

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 $h_t = 1,5 \div 2$ м. Продолжительность состояния невесомости

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

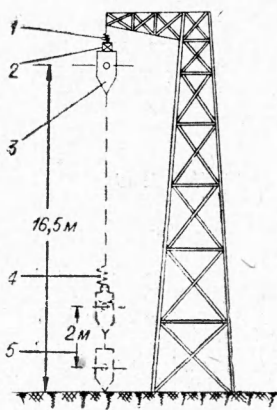


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

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

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

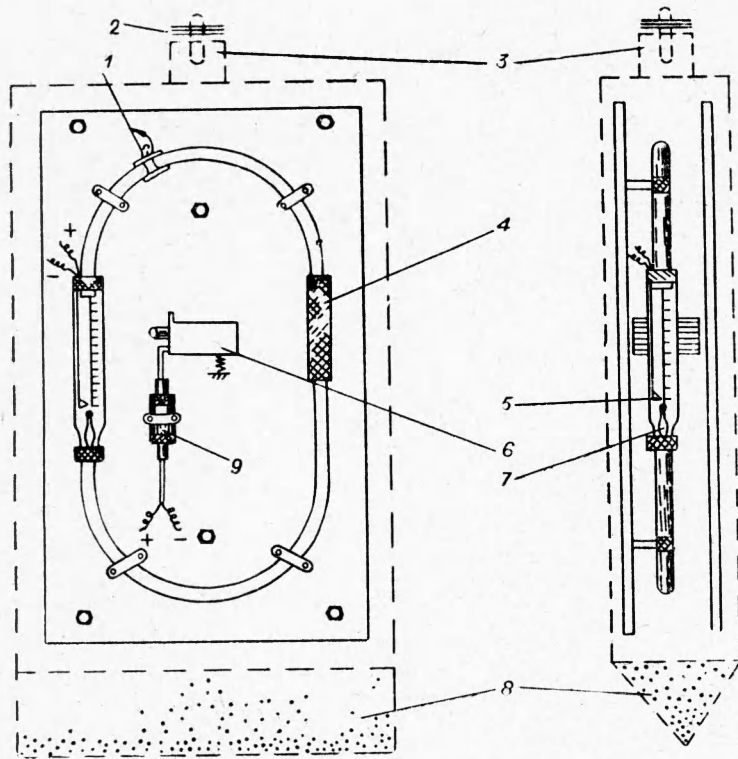
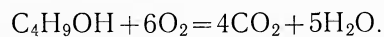


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.
1 — дренажный клапан; 2 — разрывная фаза; 3 — автомат расцепки; 4 — сменный воздушный резервуар; 5 — запал; 6 — кинокамера; 7 — спиртовая горелка; 8 — балластный груз; 9 — автомат включения кинокамеры.

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

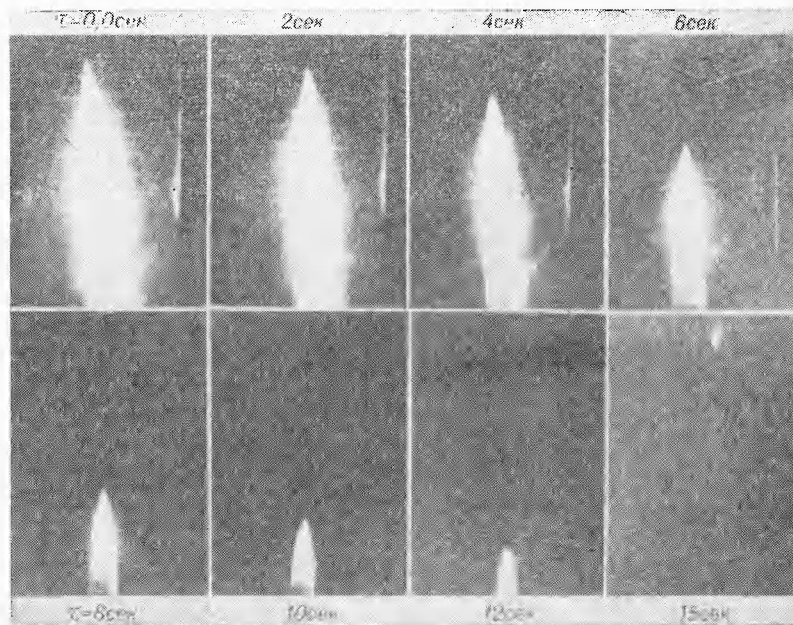


Рис. 3. Последовательные фотографии факела диффузионного пламени спиртовки внутри газового канала, в нормальных наземных условиях ($g=1$).

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-

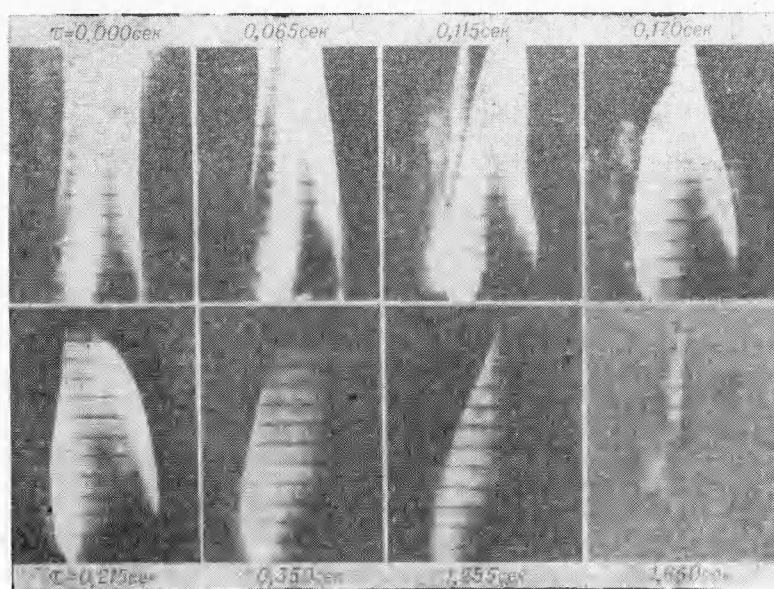


Рис. 4. Последовательные фотографии факела диффузионного пламени спиртовки внутри газового канала в условиях невесомости.

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 5:7g, 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

