

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 303.732.4

## Исследования процессов горения на стенде международной космической станции

С.Б. Пичугин

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»

## Study of combustion processes using a bench on board the International Space Station

S.B. Pichugin

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia"

Рассмотрен стенд, применяемый на борту Международной космической станции для исследования процессов горения, особенности его конструкции и результаты проведенных на нем экспериментов и целевых работ, связанных с изучением процессов горения в условиях невесомости и микрогравитации. Приведены результаты исследований, в которых изучалось горение жидких, газообразных и твердых топлив, принимали участие космонавты Роскосмоса и российские научно-исследовательские учреждения. Показаны возможности стенда в обеспечении автоматического процесса проведения исследований с контролем состава, давления и других параметров атмосферы в экспериментальной камере, а также возможности измерительной и регистрирующей аппаратуры. Определены достоинства и недостатки, выявленные в ходе эксплуатации стенда на борту станции. Намечены пути по совершенствованию технической базы исследований. Отмечены усилия российских ученых и экипажа по обеспечению исследований в рамках совместной российско-американской научной программы.

**EDN:** KCPNBR, <https://elibrary/kcpnbr>

**Ключевые слова:** горение жидкостей и газов, процессы горения, исследовательский стенд, международная космическая станция

The paper considers a bench on board the International Space Station in studying combustion processes, its design features, and results of experiments and target work conducted on it and related to analyzing combustion processes in zero gravity and microgravity. It presents results of a research, where liquid, gaseous, and solid fuels combustion was studied. Roscosmos cosmonauts and Russian research institutions participated in the research. The paper shows capabilities of the bench in providing the automated research process maintaining control over the atmosphere composition, pressure and other parameters in the experimental chamber, as well as those of the measurement and registration equipment. Advantages and disadvantages revealed during the bench operation on board the Station are identified. Ways to improve the research technical base are outlined. The paper notes efforts

of the Russian crew and Russian scientists in ensuring research within the framework of the joint Russian-American scientific program.

EDN: KCPNBR, <https://elibrary/kcpnbr>

**Keywords:** liquids and gases combustion, combustion processes, research bench, International Space Station

С 2017 по 2024 г. в рамках российско-американской программы совместных исследований проводятся эксперименты и целевые работы (ЦР), посвященные изучению процессов горения в условиях невесомости и микрогравитации [1–4].

Цель работы — обобщить результаты проведенных экспериментов и ЦР, наметить направление дальнейших исследований.

Экспериментальным стендом для проведения исследований служит многофункциональная стойка CIR (Combustion Integrated Rack), модульное построение которой позволяет оперативно перенастраивать ее для работы с жидкостями, газами или твердыми веществами. Внешний вид многофункциональной стойки CIR приведен на рис. 1.

Главным достоинством стойки CIR является возможность замены практически любой составной части при перенастройке на очередную серию экспериментов, соответствующую агре-

гатному состоянию горючего вещества. Можно заменить экспериментальную камеру и горелку в ней, баллон одной емкости — на баллон другой емкости, баллон с жидкостью — на баллон с газом, расходомер для жидкости — на расходомер для газа и т. д., включая систему электронного управления. Это позволяет существенно облегчить работу экипажа и повысить безопасность выполняемых работ.

**Подготовка и методы исследований процессов горения на борту Международной космической станции (МКС).** В подготовке и проведении экспериментов с российской стороны участвовали АО «ЦНИИМаш» как постановщик ЦР. Участниками ЦР являлись ПАО «РКК «Энергия им. С.П. Королёва», ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», ФГБУН ФИЦ ХФ РАН им. Н.Н. Семенова, ФГБУН ФИАН им. П.Н. Лебедева, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» и ФГБУН Институт химической кинетики и горения СО РАН им. В.В. Воеводского.

Главной особенностью исследования процессов горения на борту МКС является их проведение в условиях невесомости, неограниченной по времени, в отличие от земных условий, где невесомость может быть только кратковременной. Даже при том, что невесомость нарушается кратковременными ускорениями, связанными с работой двигателей коррекции, перемещениями экипажа по МКС и др., изучение процессов горения в этих условиях представляет собой огромную исследовательскую ценность.

С этим связан устойчивый интерес ученых разных стран к организации соответствующих экспериментов. Сведения об экспериментах в рамках программы совместных российско-американских исследований по изучению процессов горения в условиях невесомости и микрогравитации приведены в табл. 1.

Для проведения указанных экспериментов в стойке CIR использовали три поколения экспериментальных модулей, представляющих собой исследовательские камеры, предназначенные

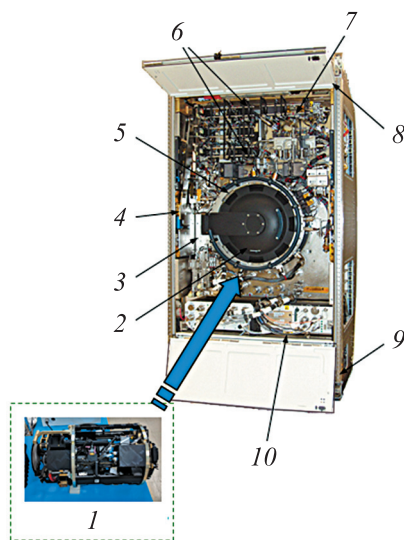


Рис. 1. Внешний вид многофункциональной стойки CIR для экспериментов, связанных с изучением процессов горения:

- 1 — сменная исследовательская камера; 2 и 3 — защитная дверь и ее кронштейн; 4 — блок датчиков микроускорений и осей положения стойки; 5 — стенка лабораторной шахты; 6 — панель подачи компонентов топлива; 7 — панель регулирования параметров в исследовательской камере; 8 — верхняя створка стоечной двери; 9 — виброизоляционная платформа пассивного типа; 10 — блок управления

Таблица 1

**Сведения об экспериментах в рамках программы совместных российско-американских исследований по изучению процессов горения в условиях невесомости и микрогравитации**

Группа экспериментов	Характеристики эксперимента		
	Наименование	Цель	Горючее
Горение жидкостей	Зарево	Изучение горения капель углеводородов в условиях микрогравитации	Н-додекан ( $C_{12}H_{26}$ )
Горение газов	Диффузионное пламя	Изучение ламинарного диффузионного пламени в спутном потоке горючего и окислителя	Метан ( $CH_4$ ), этилен ( $C_2H_4$ )
Горение газов	Электрическое пламя	Изучение влияния электрических полей на диффузионное пламя	Метан, этилен, ацетилен ( $C_2H_2$ )
Горение газов	Сферическое пламя	Исследование сферически симметричного диффузионного пламени	Водород ( $H_2$ ), метан, этилен
Горение газов	Фламенко	Исследование горючести конденсированных пожароопасных материалов в условиях микрогравитации	Метан, этилен
Горение газов	Адамант	Исследование сферических диффузионного пламени при подаче горючего в атмосферу окислителя и наоборот	Метан, этилен, ацетилен
Горение твердых веществ	Джел	Изучение горения твердых горючих материалов	Шар из полиметилметакрилата ( $C_5O_2H_8$ ) <sub>n</sub>

для горения топлив в различных агрегатных состояниях вещества: жидком, газообразном и твердом.

Внешний вид и конструктивные элементы исследовательских камер приведены в табл. 2, где введены следующие обозначения: 1 — электрические разъемы; 2 — упор; 3 — топливные емкости; 4 — пластины кожуха; 5 — запирающий механизм; 6 — разъемы системы охлаждения; 7 и 8 — трубки подачи капельно-жидкого топлива и поворотные устройства для их разведения; 9 — расходомеры; 10 — термopара; 11 — фотоумножитель; 12 — аналоговая цветная камера; 13 — линейный радиометр; 14 — сеточный электрод; 15 — запальник; 16 — горелка; 17 — газоподающая горелка; 18, 19 и 20 — сферическая, ламинарная и дисковая горелка соответственно; 21 — воздуховоды; 22 — механизм подачи образца; 23 — воздушная решетка; 24 — экспериментальный стол; 25 — образец горючего; 26 — запальник.

Для проведения измерений в экспериментах с распространением фронта пламени исследователи применяли оригинальный метод тонковолоконной пирометрии, когда температуру внутри границ распространяющегося фронта пламе-

ни определяют по свечению карбидокремниевых нитей, натянутых, как струны музыкального инструмента на специальную рамку (рис. 2).

Рамка, показанная на рис. 2 и примененная в экспериментах S-FLAME и «Адамант», позволяла оценивать пределы распространения фронта пламени и температуру в сечениях огненной сферы, характерной для пламени, формирующегося в условиях невесомости вокруг определенного центра, например, сферической горелки.

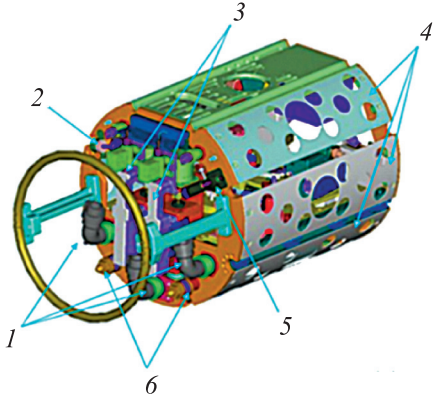
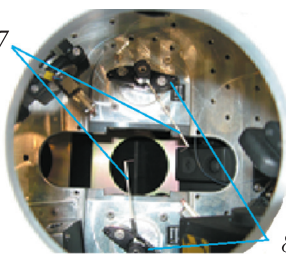
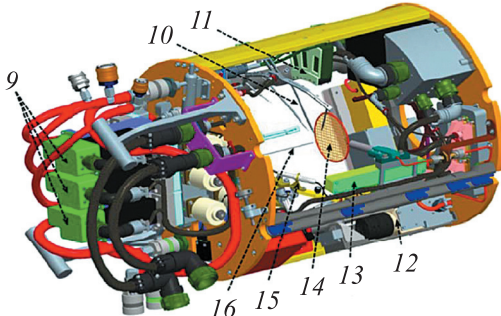
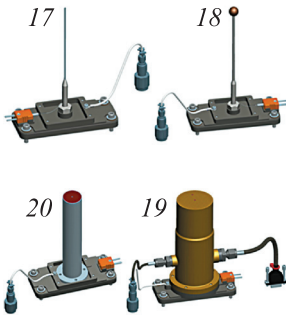
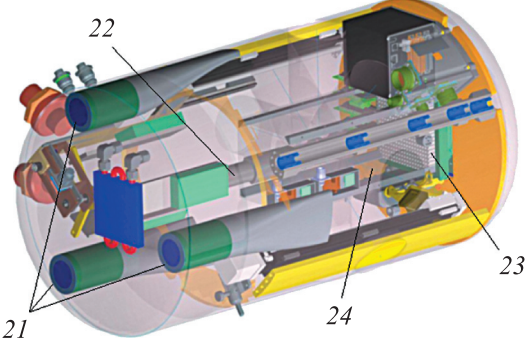
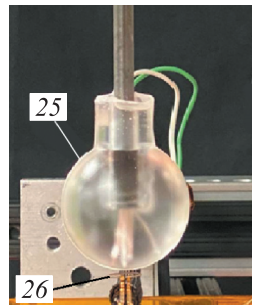
**Основные результаты, полученные в ходе исследований.** Основными результатами экспериментов являлись следующие основные параметры, влияющие на образование и устойчивость пламени:

- давление и температура в экспериментальной камере;
- скорость потока газа/жидкости;
- концентрация компонентов топливной смеси;
- напряженность электрического поля.

К настоящему времени завершено выполнение экспериментов с горением жидкостей и газов. Планируется к выполнению эксперимент с горением твердых веществ.

Таблица 2

Внешний вид и конструктивные элементы исследовательских камер

Группа экспериментов	Наименование и основные характеристики камеры	Вид камеры	Вид горелки
Горение жидкостей	MDCA (Multi-user Drop-let Combustion Apparatus)		
Горение газов	ACME (Advanced Combustion via Microgravity Experiments)		
Горение твердых веществ	CIA (Chamber Insert Assembly)		

Члены российского экипажа проводили работы в рамках подготовки и проведения космических экспериментов (КЭ). Данные о задействованных членах экипажа в ходе экспедиций приведены в табл. 3.

В ходе исследований получены следующие данные о характеристиках горения:

- размеры стабилизированного пламени;
- границы возникновения пульсирующих неустойчивостей пламени;
- температура пламени;
- сажеобразование в процессе горения;
- пределы существования пламени во времени и пространстве.

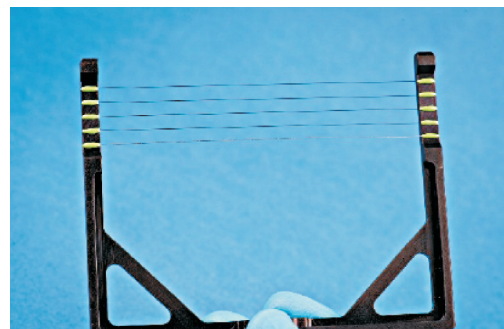


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной рамки с набором из пяти тонких сменных волокон (SiC) для измерения температуры горения методом тонковолоконной пирометрии

Таблица 3

**Перечень экспедиций, в ходе которых проводились КЭ по исследованию горения в космосе, и участвовавших в этом членов российского экипажа**

Наименование эксперимента	Экспедиция	Член экипажа
Зарево	МКС-50	О.В. Новицкий
Диффузионное пламя, этап 1	МКС-54	А.А. Мисуркин
Электрическое пламя, этап 1	МКС-55, МКС-56	А.Н. Шкаплеров С.В. Прокопьев
Диффузионное пламя, этап 2	МКС-56	О.Г. Артемьев
Электрическое пламя, этап 2	МКС-56, МКС-57	С.В. Прокопьев
Фламенко, этап 1	МКС-58, МКС-59	О.Д. Кононенко
Адамант, этап 1	МКС-59 МКС-60	О.Д. Кононенко А.Н. Овчинин
Сферическое пламя, этап 1	МКС-61	О.И. Скрипочка
Сферическое пламя, этап 2	МКС-63	А.А. Иванишин
Фламенко, этап 2	МКС-63	А.А. Иванишин
Фламенко, этап 3	МКС-64	С.В. Кудь-Сверчков
Адамант, этап 2	МКС-66	П.В. Дубров
Джел, этап 1	МКС-68	Д.А. Петелин

Затраты времени российского экипажа на настройку и подготовку к работе аппаратуры составили более 70 ч полетного времени. Перечень работ и затраты времени на их проведение приведены в табл. 4.

Перечень работ от одной экспедиции к другой дополняли и расширяли, пополняя пере-

чень и объем работ в методиках, выпускаемых ПАО «РКК «Энергия им. С.П. Королёва», для подготовки экипажа. Методики выпускали к каждой из ЦР и КЭ в ходе соответствующей экспедиции.

По результатам работ, проведенных на стойке CIR, выявлены недостатки, которые приво-

Таблица 4

**Перечень работ и затраты времени экипажа на подготовку аппаратуры к работе**

Операция	Время, мин:с
Замена одного баллона интегрированной стойки CIR на 1,00 л на штуцере № 1 или на штуцере № 4 (для баллонов высокой концентрации кислорода)	1:15
Замена двух баллонов интегрированной стойки CIR на 2,25 л на штуцере № 2 и на 3,80 л на штуцере № 3 (для топливных баллонов)	2:00
Замена трех баллонов интегрированной стойки CIR	3:00
Замена двух баллонов интегрированной стойки CIR и двух баллонов газового хроматографа	3:00
Замена двух баллонов интегрированной стойки CIR и трех баллонов газового хроматографа	3:10
Переключение/настройка таймеров контроллеров вентилей расхода топлива и окислителя и замена двух баллонов интегрированной стойки CIR	2:30
Настройка калибровочного вентиля блока управления окислителем горючего (ФОМА) стойки CIR	1:10
Замена картриджа с адсорбентом	1:05
Замена двух баллонов и картриджа с адсорбентом	2:30
Замена одного баллона и картриджа с адсорбентом	2:00

дили к отказам стойки и затрудняли, либо прерывали исследования. Краткий перечень недостатков включает в себя:

- отказ топливоподающего трубчатого элемента;
- пространственную неустойчивость капли после отделения от топливоподающего трубчатого элемента;
- отказ запальника;
- отказ подающего механизма запальника;
- просачивание компонентов топлива/окислителя через вентиль баллона;
- попадание расплава при горении образца твердого вещества на стенку экспериментальной камеры;
- разрыв мембраны;
- отказ программного обеспечения видеокамер;
- отказ программного обеспечения процесса ввода-вывода;
- отказ вентилятора процессора ввода-вывода.

По результатам проведения ЦР и КЭ опубликованы статьи [5–13], выпущены экспресс- и итоговые отчеты. Основные темы и результаты, освещенные в публикациях и отчетах, в краткой форме приведены в табл. 5.

**Краткий анализ результатов исследований.** Среди результатов, приведенных в табл. 5, наибольший интерес заслуживает сравнение показателей, полученных в ходе исследований горения капельно-жидких и газообразных топлив в ходе экспериментов «Зарево» и «Фламенко».

Так, при проведении КЭ «Зарево» в ходе исследования горения капельно-жидких горючих н-додекана и изо-додекана ( $C_{12}H_{26}$ ), наблюдалось явление, получившее название «беспламенное окисление», связанное с циклическим процессом медленного беспламенного догорания капли горючего в воздухе после радиационного погасания первоначально очень яркого «горячего» пламени вокруг нее (рис. 3).

Таблица 5

Результаты, освещенные в отчетах о выполнении ЦР и КЭ

Наименование эксперимента	Основные результаты эксперимента
Зарево	Изучен эффект многофазного горения капель углеводородов в условиях микрогравитации с промежуточным погасанием и последующим взрывообразным возгоранием пламени, вызванных периодическим образованием сажистой сферы вокруг горящей капли
Диффузионное пламя	Определены границы существования пламени из бедных, сильно разбавленных смесей газов, которые оказывались шире, чем границы существования пламени в земных условиях. Отмечено, что факел диффузионного пламени в спутном потоке газа в невесомости выше, холоднее и образует меньше сажи, чем факел пламени в земных условиях
Электрическое пламя	Установлено, что электрическое поле (отрицательный потенциал на сетчатом электроде) суживает пламя по форме и придает пламени голубоватый оттенок
Сферическое пламя	Наблюдалось (для топливных смесей водорода, метана и этилена с различной степенью разбавления азотом в окислительной атмосфере) кинетическое гашение при низкой скорости потока топливной смеси и радиационное гашение при его высокой скорости. Подобные явления невозможно было наблюдать в наземных экспериментах ввиду ограниченной продолжительности микрогравитации. Обнаружено (в метановой смеси) формирование стационарных и нестационарных нелинейных волновых структур. В частности, найдены структуры в виде локализованных очагов горения (baby flame) и волновые структуры, бегущие на фронте сферического пламени
Фламенко	Выявлены динамические структуры в форме ускоряющегося тройного пламени, наблюдавшиеся впервые
Адамант	В условиях микрогравитации исследовано сферическое диффузионное пламя при подаче горючего в атмосферу окислителя и, наоборот
Джел	Проведены эксперименты с горением шара из полиметилметакрилата диаметром 40 мм в трубе квадратного сечения 140×140 мм и длиной 280 мм при концентрации кислорода в смеси 17...35 % и давлении 0,5...1,0 атм



Рис. 3. Циклический процесс беспламенного горения капли горючего в воздухе в невесомости: 1 — зажигание (проводилось однократно); 2 — появление яркого желтого пламени; 3 — преобразование пламени в тусклое голубое свечение; 4 — исчезновение видимого пламени; 5 — повторное самовоспламенение (этапы 2–5 повторялись циклически до полного выгорания капли горючего)

Циклическость вспышек при догорании капли обусловлена тем, что после погасания «горячего» пламени капля продолжает испаряться благодаря низкотемпературному окислению паров горючего. При этом вокруг капли образуется сферическая оболочка из очень мелких (нанометрового диапазона) частиц сажи, которые поглощают часть тепловой энергии пламени и излучают ее в окружающую среду, приводя тем самым к безвозвратным потерям энергии и прогрессирующему снижению скорости испарения капли и скорости горения паров горючего.

В земных условиях проявление эффекта радиационного погасания капли осложнено естественной конвекцией, которая, с одной стороны, деформирует и фрагментирует сажевую оболочку, а с другой — увеличивает потоки тепла и вещества между поверхностью капли и пламенем.

Циклический процесс затухания наблюдался также при исследовании процесса горения и затухания газа над поверхностью плоской пористой горелки большого (25 или 50 мм) диаметра в ходе КЭ «Фламенко».

Установлено, что погасание начинается с появления «отверстия» на вершине пламени, границы которого очерчивают область с низкой температурой газовой смеси, делающей невозможным существование пламени. В условиях микрогравитации пламя принимало форму деформированного тора, а при расходе газа в достаточно узком интервале — около  $5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  — наблюдалось явление повторяющегося процесса погасания с образованием комбинированного (тройного) пламени (рис. 4), когда головные части пламени с трех сторон движутся навстречу друг другу.

Сначала (в интервале времени 2,5...5,0 с) происходило полное погасание диффузионного пламени с одной стороны горелки, в то время как с другой стороны продолжал существовать

постепенно уменьшающийся фрагмент этого пламени. В это же время в области погасания продолжалось смешение горючего и окислителя. Оставшийся фрагмент пламени воспламенял подготовленную смесь, что приводило к формированию структуры так называемого тройного пламени, включавшего в себя элементы как диффузионного пламени, так и пламени, полученного в результате воспламенения смеси.

Головная часть этой структуры распространялась с ускорением в обратном направлении по сферической поверхности. Столкновение головных частей сопровождалось ростом мощности тепловыделения. Одновременно с этим происходило остывание и погасание хвостовой

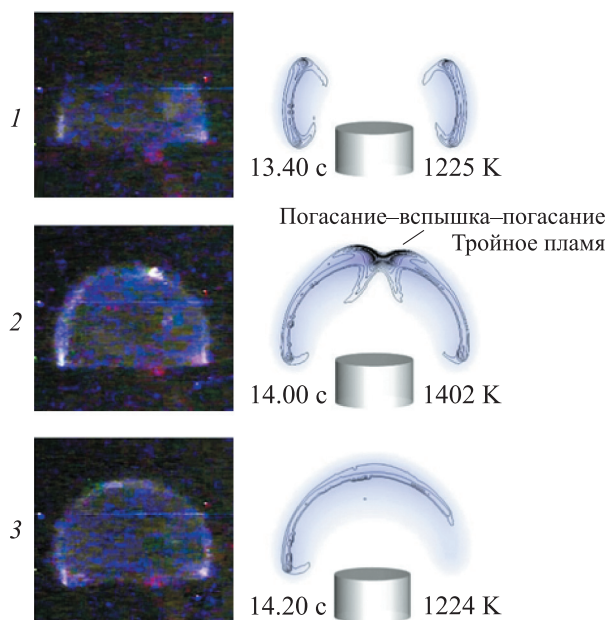


Рис. 4. Формирование в условиях микрогравитации ускоряющегося тройного пламени. Динамика роста пламени после потери устойчивости (межкадровый интервал 0,6 и 0,2 с):

1 — погасание пламени в верхней части (образование тора); 2 — момент полного восстановления сферической формы пламени (столкновение фронтов тройного пламени); 3 — погасание

части движущейся структуры с последующим снижением тепловыделения, которое, однако, не приводило к полному погасанию. Смещение горючего и окислителя с последующим воспламенением повторялось, и тройное пламя появлялось вновь. Приведенная последовательность событий повторялась как минимум еще раз, и только после этого происходило полное погасание пламени.

На основе анализа показателей горения и погасания пламени в этих двух экспериментах оценены характерные особенности и сделаны предварительные выводы о существенном влиянии процессов теплопередачи и подпитки окислителем угасающего пламени в жидкостях и газах в условиях невесомости, имеющие важное научное и практическое значение.

Сравнение пульсирующих структур пламени, полученных в экспериментах «Зарево» и «Фламенко» при исследовании горения жидких и газообразных топлив в условиях микрогравитации представляет несомненный интерес для дальнейшего развития химической физики. Это обусловлено тем, что до настоящего времени у исследователей не было возможности наблюдать, а, главное, сравнивать поведение пламени в условиях, когда микрогравитация существует не короткое время, а охватывает не один цикл воспламенения — погасания пламени при горении жидкости или газа.

В эксперименте «Фламенко» также исследовано диффузионное пламя этилена  $C_2H_4$ , создаваемое над плоской пористой горелкой в условиях микрогравитации. Получены сведения о наблюдавшихся состояниях диффузионного пламени и их соответствие результатам математического моделирования. Так, удалось зафиксировать пламя разной формы, формирующееся

над раскаленной плоскостью, классифицировать и соотнести полученные формы пламени с условиями их формирования над этой плоскостью. Характеристики сеансов КЭ «Фламенко», в которых измерены параметры горения газов, приведены в табл. 6, где  $slpm$  — 1/100 литра в минуту;  $psi$  — единица фунт-сила на квадратный дюйм, численно равная 6,895 кПа или 1/14 атм.

Виды пламени в эксперименте при давлении в испытательной камере 98,6...101,3 кПа приведены в табл. 7 (яркость, контрастность и пространственный масштаб одинаковы для всех изображений).

Анализ данных табл. 7 показал, что причинами появления пульсирующего пламени являются снижение концентрации кислорода и уменьшение давления над пористой поверхностью горелки.

Экспериментальные данные КЭ «Фламенко» (изображения пламени, время жизни его и тепловых потоков на поверхности горелки) сравнивали с результатами численного моделирования. Установлено, что рассогласование расчетных и экспериментальных результатов увеличивалось с ростом концентрации кислорода в окружающей среде. Возможная причина такого явления заключается в повышении роли тепловой инерции крышки горелки и неравномерности ее нагрева (в текущей версии модели температура поверхности горелки полагается постоянной и равной начальной).

По результатам КЭ предложено усовершенствовать математическую модель горения с учетом тепловой инерции и нагрева крышки горелки, неравномерного распределения расхода газа на поверхности, динамической адаптации сетки и уточнения спектральных свойств продуктов сгорания.

Таблица 6


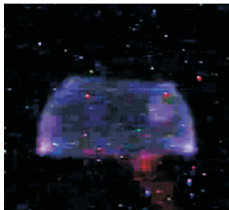
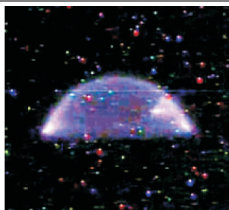
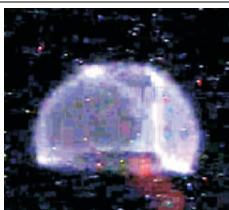
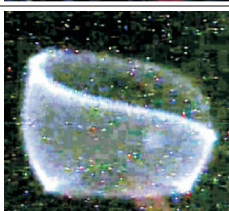
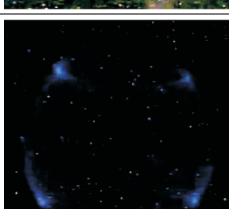
Характеристики условий проведения сеансов КЭ «Фламенко»

Обозначение серии сеансов эксперимента	Горючее	Расход горючего (разбавлено азотом), $slpm$	Кислород, мольная доля	Давление, $psi$
039	100%-ный этилен	0,100...0,200	0,21...0,40	14,3...14,7
051		0,100...0,150	0,265...0,34	8,2...14,8
056	50%-ный этилен	0,140...0,200	0,21...0,40	8,2...14,7
063		0,190...0,380	0,26...0,40	14,7
066		0,025...0,078	0,36	8,3
070		0,047...0,156	0,28...0,36	8,2...10,3
087		0,041...0,082	0,28...0,36	8,2...10,3
094	100%-ный этилен	0,039...0,210	0,22...0,35	8,2...14,7



Таблица 7

**Виды пламени, полученные в эксперименте «Фламенко»  
при давлении в испытательной камере 98,6...101,3 кПа**

Наименование пламени	Форма пламени	Серия сеансов эксперимента, в которой зафиксирована данная форма пламени
Стационарное пламя		051, 056, 066, 070, 087, 094
Погасание сверху		039, 051, 056, 063, 094
Погасание снизу		087, 094
Капюшон		051, 056, 063, 094
Спираль		056, 063
Неполное восстановление		063

Не меньший интерес представляют результаты, полученные в ходе КЭ, связанных с горением газов: «Диффузионное пламя», «Электрическое пламя», а также S-FLAME и «Адамант». В ходе этих экспериментов удалось зафиксировать виды пламени, сформулировать характерные особенности и составить их перечень, а также соотнести их с условиями зарождения и гашения для горелок трубчатой и сферической форм.

В эксперименте S-FLAME получены интересные результаты при исследовании процессов распространения и гашения пламени.

При исследовании распространения пламени (рис. 5) для оценки скорости распространения фронта пламени, размера области горения и температуры в различных сечениях опробован и успешно применен метод тонковолокнистой пирометрии, который сочетает простоту и

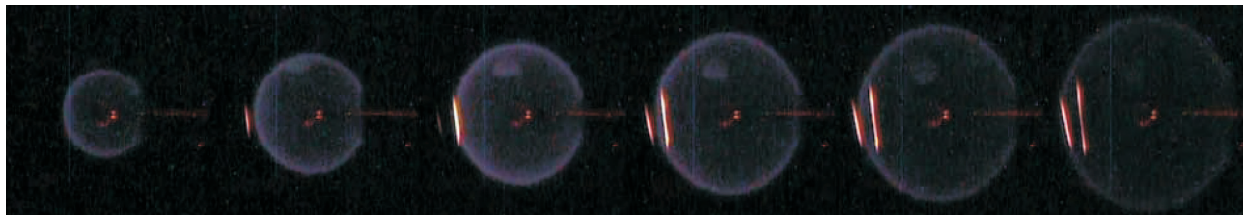


Рис. 5. Процесс распространения сферического пламени в условиях невесомости, покадрово снятый в цвете высокоскоростной камерой



Рис. 6. Покадровая развертка процесса пульсирующего режима пламени

оригинальность с точностью и оперативностью измерений (см. рис. 2).

На рис. 5 в левой стороне кадра отчетливо видны раскаленные нити, яркость свечения которых пропорциональна температуре. Снимая на высокоскоростную камеру процесс распространения фронта огня, исследователи получили возможность регистрировать нарастание и спад температуры огня с точной привязкой ко времени прохождения процесса.

Также в ходе эксперимента S-FLAME наблюдались пульсирующие режимы пламени. Анализ структуры пламени в этих режимах показал, что его форма становится существенно трехмерной. Форма пламени меняется от чашеобразной, расположенной противоположно трубке подачи топливной смеси в горелку, к полной сфере, обхватывающей трубку подачи топливной смеси. Подобное поведение приведено в виде покадровой развертки на рис. 6 как серия моментальных снимков фронта пламени, сделанных в видимом диапазоне.

В зависимости от концентрации горючего и окислителя процесс пульсаций огня либо повторяется периодически, либо имеет место всего лишь один период пульсаций, за которым следует гашение. Важно отметить, что пламя, подверженное гашению через появление осцилляций, как правило, перед возникновением пульсаций имеет достаточно большую горловину — область в окрестности трубки подачи топливной смеси, где наблюдается локальное гашение.

В районе этой области топливо и окислитель могут частично перемешиваться, и возникно-

вание пульсаций пламени в виде поверхностных волн, как это показано на рис. 6, может быть связано с распространением волн горения в данную область с частично перемешанной топливно-воздушной смесью. Формирование сажи в ходе таких процессов выявлено только на начальной стадии воспламенения. При этом прослеживалась очевидная закономерность: сажеобразование идет интенсивнее для топливной смеси с меньшим содержанием разбавителя (азота).

В эксперименте S-FLAME с метановой смесью зафиксировано явление формирования нестационарных нелинейных волновых структур, в частности очагового распространения пламени — так называемого пламени типа *baby flame*. При этом расширяющееся пламя на некотором этапе распространения сегментировалось на

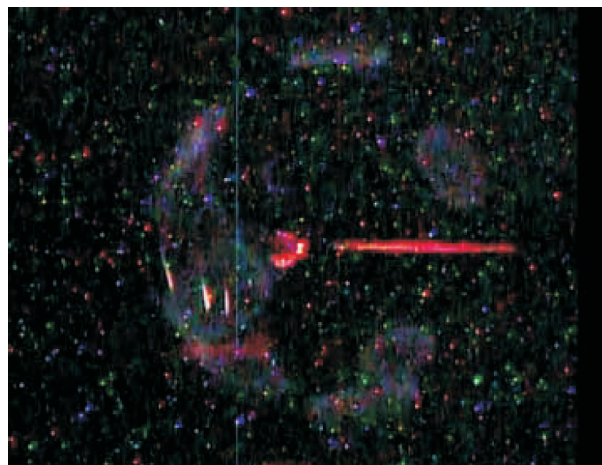


Рис. 7. Очаговое распространение пламени в условиях невесомости

несколько очагов (рис. 7). После выключения подачи смеси горючего и окислителя эти очаги как бы стягиваются к горелке.

Как видно из рис. 7, в процессе расширения фронт пламени сегментируется с образованием множественных очагов горения. Горение продолжается до конца подачи горючей смеси, и сопровождается плавным ростом температуры горелки и снижением светимости пламени.

В ходе реализации эксперимента S-FLAME нашли подтверждение предложенные ранее на основе численных расчетов сценарии динамического гашения пламени с усложняющейся динамикой пульсации и механизмы формирования волновых структур на фронтах пламени, изложенные в работах по сегментированной структуре фронта горения.

В КЭ «Диффузионное пламя» проведены исследования влияния спутного потока окислителя на формирование пламени в невесомости. В качестве примера приведена покадровая развертка процесса, в котором увеличивалась скорость спутного потока при неизменном расходе горючего и окислителя в горящей топливной смеси (рис. 8).

Как видно из рис. 8, форма диффузионного пламени с увеличением скорости спутного потока при неизменном расходе топлива и окислителя существенно вытягивается. Это обусловлено тем, что увеличение скорости воздуха приводит к усилению транспорта кислорода к зоне горения, вследствие чего высота и диаметр

пламени уменьшаются. Светящийся кончик пламени связан с образованием сажи. С увеличением скорости спутного потока сажеобразование пламени растет. При изменении условий эксперимента, в частности при увеличении концентрации этилена в топливной смеси, обнаружено, что высота пламени увеличивается, как если бы повышались скорости течения потока топлива и воздуха.

В КЭ «Электрическое пламя» перед тем, как включили электрическое поле, пламя выглядело тусклым и сферическим. После приложения к сетчатому электроду отрицательного потенциала (относительно горелки) и его постепенного увеличения пламя становилось более ярким и узким, форма его приобретала вид пламени в нормальной гравитации (рис. 9).

Яркое желтое свечение на кончике пламени обусловлено наличием сажи в продуктах горения. В конце эксперимента, когда выключали электрическое поле, пламя становилось снова тусклым и сферическим [14]. На рис. 9 приведены фотографии пламени при разной напряженности электрического поля. Стрелкой показано увеличение отрицательного потенциала на сетке. Горючее — 100%-ный метан.

В КЭ «Электрическое пламя» также исследовано поведение пламени без спутного потока воздуха, стабилизированного при различных потоках горючего (рис. 10).

Отмечено, значительное влияние электрического поля на форму и размер пламени. Это

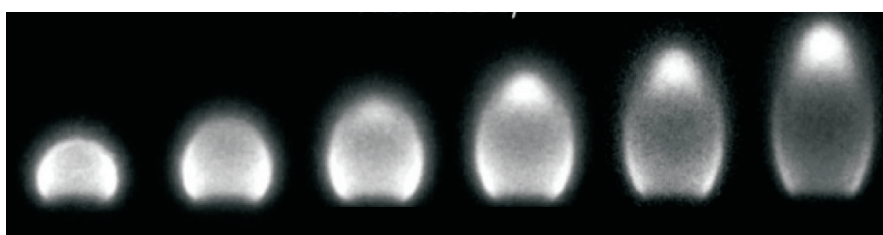


Рис. 8. Покадровая развертка процесса горения при увеличении скорости спутного потока и неизменном расходе горючего и окислителя в топливной смеси

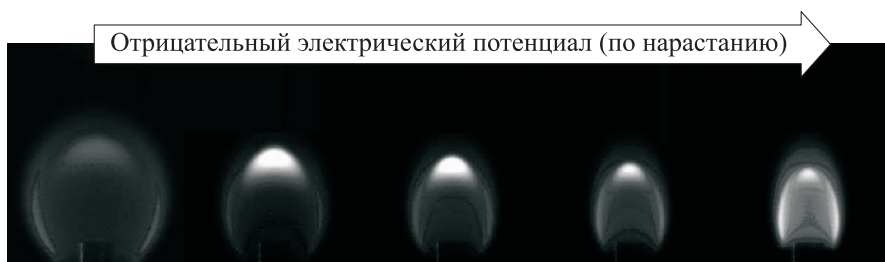


Рис. 9. Покадровая развертка воздействия электрического поля на пламя в ходе КЭ «Электрическое пламя» в спутном потоке

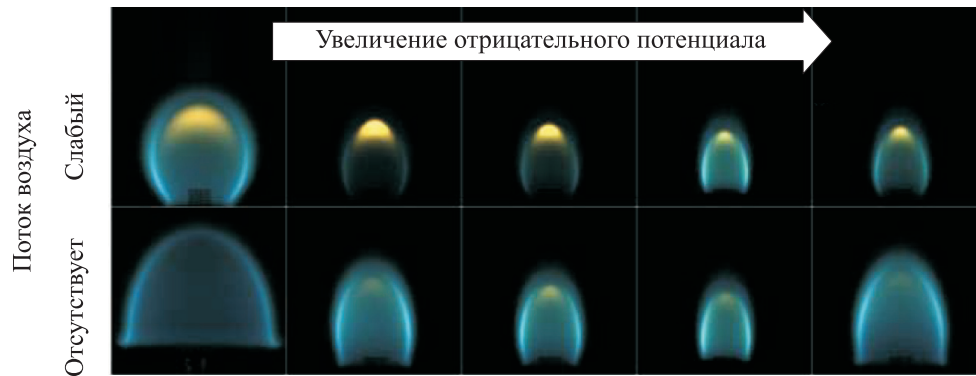


Рис. 10. Временная развертка воздействия отрицательного электрического поля на пламя при наличии и отсутствии спутного потока

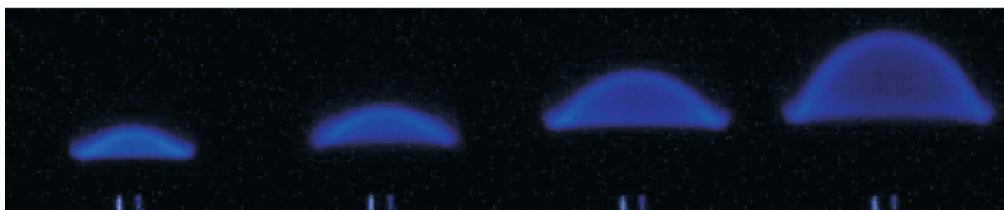


Рис. 11. Временная развертка воздействия положительного электрического поля на пламя при отсутствии спутного потока и нарастании расхода горючего

объясняется тем, что ионный ветер, создаваемый электрическим полем, усиливает перенос кислорода в пламя, что приводит к тому, что оно становится меньше как по радиусу, так и по высоте. Величина ионного тока в пламени значительно зависит от значения и знака приложенного электрического поля.

Установлено, что для пламени без спутного потока положительное электрическое поле (положительный потенциал на сетчатом электроде) способствует стабилизации пламени близко к трубке с топливом, а увеличение потока горючего приводит к отрыву пламени от горелки. На рис. 11 показаны фотографии пламени (без спутного потока воздуха), стабилизированного при различных потоках горючего (цвет пламени изменен для наглядности, в действительности они имеют бледно-голубой цвет).


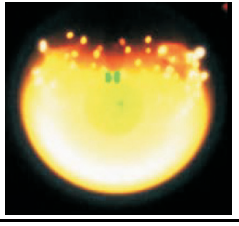
В КЭ «Адамант» исследовано пламя, полученное при горении горючего в атмосфере окислителя и окислителя в атмосфере горючего [15], при этом существенную роль играла степень перемешивания горючего и окислителя (табл. 8).

Из табл. 8 следует, что пламя, полученное на основе частично перемешанных газов, генерирует существенно меньше сажи, чем пламя с большим содержанием этилена, когда горение осуществлялось при подаче окислителя в атмосферу из горючего.

В ходе ЦР «Джел» выполнялось исследование на воспламенение сферических образцов литого полиметилметакрилата диаметром 40 мм с варьированием скорости потока воздуха (5,0...13,5 см/с) и концентрации кислорода (19,0; 19,5 и 21,0 %). Во время сеанса ЦР осуществлялась фото- и видеозапись с различных ракурсов, измерялись давление и температура воздуха в камере установки, температура внут-

Таблица 8

Результаты исследования пламени, полученные в КЭ «Адамант»

Характеристика пламени	Изображение пламени	Примечание
Пламя, характерное для случая частично перемешанных газов		Несажистое пламя
Пламя при больших расходах горючего		Сажистое пламя

ри сферического образца литого полиметилметакрилата, концентрация газов в камере ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ), влажность и скорость потока воздуха, мощность воспламенителя и лучистость теплового потока. Кадр из сеанса ЦР «Джел» приведен на рис. 12.

Определены также некоторые типовые отказы экспериментальных установок, реализующих горение в условиях невесомости. Перечень типовых отказов, выявленных в ходе проведения КЭ, и возможных причин их возникновения приведен в табл. 9.

По результатам анализа указанных недостатков определены и запатентованы техниче-

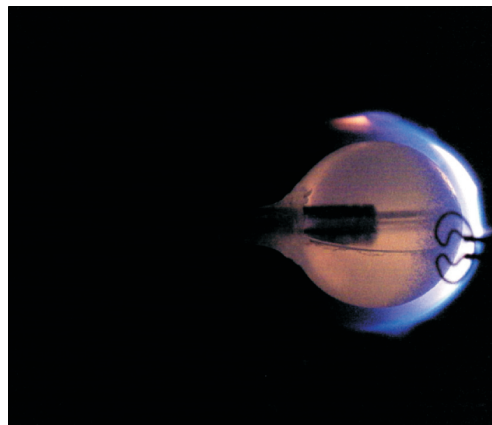


Рис. 12. Кадр из сеанса ЦР «Джел»

Таблица 9

**Перечень типовых отказов, выявленных в ходе проведения КЭ и ЦР**

Наименование отказа	В каких экспериментах обнаружен	Примечание
Отказ, связанный с подачей топлива топливоподающим трубчатым элементом	Зарево	При подаче жидкого топлива. Возможная причина: – форма топливоподающей трубки; – неисправность устройства, нагнетающего давление в системе
Пространственная неустойчивость капли после отделения от топливоподающего трубчатого элемента	Зарево	Возможная причина: – действие сил, возникающих при движении космической станции вокруг Земли; – микроускорения МКС при перемещениях экипажа по ней, при работе двигателей коррекции движения и т. д.
Разгерметизация емкости (топливного баллона)	Фламенко, Адамант, Сферическое пламя	При подаче газовой смеси (при исследовании горения газовых смесей). Возможная причина: износ вентиля баллона
Выход из строя запальника. Замена требовалась примерно каждые 30 суток	Диффузионное пламя, Электрическое пламя, Фламенко, Адамант, S-FLAME	Возможная причина: – затруднения при зажигании материалов в условиях невесомости (увеличивается требуемая мощность запальника); – повышенное сажеобразование при горении в невесомости
Выход из строя устройства подачи запальника к заданному месту	Джел	Подана команда «В исходное» при нахождении запальника в исходном положении. Возможная причина: сбой программы
Попадание расплава при горении образца твердого вещества на стенку экспериментальной камеры	Джел	Мал зазор между стенкой камеры и образцом, нет барьера между образцом и стенкой камеры. Возможная причина: дефект конструкции
Отказ программного управления (блока Input/Output Processor, IOP)	Зарево, Диффузионное пламя, Электрическое пламя	Возможная причина: наличие ионизирующих излучений из космоса
Отказ вентилятора системы охлаждения блока IOP	Джел	Износ. Загрязнение оси крыльчатки. Возможная причина: естественный износ конструкции

ские решения, позволяющие создать исследовательский стенд с улучшенными характеристиками. Собственником патента № 2821617 является ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева».

## Выводы

1. В ходе выполнения ЦР и КЭ по тематике горения в условиях микрогравитации проведены следующие работы:

- исследовано горение топлив, находящихся в двух агрегатных состояниях — жидком и газообразном;
- для каждого состояния определены характеристики условий и режимов зажигания, горения и погасания, а также сопутствующих процессу горения эффектов;
- выявлены отказы, характерные для установок, связанных с горением в условиях микрогравитации;

- составлены перечень и временные характеристики работ экипажа, касающиеся обслуживания установок, связанных с горением в условиях микрогравитации;

- по результатам проведения экспериментов выпущены экспресс- и итоговые отчеты, опубликованы работы в ведущих научных изданиях.

2. Выполнен сравнительный анализ результатов экспериментов с жидкостями и газами в плане исследований процессов циклического погасания пламени.

3. Анализ собранных экспериментальных данных позволит существенно улучшить модельные представления о структуре и динамике процессов горения в условиях невесомости и разработать более точные модели для описания пламени в условиях космоса и земных условиях.

4. В настоящее время продолжают работы, связанные с подготовкой и проведением завершающей серии ЦР по тематике горения в условиях микрогравитации.

## Литература

- [1] Новицкий О.В., Пеклевский А.В., Пичугин С.Б. и др. Совместный эксперимент «Зарев» и оборудование МКС для его проведения. *Мат. XII межд. науч.-практ. конф. Пилотируемые полеты в космос*. Звездный городок, Изд-во ЦПК, 2017, с. 85–87.
- [2] Пичугин С.Б., Артемьев О.Г., Прокопьев С.В. и др. Эксперименты на МКС по горению газовых смесей. Некоторые результаты и наработанный технический опыт. *Мат. XIII межд. науч.-практ. конф. Пилотируемые полеты в космос*. Звездный городок, Изд-во ЦПК, 2019, с. 152–54.
- [3] Пичугин С.Б., Самсонов Д.С., Фролов С.М. и др. Эксперименты с пламенами на борту МКС. *Мат. отраслевой науч.-практ. конф. Космонавтика XXI века*. Королев, Изд-во ЦНИИМАШ, 2021, с. 219–221
- [4] Пичугин С.Б. Исследования процессов горения на стенде международной космической станции. *Мат. Всерос. науч.-тех. конф. Ракетно-космические двигательные установки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 79–80.
- [5] Markan A., Sunderland P.B., Quintiere J.G. et al. Measuring heat flux to a porous burner in microgravity. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, no. 3, pp. 4137–4144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.006>
- [6] Quintiere J.G., Hees P., Vermina Plathner F. Analysis of extinction and sustained ignition. *Fire Saf. J.*, 2019, 105, pp. 51–61, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.02.003>
- [7] Markan A., Baum H.R., Sunderland P.B. et al. Transient ellipsoidal combustion model for a porous burner in microgravity. *Combust. Flame*, 2020, 212, pp. 93–106, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.030>
- [8] Chien Y.-C., Escofet-Martin D., Dunn-Rankin D. Ion current and carbon monoxide release from an impinging methane/air coflow flame in an electric field. *Combust. Flame*, 2019, vol. 204, pp. 250–259, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.03.022>
- [9] Wang Z., Sunderland P.B., Axelbaum R.L. Dilution effects on laminar jet diffusion flame lengths. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, no. 2, pp. 1547–1553, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.085>
- [10] Wang Z., Sunderland P.B., Axelbaum R.L. Double blue zones in inverse and normal laminar jet diffusion flames. *Combust. Flame*, 2020, vol. 211, pp. 253–259, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.014>

- [11] Liang W., Law C.K. Generalized description and extrapolation of extinction stretch rates from spherically expanding flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39(2), pp. 2047–2054, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.08.134>
- [12] Wenkai Liang, Chung K. Law. On radical-induced ignition in combustion systems. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, 2019, vol. 10, pp. 199–217, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030141>
- [13] Snegirev A., Kuznetsov E., Markus E. et al. Transient dynamics of radiative extinction in low-momentum microgravity diffusion flames. *Proc. Combust. Inst.*, 2021, vol. 38, no. 3, pp. 4815–4823, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.110>
- [14] Kempema N.J., Dobbins R.R., Long M.B. et al. Constrained-temperature solutions of coflow laminar diffusion flames. *Proc. Combust. Inst.*, 2021, vol. 38, no. 2, pp. 1905–1912, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.034>
- [15] Irace P.H., Lee H.J., Waddell K. et al. Observations of long duration microgravity spherical diffusion flames aboard the international space station. *Combust. Flame*, 2021, vol. 229, art. 111373, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.02.019>

## References

- [1] Novitskiy O.V., Peklevskiy A.V., Pichugin S.B. et al. [Joint experiment "Zarevo" and equipment of international space station for its implementation]. *Mat. XII mezhd. nauch.-prakt. konf. Pilotiruemye polety v kosmos* [Proc. XII Int. Sci.-Pract. Conf. Manned space flights]. *Zvezdnyy gorodok, Izd-vo TsPK im. Yu.A. Gagarina Publ.*, 2017, pp. 85–87. (In Russ.).
- [2] Pichugin S.B., Artemyev O.G., Prokopyev S.V. et al. [Experiments on ISS on combustion of gas mixtures. Some results and technical experience gained]. *Nekotorye rezultaty i narabotannyi tekhnicheskiy opyt. Mat. XII mezhd. nauch.-prakt. konf. Pilotiruemye polety v kosmos* [Proc. XII Int. Sci.-Pract. Conf. Manned space flights]. *Zvezdnyy gorodok, Izd-vo TsPK Publ.*, 2019, pp. 152–54. (In Russ.).
- [3] Pichugin S.B., Samsonov D.S., Frolov S.M. et al. [Experiments with flames onboard the ISS]. *Mat. otraslevoy nauch.-prakt. konf. Kosmonavtika XXI veka* [Proc. Industry Sci.-Pract. Conf. Cosmonautics of the XXI Century]. *Korolev, Izd-vo TsNIIMASh Publ.*, 2021, pp. 219–221. (In Russ.).
- [4] Pichugin S.B. [Studies of combustion processes on the international space station stand]. *Mat. Vseros. nauch.-tekh. konf. Raketno-kosmicheskie dvigatelnye ustanovki* [Proc. Russ. Sci.-Tech. Conf. Rocket and Space Propulsion Installations]. *Moscow, Bauman MSTU Publ.*, 2023, pp. 79–80. (In Russ.).
- [5] Markan A., Sunderland P.B., Quintiere J.G. et al. Measuring heat flux to a porous burner in microgravity. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, no. 3, pp. 4137–4144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.006>
- [6] Quintiere J.G., Hees P., Vermina Plathner F. Analysis of extinction and sustained ignition. *Fire Saf. J.*, 2019, 105, pp. 51–61, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.02.003>
- [7] Markan A., Baum H.R., Sunderland P.B. et al. Transient ellipsoidal combustion model for a porous burner in microgravity. *Combust. Flame*, 2020, 212, pp. 93–106, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.030>
- [8] Chien Y.-C., Escofet-Martin D., Dunn-Rankin D. Ion current and carbon monoxide release from an impinging methane/air coflow flame in an electric field. *Combust. Flame*, 2019, vol. 204, pp. 250–259, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.03.022>
- [9] Wang Z., Sunderland P.B., Axelbaum R.L. Dilution effects on laminar jet diffusion flame lengths. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, no. 2, pp. 1547–1553, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.085>
- [10] Wang Z., Sunderland P.B., Axelbaum R.L. Double blue zones in inverse and normal laminar jet diffusion flames. *Combust. Flame*, 2020, vol. 211, pp. 253–259, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.014>
- [11] Liang W., Law C.K. Generalized description and extrapolation of extinction stretch rates from spherically expanding flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39(2), pp. 2047–2054, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.08.134>

- [12] Wenkai Liang, Chung K. Law. On radical-induced ignition in combustion systems. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, 2019, vol. 10, pp. 199–217, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030141>
- [13] Snegirev A., Kuznetsov E., Markus E. et al. Transient dynamics of radiative extinction in low-momentum microgravity diffusion flames. *Proc. Combust. Inst.*, 2021, vol. 38, no. 3, pp. 4815–4823, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.110>
- [14] Kempema N.J., Dobbins R.R., Long M.B. et al. Constrained-temperature solutions of coflow laminar diffusion flames. *Proc. Combust. Inst.*, 2021, vol. 38, no. 2, pp. 1905–1912, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.034>
- [15] Irace P.H., Lee H.J., Waddell K. et al. Observations of long duration microgravity spherical diffusion flames aboard the international space station. *Combust. Flame*, 2021, vol. 229, art. 111373, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.02.019>

Статья поступила в редакцию 28.01.2024

## Информация об авторе

**ПИЧУГИН Сергей Борисович** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва» (141070, Королёв, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 4А, e-mail: [sergey.pichugin@rsce.ru](mailto:sergey.pichugin@rsce.ru)).

## Information about the author

**PICHUGIN Sergey Borisovich** — Candidate of Science (Eng.), Leading Researcher. S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia” (141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4A, e-mail: [sergey.pichugin@rsce.ru](mailto:sergey.pichugin@rsce.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пичугин С.Б. Исследования процессов горения на стенде международной космической станции. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 11, с. 101–116.

### Please cite this article in English as:

Pichugin S.B. Study of combustion processes using a bench on board the International Space Station. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 11, pp. 101–116.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

### «Расчет и проектирование сетчатых композитных конструкций»

Авторы: А.В. Азаров, А.Ф. Разин

Рассмотрены вопросы, связанные с расчетом и проектированием сетчатых композитных конструкций, применяемых в ракетно-космической технике в качестве отсеков ракет-носителей, адаптеров полезной нагрузки, корпусов космических аппаратов и элементов развертываемых космических антенн.

Для студентов магистратуры, обучающихся по специальностям «Ракетные комплексы и космонавтика» (24.04.01) и «Материаловедение и технологии материалов» (22.04.01) на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Пособие может быть полезно аспирантам, научным работниками инженерам в области разработки и изготовления композитных конструкций.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru); <https://press.bmstu.ru>