

# «Зарево» в космосе

(Продолжение. Начало на с. 7)

При проведении эксперимента использовалось следующее регистрирующее оборудование:

- 12-битная видеокамера с красной диодно-лазерной подсветкой;
- видеокамера повышенной чувствительности для наблюдения за пламенем, позволяющая регистрировать холоднотеплое свечение очень низкой интенсивности (свечение возбуждённого формальдегида);
- видеокамера для регистрации хемилуминесценции горячего пламени;
- цветная видеокамера с белой диодно-лазерной подсветкой с возможностью значительного увеличения изображения;
- два оптических радиометра: один для регистрации теплового излучения горячей капли в диапазоне от видимого (~ 0.40 мкм) до ИК (~ 100 мкм) света; другой для регистрации излучения водяного пара в широком ИК-диапазоне (~ 5-7 мкм);
- датчики температуры и давления камеры-печи и газоанализатор камеры-печи MDCA.



Встроенный блок MDCA для исследования горения капель в условиях микрогравитации в многофункциональной установке для исследования горения CIR в модуле Destiny на АС МКС.

Подчеркнём, что приготовление топливной и газовой смесей производилось в самой камере, что обеспечивало безопасность проведения КЭ. Камера при этом герметична, что позволяет наблюдать за процессом горения капли и регистрировать его с помощью видеорежиссёра.

Все параметры в процессе КЭ по плану задавались командами с Земли от группы управления в Исследовательском центре имени Джона Гленна. На членов экипажа ложилась нагрузка по настройке и регулировке параметров съёмки видеокамерой, а также по замене ёмкостей с горючим и газовыми смесями. Настройка видеокамеры обеспечивала заданные направление и угол обзора при съёмке, а также правильную цветопередачу в ходе регистрации. Если первые два параметра регулируются механическим перемещением видеокамеры относительно прозрачного иллюминатора камеры, в которой производится поджиг компонентов топлива в газовой среде, то настройка цветопередачи осуществлялась программно и потребовала достаточно высоких навыков от экипажа по заданию нужных значений параметров.

При подготовке НА к проведению КЭ и в ходе его выполнения экипаж проводил работы в соответствии с программой. Перед каждым сеансом КЭ члены экипажа осматривали видеорежиссёр – камеру с длиннобазовой системой линз. Разбитое стекло представляет смертельную угрозу экипажу станции: в условиях невесомости стекло невозможно просто собрать с по-

ла, оно с большой вероятностью окажется в лёгких членов экипажа. Поэтому при проведении осмотра линз регистратора использовали специальный раскладной столик и перчаточный ящик.

Экспериментатор из числа членов экипажа МКС укреплял раскладной столик на лицевой поверхности стойки CIR, раскладывал его и устанавливал на полученной поверхности перчаточный ящик. Внутри этого ящика помещался объектив видеокамеры или камера в сборе с объективом. Осматриваемый объект закреплялся резиновым жгутом на подложке, расположенной внутри перчаточного ящика. Просунув руки в перчатки, экспериментатор поворачивал камеру и производил осмотр её объективов. Это гарантировало, что ни осколки стекла, ни что-либо другое не окажется вне пределов перчаточного ящика. После завершения осмотра камеру укрепляли так, чтобы она была направлена на переднюю стенку камеры MDCA, выполненную из специального стекла, и подготавливали её для проведения цветной видеосъёмки.

Ещё одна задача, связанная с безопасностью экипажа, – замена ёмкостей с горючим и газовыми смесями, даже в наземных условиях это достаточно сложная задача, и её относят к категории опасных. В условиях МКС сложность и степень опасности существенно возрастают и требуют от экипажа повышенной осторожности и внимательности.

Операции по замене ёмкостей проводились на МКС в соответствии с планом работ с контролем исполнения каждой операции, когда работа выполняется командой с одним контролирующим и одним исполняющим каждый пункт. Контролирующий член экипажа – Пегги Уилсон – зачитывала пункты инструкции и контролировала действия исполняющего члена команды – Олега Новицкого. Следует отметить высокую слаженность действий членов экипажа МКС, а также то, что данная схема организации работ позволила без сбоев, с высоким качеством и в заданные сроки выполнить все работы по подготовке и проведению КЭ.

В процессе выполнения эксперимента регулировке подлежал значительный по объёму набор параметров, в том числе:

- скорость разведения игольчатых подающих устройств и запальника;
- размер капли;
- температура поджига;
- процентный состав горючей смеси;
- процентный состав газовой смеси в камере установки и другие параметры.

Полученные данные позволяют визуализировать картину процессов от стадии формирования кап-

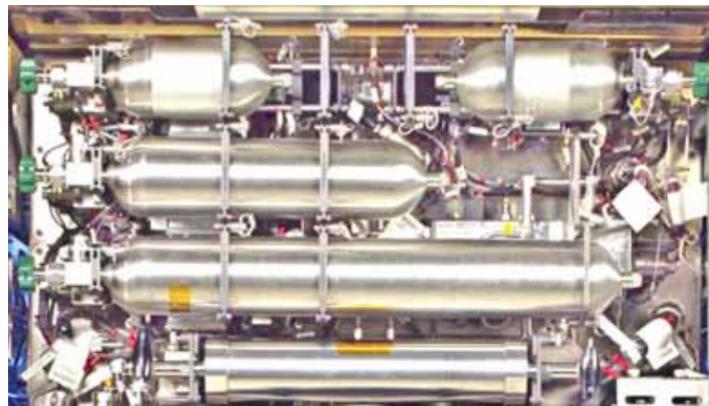
ли, зажигания, характера горения и движения капли. На слайдах выделены ключевые моменты эксперимента: зажигание, яркое жёлтое пламя, тусклое голубое свечение, исчезновение видимого пламени, повторное самовоспламенение. Обработка кадров видеосъёмки позволила получить графические данные об эволюции диаметра капли и других её характеристик в процессе горения.

За время реализации проекта проведено 47 серий КЭ, все поставленные задачи были выполнены, несмотря на то что в процессе проведения экспериментов были случаи поломки оборудования и план приходилось корректировать. Спустя месяц после начала проекта пришлось оптимизировать алгоритм работы зажигающего устройства, чтобы исключить возможность его перегорания. Кроме того, была увеличена максимальная длительность нагрева. Данные изменения были направлены на поиск режима зажигания капли без стадии горячего пламени.

В результате экспериментально изучено зажигание и горение свободно парящих и зафиксированных на нити капелек указанных тяжёлых углеводородных горючих в диапазоне размеров (3,5 – 7,0 мм), давлений (0,5 – 5,0 атм), содержания кислорода в атмосфере (17% – 21% об.), содержания инертных газов в атмосфере (N<sub>2</sub> = 29% – 79%, He = 0% – 50%).

На основе расчётно-теоретических исследований зажигания и горения крупной капли н-гептана в воздухе при давлении в одну атмосферу и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными в ИХФ РАН разработана запланированная в программе методика экспресс-анализа экспериментальных данных, полученных в ходе КЭ.

В соответствии с результатами расчётов радиационное затухание горячего пламени капли в условиях микрогравитации связано с образованием вокруг капли сферической оболочки из очень мелких (нанометрового диапазона) частиц сажи. Частицы сажи поглощают часть тепловой энергии пламени и излучают её в окружающую среду, приводя тем самым к безвозврат-



Размещение ёмкостей с горючим и газовыми смесями в установке CIR.

ным потерям энергии и прогрессирующему снижению скорости испарения капли и скорости горения паров горючего. Такое прогрессирующее снижение скорости горения паров горючего может привести либо к полному прекращению химической активности в окрестности капли (т. е. к полному погашению пламени), либо к установлению квазистационарного режима беспламенного окисления капли (т. е. к её низкотемпературному окислению с возможными всплесками температуры).



Перчаточный ящик Containerment System.

Физики из ИХФ РАН считают, что здесь следует говорить о беспламенном окислении, а не о «холоднопламенном» горении капли – терминологии, используемой в американской литературе. Опубликованные результаты своих исследований, в том числе в англоязычных изданиях, они предложили мировой научной общественности дискуссии о рассматриваемых процессах и используемой терминологии.

В процессе проведения КЭ выданы научно обоснованные рекомендации по изменению режимов его выполнения. Предложения обоснованы не только расчётами, но и известными экспериментальными данными по идентификации холодных, голубых и горячих пламен. Так, например, была выдана рекомендация регистрировать свечение возбуждённого формила HCO\* (полоса Вайда, 329,8 нм) и возбуждённого гидроксидила OH\* (306,4 нм), что позволяет точно идентифицировать природу излучателя – голубое пламя.

Полученные экспериментальные данные используются как для разработки, так и для верификации детальных, сокращённых и глобальных кинетических механизмов окисления и горения н-додекана, 2,6,10-триметилдодекана и 2,2,4,6,6-пентаметилгептана.

Специалисты ИХФ РАН отмечают, что в техническом плане данные, полученные в ходе КЭ, способны помочь выделить острые проблемы и расставить приоритеты технических специалистов в ходе создания установок, связанных с процессами горения в невесомости. В частности, эксперимент показал, что на первый план его технического обеспечения следует отнести разработку горе-

ственное влияние на ход эксперимента, с другой – их ремонтпригодность, как показал ход выполнения КЭ, выше, чем компонентов экспериментальной установки, реализующих функции горелок.

Наконец, в плане опыта, полученного в ходе эксперимента, следует отметить важность учёта вопросов перепрограммирования работы регистрационных устройств, в частности видеокамер, осуществляющих документирование КЭ. Данные вопросы возникают достаточно часто в различных экспериментах и требуют определённых временных затрат на устранение.

В результате выполнения КЭ «Зарево» были получены высокие научные результаты: физики из ИХФ РАН теоретически предсказали явление беспламенного горения и получили экспериментальное его подтверждение, исследовали процессы сажеобразования, предложили научному сообществу дискуссии по интерпретации полученных экспериментальных данных, связанную с различием в использовании терминов «беспламенное» и «холоднопламенное» горение.

Не менее важным является технологический и практический опыт работы на сложном современном оборудовании в большом международном проекте. Прецизионный физический эксперимент на пилотируемом космическом аппарате, обслуживаемый человеком, должен быть надёжно изолирован от среды обитания посредством сложной виброизолирующей системы, автоматизации и телеуправления, иметь возможность перепрограммирования ключевых узлов и агрегатов в процессе выполнения КЭ. Имевшие место отказы оборудования и неудачные серии экспериментов – формирование нескольких капель, появление в капле газовых пузырьков, отсутствие зажигания или вылетание горячей капли из поля видимости в процессе регистрации и другие – указали на аспекты дальнейшего совершенствования при проектировании установок для изучения горения.

Верхом достижений по использованию полученного опыта стало бы его применение для разработки технических решений для отечественного научного оборудования. Однако здесь есть масса проблем, ключевая из которых – сроки от разработки до выведения отечественной НА. В науке и технологии очень важен приоритет, здесь как в спорте – кто не первый, тот просто участник.

В настоящее время оборудование MDCA демонтировано, вместо него установлен модуль ACME (Advanced Combustion via Microgravity Experiments), на котором запланировано проведение пяти совместных российско-американских экспериментов по физике горения, в которых примут участие научные группы исследователей из Москвы, Санкт-Петербурга и Владивостока в период 2018–2020 годов.

лок и устройств, которые связаны с формированием пламени. Как показала практика, отказ данных устройств приводит к невозможности продолжать исследования с целым рядом топливных смесей, а ремонтпригодность данных систем весьма низкая.

Следующими по приоритетности в техническом плане следует отметить вопросы, связанные с проектированием устройств поджига горючей смеси. Их значимость обусловлена тем, что, с одной стороны, они оказывают суще-