

ВЛИЯНИЕ НЕВЕСОМОСТИ НА ДИФфуЗИОННОЕ ПЛАМЯ БУТИЛОВОГО СПИРТА

И. М. Абдурагимов

(Москва)

Экспериментальное исследование процессов горения в условиях невесомости, результаты которого кратко изложены в данной статье, проведено нами впервые в 1960 г.¹

Создание обитаемых космических кораблей, рассчитанных на длительное пребывание в условиях глубокого вакуума и полной невесомости, поставили целый ряд новых проблем, к которым относится также изучение механики жидкости и газа в условиях невесомости.

В этих условиях должно проявляться существенное влияние таких сил, как поверхностное натяжение в жидкостях и обусловленное им явление капиллярности; исчезновение конвективных сил в жидкостях и газах, обусловленных разницей плотности, как функции поля температур. Исчезновение архимедовых сил, приводящих к естественной конвекции, как результату разницы плотностей в зависимости от температуры отдельных молей жидкости или газа, становится определяющим в ряде процессов и явлений: например, в процессе газового массообмена в замкнутом обитаемом пространстве или в процессе газового массообмена при диффузионном горении, которое становится в этом случае «чисто» диффузионным или истинно диффузионным. Процесс горения в этих исследованиях не был предметом исследования, а рассматривался, скорее, как наиболее тонкий и чувствительный инструмент для экспериментального изучения механики газа в невесомости.

Для исследования процессов диффузионного горения открытого пламени при нулевой гравитации в наземных условиях был использован принцип свободного падения. Герметичный контейнер, внутри которого помещалась экспериментальная установка, сбрасывался с вышки, высотой 17 м (в контрольной серии опытов 40 м). Контейнер предохранялся от разрушения при помощи свободно уложенного троса и разрывной упругой фалы (рис. 1). Высота свободного падения $h=15$ м (в контрольной серии опытов 30 м), длина пути торможения $h_t=1,5-2$ м. Продолжительность состояния невесомости

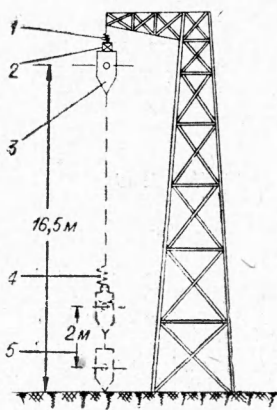


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

1 — разрывная фала; 2 — автомат расценки; 3 — контейнер; 4 — тормозная фала; 5 — путь торможения.

$\tau = \sqrt{\frac{2h}{g}} \approx 1,75-2$ сек. Степень невесомости в конце пути вычислялась по формуле

¹ Аналогичное исследование было выполнено ранее в работе: Н. Isoda, S. Kumagai. Seventh Symposium (International) on Combustion, 1959, 523. Изучая особенности горения каплей жидкости в условиях невесомости, авторы получили согласующиеся с некоторыми выводами данной статьи результаты, о приближении формы фронта пламени к сферической, в условиях нулевой гравитации. Однако малые времена экспозиции состояния невесомости не позволили им получить конечные эффекты: самопроизвольное гашение диффузионных пламен и повторное «самовозгорание» при переходе системы в условия повышенной гравитации.

$$\alpha = \frac{c_k + c_b - p_y - p_T}{c_k + c_b},$$

где c_k — вес контейнера с установкой (25 кг); c_b — вес балластного груза (25 кг); p_T — сила сопротивления вытягиваемого троса; $p_y = c_y S \frac{\rho_v v_k^2}{2}$ — сила аэродинамического сопротивления воздуха (c_y — коэффициент аэродинамического сопротивления, S — площадь модуля контейнера; ρ_v — плотность воздуха; v_k — конечная скорость падения контейнера).

В условиях эксперимента $\alpha=0,985$, т. е. система находилась в состоянии почти полной невесомости. Установка представляла собой полужамкнутый газодинамический канал с дренажным клапаном и с «тепловым» или, точнее, с «пламенным» насосом (рис. 2).

Замкнутый газовый канал включал в себя стеклянный участок трубы диаметром 70 мм и высотой 200 мм, доступный для визуального наблюдения и регистрации с вмонтированной миниатюрной спиртовой горелкой. Дренажный клапан позволял частично стравливать продукты сгорания и исключал влияние повышения давления в газовом канале на процесс диффузионного горения. Объем воздуха в канале и содержащийся в нем начальный запас кислорода выбирались с таким расчетом, чтобы обеспечить устойчивое горение (почти без видимых изменений факела пламени) в течение 3–5 сек. Затем факел в течение 5–10 сек

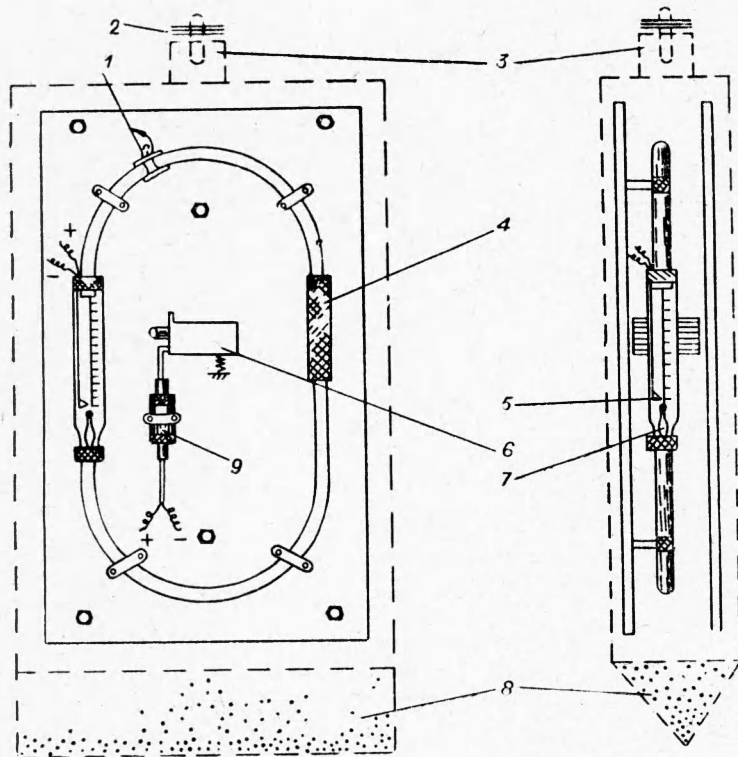
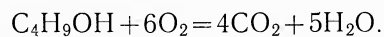


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.
1 — дренажный клапан; 2 — разрывная фаза; 3 — автомат расцепки; 4 — сменный воздушный резервуар; 5 — запал; 6 — кинокамера; 7 — спиртовая горелка; 8 — балластный груз; 9 — автомат включения кинокамеры.

постепенно уменьшался в размерах и полностью гас спустя 15-20 сек (рис. 3).

В качестве горючего применялся бутиловый спирт (C_4H_9OH), горение которого в кислороде (при условии полного сгорания) можно описать уравнением



Конфигурация и внутреннее гидравлическое сопротивление трубопроводов замкнутого контура и конструкции спиртовки подбирались с

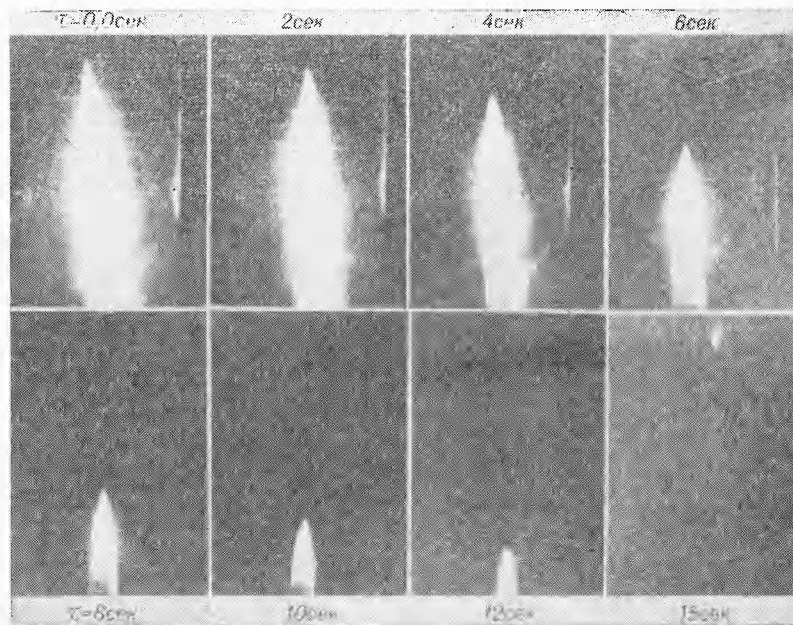


Рис. 3. Последовательные фотографии факела диффузионного пламени спиртовки внутри газового канала, в нормальных наземных условиях ($g=1$).

таким расчетом, что секундный весовой расход спирта при разомкнутом контуре составлял $\sim 0,0125$ г/сек, а при замкнутом — $0,0085$ г/сек. Секундный расход кислорода в установке $\sim 0,021$ г/сек, секундный весовой расход воздуха на выходе из спиртовки равнялся примерно $0,0945$ г/сек или $0,0762$ л/сек.

При общем объеме воздуха в установке $v \approx 1,5$ л время горения спиртовки до полного выгорания кислорода составляет ~ 24 сек, а скорость циркуляции на выходе из спиртовки равна $0,152$ м/сек (при поперечном сечении канала 5 см²).

Реакция горения спирта практически прекращается, как только весовое содержание кислорода в установке снизится до 12-13%. Поэтому время горения пламени на земле должно сократиться примерно до 6-7 сек, но поскольку процесс горения пламени в установке нестационарный, то пламя начинает уменьшаться в размерах и по интенсивности уже с 4-5 сек и гаснет полностью не через 7, а через 15-20 сек (см. рис. 3). В течение первых 2-3 сек пламя меняется незначительно, и за этот промежуток времени процесс горения можно считать стационарным.

Выход продуктов сгорания и сохранения постоянного давления в системе осуществлялись при помощи дренажного клапана. Регистрация интенсивности пламени производилась киносъемкой узкоплоскочной кинокамерой «Киев» со скоростью съемки $48 \div 50$ кадр/сек. Расстояние от оси факела до фокуса объектива 210 мм. Вся экспериментальная установка с кинокамерой, электростанцией и воспламенительным устройством крепилась на плоской панели на специальных амортизаторах, а панель находилась в герметичном светонепроницаемом контейнере.

В условиях невесомости разность плотностей смеси газов над пламенем и ниже уровня пламени не приводит к перемещению «более лег-

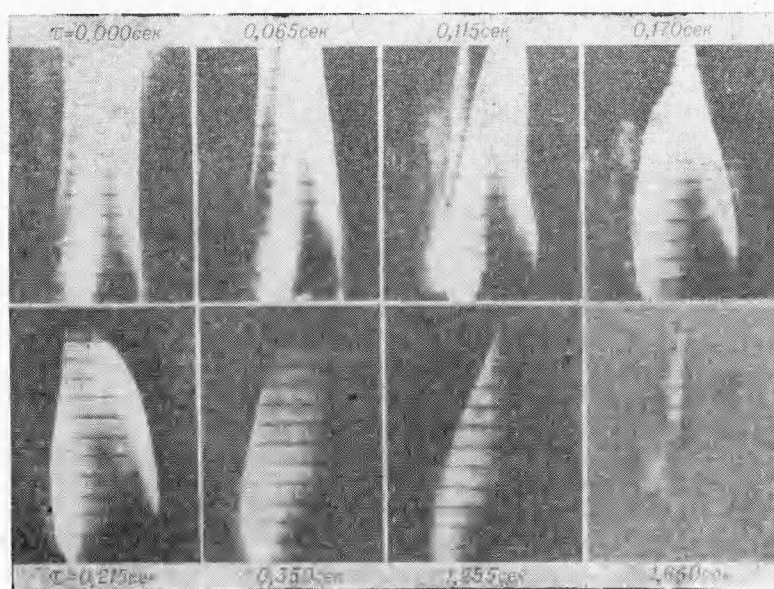


Рис. 4. Последовательные фотографии факела диффузионного пламени спиртовки внутри газового канала в условиях невесомости.

ких» горячих продуктов сгорания вверх и притоку на их место более «тяжелых» холодных масс свежего, богатого кислородом воздуха. В связи с этим пламя с момента наступления состояния невесомости резко изменяется (рис. 4).

Высота факела в течение 1—2 сек до момента сброса остается постоянной и равной ~ 150 — 170 мм; пламя вытянуто, представляет узкий сильно удлинённый язык, интенсивно и поджато сбоку восходящими потоками воздуха (см. рис. 3).

При невесомости длина пламени резко сокращается, интенсивность пламени снижается и его форма становится менее вытянутой. Уже через 0,1—0,2 сек в связи с ослаблением естественной конвекции пламя становится шире вдвое (по диаметру), чем первоначальный факел, а длина факела уменьшается почти вдвое. В дальнейшем этот процесс деформации пламени идет по-разному: в одних случаях пламя продолжает сокращаться по длине и увеличиваться в поперечнике при общем резком снижении его интенсивности и, наконец, почти совсем исчезает через 1,5 сек.

Это происходит в тех случаях, когда за счет исчезновения сил естественной конвекции прекращается доступ к пламени свежего воздуха

с богатым (до 21% по весу) содержанием кислорода и процесс горения замедляется и, наконец, прекращается вовсе.

Такой процесс затухания факела в условиях невесомости через 1,5—2 *сек* очень сходен с обычным затуханием этого же факела в нормальных условиях, но при наступлении «кислородного голодания» в системе на 15:20 *сек* горения. В условиях невесомости этот процесс наступает значительно быстрее, сразу же, как только начнет снижаться содержание кислорода в непосредственном окружении пламени, т. е. в части объема стеклянной колбы, равной примерно первоначальной длине факела пламени. В других случаях процесс горения с наступлением состояния невесомости протекает несколько иначе, когда весь объем колбы заполнен более или менее равномерно перемешанной смесью паров бутилового спирта с воздухом. Тогда в момент наступления состояния невесомости пламя сначала слегка уменьшается по длине, увеличиваясь как и в первом случае в поперечнике, а затем значительно увеличивается в объеме, резко снижая свою интенсивность. Пламя как бы вспыхивает по всему объему из-за отсутствия формирующего «поджигающего» действия восходящих струй воздуха, однако интенсивность его тотчас очень резко падает, оно становится менее плотным, слабо светящимся «холодным пламенем» и вскоре так же, как и в первом случае, быстро убывает, исчезая почти полностью через 1,5—1,7 *сек*. Как показала киносъемка факела пламени, в «нормальных земных условиях», т. е. до момента сброса контейнера, интенсивный узкий факел пламени шириной 25:30 *мм* и высотой 150—170 *мм* имел вытянутую форму, которая сохранялась неизменной в течение 2—3 *сек* (см. рис. 3). С момента наступления состояния невесомости (и обусловленного этим исчезновения естественной конвекции) интенсивность факела пламени резко снижалась, а его геометрическая форма значительно изменялась (см. рис. 4). Уже через 0,1—0,2 *сек* высота пламени резко сокращалась (в 2—3 раза), поперечное сечение факела несколько увеличивалось, пламя становилось значительно менее интенсивным, слабо светящимся, примерно таким, каким оно становилось в условиях гравитации при внезапном введении в зону реакции нейтральных газов, когда начинает сказываться снижение парциального давления кислорода в системе, по мере его разбавления или израсходования.

В условиях невесомости это пламя гасло полностью уже через 0,8—1,2 *сек* (в то время, как в нормальных условиях оно горело 15—20 *сек*). В момент торможения, когда вся система попала в условия повышенной гравитации, доходящей до 5:7*g*, пламя резко вспыхивало (если не успело полностью погаснуть), а интенсивность горения существенно повышалась, и факел пламени удлинялся до размеров, выходящих за пределы кадра. (Это свидетельствует о том, что в системе еще есть кислород для интенсивного горения бутилового спирта.) По мере снижения перегрузки и перехода всей системы в условия нормальной гравитации форма факела пламени стабилизировалась. Факел достигал первичных размеров и приобретал форму, соответствующую условиям $g=1$, как в начале эксперимента (до сброса контейнера), что также свидетельствует о достаточности O_2 в системе. В некоторых экспериментах пламя на спиртовке возникало вновь и после его полного погасания в условиях невесомости (происходило как-бы «самовоспламенение» спиртовки).

Для объяснения механизма повторного воспламенения спиртовки была поставлена дополнительная серия контрольных опытов с продолжительностью состояния полной или частичной невесомости порядка 2,6—3 *сек* (сброс контейнера с установкой производился с высоты

$h = 40$ м). Эти опыты подтвердили, что в условиях невесомости диффузионное пламя бутилового спирта полностью гаснет через 0,8—1,2 сек за счет израсходования кислорода в зоне реакции. Повторное воспламенение, видимое как «самовоспламенение» фитиля спиртовки, происходит в тех случаях, когда поле температур в зоне, где проходит реакция горения за счет кондуктивной теплопроводности смеси газов и термодиффузии без конвекции, не успевает выравняться с окружающим пространством, а температура среды в этой зоне не успевает снизиться ниже температуры поджигания паровоздушной смеси бутилового спирта.

Таким образом, экспериментально доказана невозможность существования открытого диффузионного пламени в условиях невесомости (при исчезновении естественной конвекции газов), а также подтвержден механизм гашения диффузионного пламени в этих условиях за счет «кислородного голодания» в зоне реакции горения.

УДК 536.46

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Г. Д. Саламандра

(Москва)

Взросший в последние годы интерес к физическим методам воздействия на процесс горения обусловлен как задачами, связанными с генерированием электроэнергии при движении ионизированного газа в магнитном поле, так и проблемами, поставленными ракетной техникой.

Работа посвящена исследованию особенностей распространения пламени в поперечном электрическом поле. Исследовалось влияние электрического поля на структуру и скорость распространения пламени в горизонтальной трубе, наполненной метано-воздушной смесью, содержащей 10% CH_4 и 90% воздуха, при поджигании смеси у открытого конца трубы.

Использованная методика (скоростная съемка методом Теплера, включающая в себя получение цветных теплерограмм на приборе ИАБ-451, визуализация движения газа перед фронтом пламени) позволила получить более полную информацию о влиянии электрического поля на процесс горения.

Опыты проводились в трубе квадратного сечения 36×36 мм², изготовленной из органического стекла, длиной 600 мм. Поперечное электрическое поле создавалось между латунными пластинами размером 450×60 мм², смонтированными в тело трубы на расстоянии 60 мм друг от друга. Один конец трубы закрывался фланцем, на котором крепился вентиль для откачки из трубы воздуха и наполнения ее горючей смесью. Второй конец трубы закрывался пленкой, которая непосредственно перед опытом удалялась, обеспечивая свободный выход продуктов реакции в атмосферу. Процесс распространения пламени регистрировался через оптические стекла длиной 200 мм, установленные таким образом, что можно было просматривать все сечение трубы. Фотогра-