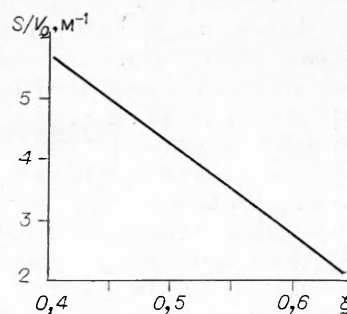


Рис. 3. Изменение отношения поверхности теплоотдачи и объема охлаждаемого газа от порозности слоя.



и давлении 0,4 МПа значения  $Re$  в 3 раза меньше  $Re_{кр}$  для стационарного слоя. Причем с ростом температуры  $Re$  существенно увеличивается. Расчет значения  $Re$  для псевдоожигенного слоя проведен с использованием величины эквивалентного диаметра, рассчитанной по приведенной выше формуле с учетом  $\varepsilon$ , соответствующей определенной величине  $L$ .

Эффект гашения пламени обусловлен теплоотдачей от газа к слою и описывается уравнением

$$q = a(T_{г} - T)/(S/V_0),$$

где  $S/V_0$  — отношение поверхности теплоотдачи псевдоожигенных частиц и объема охлаждаемого газа;  $a$  — коэффициент теплообмена;  $T_{г}$  — температура пламени;  $T$  — температура частиц.

В условиях данного эксперимента, например, для псевдоожигенного слоя с  $\varepsilon = 0,63$  при  $L = 0,05$  м и  $T = 293$  К  $S/V_0 = 2,5$  м<sup>-1</sup> (рис. 3). Для стационарного слоя шариков с критическим диаметром каналов (диаметр шаров  $9,3 \cdot 10^{-3}$  м)  $S/V_0 = 6,2$  м<sup>-1</sup>. Таким образом, поверхность теплопередачи в псевдоожигенном слое в 2,5 раза меньше, чем у стационарного слоя. Этим в известной степени объясняется ухудшение гасящих свойств псевдоожигенного слоя по сравнению со стационарной насадкой.

Поступила в редакцию 8/XII 1982,  
после доработки — 24/X 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Гликин, Л. М. Савицкая и др. ФГВ, 1979, 15, 1.
2. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 1.
3. М. Э. Аэров, О. М. Тодес, О. А. Наринский. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979.
4. И. И. Стрижевский, В. Ф. Заказов. Промышленные огнепреградители. М.: Химия, 1974.
5. Flame Proof Enclosure of Electrical Apparatus. British Standards Institution. London, 1957, 229.
6. К. Akita. Nemprio Kekaisi, 1968, 47, 492.
7. С. А. Wilson. Ind. Eng. Chem., 1959, 51.
8. А. И. Розловский. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1980.

### ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВА

В. П. Самсонов  
(Чебоксары)

Процесс распространения ламинарного диффузионного пламени по поверхности горючего материала в неподвижной окислительной среде полностью определяется способом поступления реагентов в зону горения и механизмом передачи тепла из зоны горения впереди пламени. В настоящее время не достигнуто отчетливого понимания того, какой из способов переноса массы и энергии впереди пламени является основным: диффузия, свободная конвекция, теплопроводность или излучение [1, 2]. Такая неосведомленность имеет место даже в простейшем случае пренебрежимо малого влияния гравитации [1].

Анализ результатов исследования влияния невесомости [3] и ориентационных эффектов [4] при распространении пламени по поверхности полимера свидетельствует о том, что гравитационные условия во многом определяют не только скорость распространения пламени, но и его устойчивость, нарушение которой проявляется спонтанно в виде осцилляции светимости, формы пламени и поля скоростей в области над зоной пиролиза [5, 6]. Общий теоретический подход к объяснению устойчивости пламени над поверхностью горючего материала дан в работах [7—10], где получены критерии устойчивости и показано, в частности, стабилизирующее влияние силы тяжести. Тем не менее физическая природа причин, вызывающих неустойчивость пламени, осталась до конца непонятой.

В экспериментальном плане критические явления горения, сопровождающиеся неустойчивостью пламени и вызываемые изменением сил гравитации (например, в условиях невесомости), изучены совершенно недостаточно [11]. Необходимость проведения экспериментов в условиях невесомости подчеркивается авторами работ [12, 13], где невесомость рассматривается как инструмент для выяснения роли свободной конвекции и как единственное средство проверки теорий, развитых, как правило, в предположении отсутствия сил тяжести.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование распространения пламени по поверхности топлива в невесомости и в нормальных гравитационных условиях. Влияние тепловой гравитационной конвекции на скорость распространения и устойчивость пламени выявлялось сравнением экспериментальных результатов, полученных при изменении гравитационных условий и одинаковых прочих внешних условиях.

Опыты проводили на экспериментальной установке, описание которой дано в работе [14]. Невесомость создавалась при свободном падении контейнера с находящимся внутри него исследуемым объектом. Продолжительность состояния невесомости составляла 0,55 с. В момент прохождения контейнером рабочего поля между коллиматором и приемной частью прибора ИАБ-451, работавшего в режиме поляризационного интерферометра сдвига, визуализировалась интерференционная картина процесса, которая регистрировалась скоростной кинокамерой СКС-1М. Проводилась также прямая съемка свечения пламени с помощью кинокамеры Киев-16С, крепившейся непосредственно к контейнеру.

В качестве горючего материала использовали клеи серии БФ, представляющие собой спиртовые растворы фенолоформальдегидной смолы, совмещенной с поливинилбутиралем [15]. После нанесения клея на подложку вследствие испарения спирта образовывалась пленка, скорость распространения пламени по поверхности которой сильно зависела от времени сушки клея. Это позволяло, с одной стороны, добиваться значений скоростей распространения пламени меньших, чем скорость конвективного подъема продуктов горения, что обеспечивало получение заметных эффектов влияния невесомости, с другой — создавать условия, соответствующие распространению пламени по поверхности жидкого топлива либо полимера.

Подложка, на которую наносился клей слоем толщиной до 2 мм, представляли собой плексигласовую пластину длиной 10 см и поперечным сечением  $1 \times 1$  см. В тело подложки вмонтированы термопары. Спаи термопар размером 50 мкм выступали над поверхностью слоя клея на высоте около 1,5 мм. Подложку устанавливали на платформе, находившейся внутри сбрасываемого контейнера. Поверхность клея поджигали электрической искрой от электродов, укрепленных на платформе.

В начальной серии экспериментов по интерферограммам наблюдали за полем концентрации паров спирта над поверхностью сохнущего клея. Расчет концентрации паров спирта в воздухе в непосредственной близости от поверхности давал возможность определить то время сушки клея, при котором происходило выгорание преимущественно вещества образовавшейся пленки, а не паров спирта.

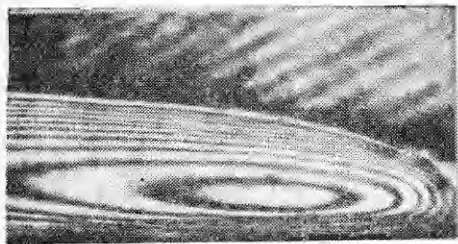


Рис. 1.

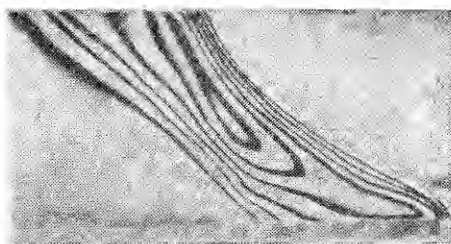


Рис. 2.

Результаты расчета интерферограмм показали, что при длительности сушки клея, равной 50 с, максимальная концентрация паров спирта у поверхности оказывалась ниже бедного предела воспламенения смеси паров спирта с воздухом, равного 3,3% [16]. При времени сушки клея, гораздо меньшем 50 с, концентрация паров спирта у поверхности клея достигала значений, существенно превышающих нижний предел воспламенения, поэтому при поджигании поверхности клея происходило быстрое распространение кинетического пламени по спиртовоздушной смеси со скоростью, большей скорости конвективного подъема продуктов горения. В качестве примера на рис. 1 представлена интерферограмма пламени, распространяющегося слева направо со скоростью около 1 м/с. Заметной разницы при горении в нормальных гравитационных условиях и в невесомости в этом случае не наблюдалось.

Влияние тепловой гравитационной конвекции начинало заметно сказываться при скоростях распространения пламени, сравнимых со скоростью конвективного подъема продуктов горения. Рис. 2 иллюстрирует интерференционную картину распространения пламени в нормальных гравитационных условиях по спиртовоздушной смеси над поверхностью клея, сохшего 40—45 с. Скорость распространения пламени 25 см/с, а скорость свободноконвективного течения 18 см/с. На фотографии видно, что горение локализовано в узкой области, образованной за фронтом поднимающимися под влиянием подъемных сил продуктами горения. Справа эта область ограничена еще не сгоревшей смесью, слева — вследствие полного выгорания паров спирта — смесью, еще неготовой к горению. При определенных скоростях распространения пламя, пройдя через всю длину подложки, двигалось в обратном направлении по успевающей вновь образоваться спиртовоздушной смеси. Таким образом, устанавливался релаксационный режим горения. Эксперименты в условиях невесомости показали, что в отсутствие сил тяжести релаксационное горение невозможно. Это объясняется, очевидно, тем, что тепловыделение из высокотемпературной зоны продуктов реакции, остающейся вблизи поверхности, вызывает интенсивное испарение вещества клея, достаточное для поддержания горения за фронтом пламени.

Чисто диффузионный режим распространения пламени осуществлялся тогда, когда время сушки клея превышало 50 с. В этом случае распространение пламени по поверхности образовавшейся полимерной пленки происходило за счет испарения вещества пленки впереди пламени, последующего смешения горючих паров с окружающим воздухом и их воспламенения. Визуально такое пламя наблюдалось в виде слабосветящейся бледно-голубой области, нижний край которой находился на расстоянии 2,0 мм от поверхности пленки. Анализ интерференционных фильмов, снятых в большой серии экспериментов в условиях невесомости, показал, что процесс распространения диффузионного пламени в отсутствие сил тяжести всегда стационарен, а само пламя ламинарно и устойчиво. Фрагмент из интерференционного фильма, иллюстрирующий распространение пламени в невесомости по поверхности клея, подвергавшегося сушке 2 мин, показан на рис. 3.

Поведение пламени в нормальных гравитационных условиях при тех же прочих условиях опыта резко изменяется. Пламя теряет устойчивость,

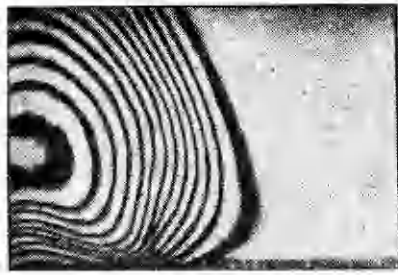


Рис. 3.

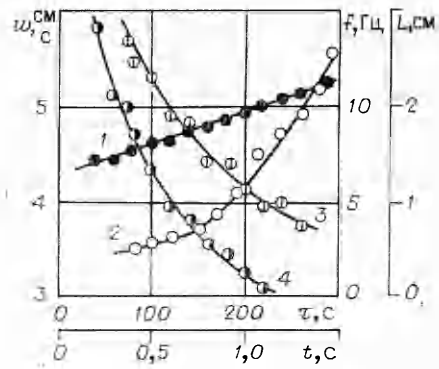


Рис. 5.



Рис. 4.

его структура становится сложной и строго периодически повторяющейся. Это наглядно иллюстрируется на рис. 4 несколькими кадрами из интерференционного фильма, фиксирующими один период колебаний пламени. Время, указанное на фотографиях, отсчитывалось от момента воспламенения поверхности пленки. Как видно на фотографиях, неустойчивость пламени проявляется в том, что на передней кромке пламени в нижней части образуется небольшая локализованная область горячего газа, которая, разрастаясь, уносится подъемными силами вверх. При этом во фронте пламени образуется восходящая струя продуктов горения, которая к концу периода обрывается, и в ее нижней части появляется новый очаг. Затем процесс повторяется. В целом картина неустойчивости внешне напоминает описанное в [17] образование вихревого движения перед фронтом пламени в условиях земной гравитации. В [17] показано также, что область вихревого движения в условиях отсутствия сил тяжести не возникает, что согласуется с результатами настоящей работы.

На рис. 5 представлены графики зависимостей частоты колебаний пламени  $f$  (кривая 1) и размера очага на носике пламени (кривая 2) от времени. Из графиков видно, что по мере движения пламени вдоль подложки частота колебаний возрастает с 7 до 11 Гц, при этом возрастает и размер очага. Частота колебаний, по-видимому, определяется скоростью свободноконвективного течения, поэтому рост частоты колебаний объясним увеличением длины области, охваченной горением, так как при этом возрастает значение числа Грасгофа, характеризующего скорость конвективного подъема продуктов горения. Увеличение же размеров очага связано, очевидно, с развитием восходящей конвективной струи продуктов горения.

Кроме наблюдений за интерференционной картиной пламени проводилось фотометрирование его светимости с помощью фотодиода ФД-3, сигнал с которого поступал на вход осциллографа С1-74. Несмотря на то, что применялись различные варианты слежения за светимостью на носике пламени, колебаний светимости не обнаружено. Фиксирование температуры термопарой также показало отсутствие колебаний температуры в пограничном слое у поверхности. Отсутствие колебаний светимости можно объяснить тем, что изменение температуры в колеблющейся восходящей струе продуктов горения, визуализированной с помощью чувствительного интерференционного метода, ниже порога излучательной способности горячих продуктов горения. Неизменность же температуры в пограничном слое над поверхностью свидетельствует о том, что неустойчивость пламени проявляется в газовой фазе далеко за пределами пограничного слоя.

По фильмам прямой съемки свечения пламени и интерференционным фильмам измеряли скорости распространения пламени в невесомости и в нормальных гравитационных условиях. Результаты измерения скоростей представлены на рис. 5 в виде графиков зависимостей скорости распространения от времени сушки клея  $\tau$  (кривая 4 соответствует распространению пламени в нормальных гравитационных условиях, а кривая 3 — в невесомости). Расположение кривых на графике свидетельствует о том, что в условиях невесомости скорость распространения всегда выше, причем для медленных пламен разница в скорости распространения увеличивается. Это связано с тем, что в невесомости отсутствуют свободноконвективные теплопотери, поэтому испарение топлива с поверхности на передней кромке пламени происходит более интенсивно. Скорость поступления испаряющегося горючего в зону реакции и определяет скорость распространения бедного диффузионного пламени.

Приведенные результаты расходятся с ранее полученными в работах [3, 18], где обнаружено уменьшение скорости распространения пламени в невесомости. Кроме того, в [18] предполагалось, что, поскольку свободная конвекция в невесомости отсутствует, диффузионное пламя с течением времени должно погаснуть из-за недостатка кислорода, поступающего из окружающей среды только за счет диффузии. Для диффузионного пламени, стабилизированного на горелке и неподвижного относительно окружающей среды, такое предположение справедливо. Однако для пламени, движущегося с некоторой скоростью  $w$  по поверхности топлива, оно является спорным, так как помимо кислорода, поступающего в зону реакции за счет диффузии, имеется массовый поток кислорода, равный  $\rho w \gamma$  (здесь  $\rho$  — плотность окружающей среды,  $\gamma$  — объемная концентрация кислорода в окружающей среде). Таким образом, количество поступающего в зону реакции кислорода есть функция скорости распространения пламени, и, следовательно, должно существовать некоторое критическое значение скорости, когда необходимого для поддержания стационарного распространения пламени количества кислорода будет достаточно.

*Поступила в редакцию 27/VI 1983,  
после доработки — 10/X 1983*

## ЛИТЕРАТУРА

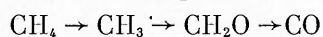
1. W. A. Sirignano. Comb. Sci. and Technol., 1972, 6, 1—2, 95.
2. В. Л. Ефремов, Б. Я. Колесников.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1980.
3. А. С. Мелихов, В. И. Потякин. Там же.
4. T. Kashiwagi, D. L. Newman. Comb. Flame, 1976, 26, 2, 163.
5. M. Sibulkin, A. G. Hansen. Comb. Sci. and Technol., 1975, 10, 1—2, 85.
6. W. J. Chan, J. S. J'ien. Comb. Sci. and Technol., 1978, 18, 3—4, 139.
7. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 6, 240.
8. В. Г. Левич. Докл. АН СССР, 1956, 109, 5, 975.
9. С. К. Асланов. Докл. АН УССР, 1976, А, 5, 406.
10. А. С. Плешанов. ФГВ, 1979, 15, 3, 32.
11. Р. М. Асеева, Г. Е. Заиков. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981.
12. A. L. Berlad. Mater. Sci. Space Appl. Space Process. 1977.
13. C. Huggett.— In: Combust. Exp. Zero-Grav. Labor. New York, 1981.
14. В. П. Самсонов, С. А. Аbruков и др. ФГВ, 1982, 18, 6, 45.
15. Д. А. Кардашов. Синтетические клеи. М.: Химия, 1976.
16. В. Иост. Взрывы и горение в газах. М.: ИЛ, 1952.
17. Г. М. Махвиладзе, С. Б. Щербак. ФГВ, 1980, 16, 4, 30.
18. A. H. Kimzey. Inst. of Environmenta Scienses, 1966.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКИСЛОВ АЗОТА В ДИФфуЗИОННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПЛАМЕНАХ МЕТАНА

*Р. С. Тюльпанов, С. А. Михальчук*  
(Ленинград)

В [1] показано, что параметры потока влияют на образование окислов азота при горении водорода в воздухе. В настоящей работе предпринято расчетное исследование этого вопроса применительно к метану, скорость горения которого в воздухе меньше, чем водорода.

Для описания кинетики высокотемпературного окисления метана всеобщее признание получил механизм, представляющий эту реакцию как цепную с вырожденным разветвлением [2, 3]. Основная цепь состоит в последовательном отрыве атомов водорода от молекулы метана по схеме



с последующим окислением до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Разветвление осуществляется так же, как и для водорода, через образование активных атомов Н, О и радикала ОН.

В работах [4, 5] проведена проверка известных схем окисления метана по нескольким экспериментальным параметрам. В частности, одной из удачных схем для давления выше атмосферного является схема [6].

При выборе конкретной схемы окисления  $\text{CH}_4$  необходимо учитывать условия протекания реакций и цель расчетных исследований. Для пламен метана в топочных устройствах характерны окислительная среда, высокий уровень температур и давлений. В этих условиях для оценки образования окислов азота, в соответствии с работами [4, 6], составлена рабочая схема окисления метана, включающая наиболее важные реакции в основной реакционной зоне.

В отличие от схемы, рекомендованной для этих условий в [6], в настоящей работе не включена реакция образования  $\text{HO}_2$ . Введение этой реакции в кинетическую схему в высокотемпературной области все еще остается проблематичным из-за отсутствия четких экспериментальных доказательств как в [6], так и в других работах. Также следует отметить, что в настоящей работе в отличие от схемы [7] для высокотемпературного