моторостроения имени П.И. Баранова»,  
кандидат технических наук



А.Н. Прохоров

«    »

2017 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Крикуновой Анастасии Игоревны  
«КОЛЕБАНИЯ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО  
ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ»

Представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация посвящена исследованиям влияния гравитационных сил на характеристики пламени предварительно перемешанной смеси.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 147 страниц, включая 66 рисунков и 3 таблицы, список цитируемых источников содержит 165 работ.

Во введении формулируются основные цели и задачи диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость. Во введении также представлен список научных конференций и семинаров на которых докладывались и



обсуждались основные результаты, представляемые в работе, отмечен личный вклад автора.

**В первой главе** представлен обзор работ, посвященных исследованию пламени в условиях пониженной гравитации и основных характеристик пламени на которые гравитационные силы имеют наибольшее влияние, а также освещена методика использования метода локального химического равновесия для использования упрощенных схем химических реакций, в частности горения метана в воздухе.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальных стендов и методов диагностики пламен, использованных в работе. Экспериментальные исследования проводились в условиях нормальной земной гравитации, при изменении ориентации горелки относительно направления вектора гравитации («обратная» гравитация), а также в условиях пониженной гравитации (микрогравитации). В работе использованы современные методы диагностики реагирующих потоков, такие как термоанемометрия, скоростная видеосъемка естественного свечения пламени (хемилюминесценции), Particle Image Velocimetry, модифицированный метод Particle Tracking Velocimetry, и индуцированная лазерная флуоресценция радикалов ОН.

**В третьей главе** описывается методика стабилизации пламени в широком диапазоне вариаций скорости потока и коэффициента избытка топлива смеси. Выбраны геометрические параметры стабилизирующего тела для рассматриваемой горелки на основе экспериментальных исследований границ проскока и уноса пламени. Выполнена оценка влияния профиля скорости на выходе из сопла и определена роль спутного потока (поток между внешней стенкой стабилизирующего тела и внутренней стенкой сопла) на формирование возвратного вихревого потока, способствующего расширению условий стабильного горения. При помощи численного моделирования на программном пакете FlowVision показано незначительное влияние высоты кольца на эффективность стабилизации.



**В четвертой главе** представлены основные результаты экспериментальных измерений характеристик пламени, численных расчетов и их сравнение. Показано влияние гравитационных сил на процессы горения на основе измерения таких свойств пламени, как границы проскока и уноса пламени, кривизна фронта пламени, высота факела, скорость распространения фронта горения, пульсации пламени. Показано, что при переориентации горелки в пространстве происходит сдвиг пределов проскока и уноса пламени в сторону больших скоростей по сравнению с положением горелки, когда скорость сонаправлена с вектором сил тяжести. Также в работе экспериментально обнаружены зависимости радиуса кривизны вершины пламени и высоты пламени от направления и величины вектора гравитации, что показывает влияние гравитационных сил на скорость распространения фронта горения. Измерены значения скорости горения метано-воздушной смеси в условиях микрогравитации, нормальной и «обратной» гравитации. На основе численного моделирования продемонстрирован механизм такого явления, как мерцание пламени. Эмпирически и на основе численных расчетов получены частоты мерцания факела в зависимости от скорости подачи и коэффициента избытка топлива горючей смеси. Автором предложена аналитическая зависимость частоты мерцания пламени от коэффициента избытка топлива смеси, которая подтверждается полученными экспериментальными данными. Также показан метод оценки поля скорости в реагирующем потоке за фронтом пламени в условиях ограниченного пространства.

#### **Актуальность темы диссертации.**

Большое количество современных работ посвящено решению вопроса о моделировании реагирующих турбулентных потоков, однако он все еще остается открытым. Создаваемые расчетные модели требуют верификации, следовательно, получение экспериментальных данных современными диагностическими методами является важной и актуальной на сегодняшний день задачей. Получение закономерностей горения в условиях



микрогравитации и «обратной» гравитации является важным для многих энергосиловых установок наземного и космического применения.

**Научная новизна работы** определяется следующими полученными результатами:

1. Экспериментальные данные о пределах проскока и уноса пламени и их изменении при переориентации горелочного устройства относительно направления вектора гравитации.

2. Экспериментальные данные о скорости распространения фронта горения в метано-воздушной смеси в условиях нормальной, «обратной» и микрогравитации.

3. Зависимость частоты мерцания фронта пламени от коэффициента избытка топлива смеси.

#### **Достоверность результатов работы.**

Экспериментальные данные получены с использованием современных диагностических методов. В работе проведены сравнения измерения некоторых величин при помощи разных методик, показано совпадение результатов (измерения осредненной скорости изотермического потока на выходе из сопла методами термоанемометрии и Particle Image Velocimetry). Также в работе приведено сравнение некоторых данных с данными, полученными другими авторами, так, например, показано, что частоты мерцания факела при разбавлении горючей смеси горючем от бедной до стехиометрической возрастают, а от стехиометрической до богатой наоборот — падают. Количественные данные имеют различия, поскольку частота также зависит и от геометрических параметров потока. На основании того, что характеристики пламени получены при помощи известных широкоприменяемых методов и не противоречат основным физическим закономерностям достоверность результатов не подвергается сомнению.



### **Практическая значимость работы.**

Настоящая работа посвящена исследованию характеристик метано-воздушного пламени в условиях пониженной гравитации. Полученные данные могут быть использованы, во-первых, для верификации моделей на основе упрощенной задачи (предварительно смешанное топливо и окислитель и отсутствие внешних гравитационных сил значительно упрощают систему уравнений описывающих реагирующие потоки), а, во-вторых, для проверки корректности учета в моделях роли гравитационных сил на процессы горения. Предложенные в работе зависимости мерцания факела от различных внешних факторов также могут учитываться при проектировании горелочных устройств различного типа. Результаты исследований могут представлять интерес для анализа рабочего процесса в реактивных двигателях, определению возможности инициирования и срыва рабочего процесса в наземных и космических условиях. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в “ЦИАМ”, ОИВТ РАН, МФТИ.

### **Замечания и пожелания.**

1. В диссертации следовало бы более детально раскрыть роль и место диссертационной работы среди большого числа ранее проведенных исследований. Требуется сделать акцент на поставленных в диссертационном исследовании цели и задачах работы, а также научной новизне, которая, безусловно, присутствует в рассматриваемом материале.

2. Представленные в диссертации экспериментальные данные следовало бы более детально проанализировать с точки зрения фундаментальных процессов, сопровождающих горение метана в условиях «нормальной» гравитации и микрогравитации. Целесообразным является больше внимания уделить аналитическим и эмпирическим закономерностям, которые представляют практическую значимость работы, а, в частности: условиям срыва пламени и зависимости частоты пульсаций от режима течения и горения. По полученным экспериментальным данным представляется возможным установить зависимости и ввести безразмерные



критерии для определения эффективности стабилизирующих колец, что важно для практического применения результатов. Для дальнейших исследований требуется провести детальный спектральный анализ пульсаций фронта пламени при различных режимах, а также оценить степень влияния естественной конвекции и сдвиговых напряжений при вихреобразовании в периферийной области факела.

3. В диссертации мало внимания уделено технологическим схемам лабораторных установок и метрологическим особенностям измерений параметров в экспериментах, что является важным для подтверждения достоверности полученных данных. Вследствие этого, по ряду параметров на диаграммах отсутствуют доверительные интервалы экспериментальных данных.

4. В расчетной части работы представлены упрощенные кинетические модели для расчета горения в воздушном потоке (на основе брутто-реакции), которые не позволяют с высокой точностью определить скорость распространения фронта пламени. Кроме того, представленные автором результаты моделирования вихреобразования в затопленной струе на выходе из сопловой части лабораторной установки выполнены без учета теплоподвода при горении, что может являться причиной некоторого расхождения расчетных и экспериментальных данных по частотам пульсаций факела.

5. В тексте диссертации и автореферате допущены терминологические неточности, которые могут быть легко устранены в дальнейшей работе.

**Апробация работы.** Результаты работы подробно и полно докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, научных семинарах.



**Публикации.** Результаты работ представлены в 4 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК. Публикации в достаточной мере отражают результаты.

**Личный вклад автора** правильно и полно отражается в тексте диссертации и автореферата.

Диссертационная работа была заслушана на НТС отдела аэрокосмических двигателей ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», протокол № 13 от 29.11.2017 г.

Диссертация «Колебания и неустойчивости горения предварительно перемешанной смеси в условиях микрогравитации» представляет собой законченный научный труд, который соответствует всем критериям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 г., а его автор Крикунова Анастасия Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заместитель начальника отдела  
аэрокосмических двигателей  
по научному направлению,  
кандидат технических наук



Александров В.Ю.

Государственный научный центр  
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»), 111116 г. Москва ул. Авиамоторная, д. 2, 8(495)763-57 47, avim@ciam.ru