

ется главным образом физико-химическими свойствами взрывоопасной смеси.

Оценим время формирования минимального ядра пламени водородо- и метановоздушных взрывоопасных смесей. Согласно данным работы [7], для водородовоздушной смеси можно принять $E = 0,013$ мДж, а значения физических параметров при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ и $T_r = 2300$ К равны: $\lambda = 155,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), $c_p = 1,944 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $\rho = 0,111$ кг/м³; для метановоздушной смеси $E = 0,29$ мДж, а $\lambda = 116,0 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), $c_p = 1,475 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $\rho = 0,167$ кг/м³ при $\alpha = 1,2$ и $T_r = 2000$ К. По формуле (9) при $n = \infty$ получено для водородовоздушной смеси $\tau_{кр} = 9,83$ мкм, для метановоздушной смеси $\tau_{кр} = 113$ мкс. Эти величины $\tau_{кр}$ имеют один порядок со временем химической реакции во фронте пламени этих смесей [7].

Согласно экспериментальным данным работы [1], время формирования минимального ядра пламени в метановоздушной смеси при $\alpha = 0,8 \div 1,2$ практически постоянно и составляет 140 мкс.

В [2] исследовали зажигание газоздушных смесей наиболее легко-воспламеняемого состава электрическими разрядами размыкания; для метановоздушной смеси найдено $\tau_{кр} = 100 \div 120$ мкс, а для водородовоздушной смеси $\tau_{кр} \sim 10$ мкс.

При сравнении расчетных и экспериментальных значений $\tau_{кр}$ видно не только качественное согласие с экспериментом, но и сравнительно хорошее количественное совпадение.

Поступила в редакцию 24/IV 1983,
после доработки — 25/I 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. D. R. Zintin, E. R. Wooding. Brit. J. Appl. Phys., 1959, 10, 159.
2. В. С. Кравченко, А. Т. Ерыгин, В. П. Яковлев. ФГВ, 1973, 9, 4, 603.
3. А. Е. Погорельский. Взрывобезопасное электрооборудование, 1974, 10, 25.
4. А. П. Амосов. Докл. АН СССР, 1978, 243, 3, 673.
5. Я. Б. Зельдович, И. Н. Симонов. — Физическая химия, 1949, XXIII, 11, 1361.
6. Л. Р. Ингерсолл, О. Д. Зобель, А. К. Ингерсолл. Теплопроводность, ее применение в технике и геологии. М.—Л.: Машгиз, 1959.
7. В. А. Бондарь, В. И. Вережкин, А. И. Гескин и др. Взрывобезопасность электрических разрядов и фрикционных искр. М.: Недра, 1976.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ИМПУЛЬСНОМ ПОЛЕ УСКОРЕНИЙ

В. П. Самсонов
(Чебоксары)

Исследование поведения пламени под воздействием ускорения необходимо для более глубокого понимания процессов неустойчивого горения, объяснения концентрационных пределов распространения и т. д. Полное теоретическое описание влияния ускорения пока еще затруднительно, так как данные о поведении пламени при внезапном ускорении отсутствуют [1]. Распространение пламени в условиях перегрузок, осуществлявшихся на центрифугах, экспериментально изучали в работах [2—5]. При этом не учитывали влияние перегрузок на форму, структуру, линейную скорость движения и устойчивость пламени [3]. Кроме того, для традиционного метода центрифугирования характерен существенный недостаток — вдоль радиуса вращения образуется линейный градиент ускорения, что приводит к сложным радиальным движениям свежего газа и продуктов горения и может вызвать турбулизацию или гашение пламени [4].

Цель настоящей работы — изучение закономерностей изменения скорости и формы пламени, первоначально распространявшегося в невесо-



Рис. 1.

мости в полуоткрытой трубе, в импульсном поле ускорений, когда ускорение в каждой точке реакционной трубы принимает одинаковые значения.

Экспериментальная установка описана в [6]. Невесомость создавалась при свободном падении тяжелого контейнера, внутри которого вертикально располагалась реакционная труба. Размеры канала менялись от $2,7 \times 2,7$ до $6,0 \times 6,0$ см при длине 55 см. Перегрузки возникали при торможении поступательно двигавшегося контейнера резиновыми амортизаторами, причем при полной остановке контейнер не фиксировался. Пламя визуализировалось кинокамерой «Киев-16С», непосредственно крепившейся к контейнеру. Начало появления перегрузок и их прекращение отмечалось на киноплёнке в виде яркой точки, возникающей при попадании луча лазера в момент прохождения контейнером определенного положения. С целью расчета величины ускорения в каждый момент времени падение контейнера снималось скоростной кинокамерой СКС-1М.

Для предотвращения теплораспространения неустойчивости пламени использовали лишь бедные пропановоздушные смеси, которые поджигали у верхнего либо у нижнего открытого конца трубы, что позволяло пламени распространяться в различных направлениях относительно вектора ускорения.

Рис. 1 иллюстрирует распространение пламени против вектора сил тяжести (вверх) в начальный период после появления перегрузок. Указанное на фотографиях время отсчитывали от момента появления перегрузок, скорость съемки — 32 кадр/с. Видно, что возникающий вследствие торможения трубы поток холодной смеси и продуктов горения сносит пламя к открытому концу трубы. В работе [7] показано, что в случае движения жидкости между параллельными плоскостями, при наличии градиента давления, меняющегося по гармоническому закону со временем, когда расстояние между стенками много больше толщины пограничного слоя, скорость жидкости вдоль сечения почти постоянна и заметно меняется лишь в узком пристеночном слое. Этим объясняется тот факт, что форма пламени в начальный период после появления перегрузок не меняется. К моменту времени 0,12 с образующееся у конца трубы разрежение вызывает поток холодной смеси и продуктов горения, направленный к закрытому концу. Одновременно в продуктах горения быстро развивается конвективное течение. Его скорость через $\sim 0,15$ с превышает скорость потока холодного газа, и пламя, значительно вытягиваясь под действием конвекции в сторону распространения, продолжает движение к закрытому концу трубы.

На рис. 2, 1 показано изменение скорости распространения пламени u после воздействия импульсного ускорения, а кривая 2 характеризует развитие одиночного импульса ускорения во времени. За положительное направление u выбрано направление от открытого конца трубы. Отложенное по оси ординат значение g/g_0 определяет отношение ускорений в реакционной трубе и свободного падения. Длительность импульса ускорения составляет 0,3 с, а величина максимальной амплитуды достигает $8g_0$. При этом изменение скорости пламени оказывается равным 60 см/с.

Типичные картины, иллюстрирующие деформацию пламени в последующий после показанного на рис. 1 период времени, представлены на рис. 3. Через 0,33 с, когда амплитуда импульса ускорения уменьшается до нуля, на поверхности пламени в центральной части образуется вмятина, которая постепенно углубляется и расширяется, образуя воронку.

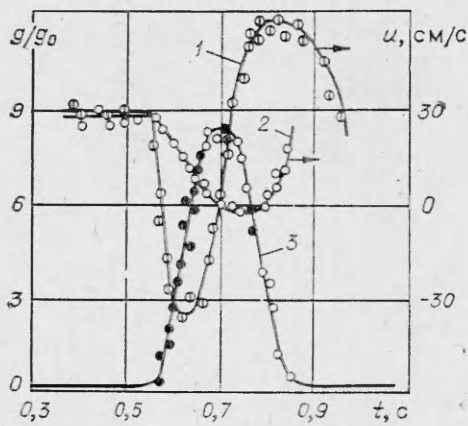


Рис. 2.

импульсное ускорение, направленное в сторону среды с меньшей плотностью, устанавливает такое поле течения, которое стремится перевернуть исходный профиль фронта пламени. При этом время задержки между началом взаимодействия и моментом, когда достигается максимальное искривление фронта пламени, имеет порядок $\lambda/\Delta v$, где λ — длина волны возмущения; Δv — изменение скорости столба газа за время воздействия ускорения при его постоянном значении. Из рис. 2, 1 следует, что $\Delta v \sim 60$ см/с. За длину волны возмущения следует брать ширину канала трубы, так как образующаяся воронка занимает все поперечное сечение канала. Оценка времени задержки дает величину порядка 0,1 с, что, как видно из рис. 3, согласуется с полученными экспериментальными данными. Точно найти время задержки трудно, так как необходимо учитывать влияние быстро развивающейся конвекции, оказывающей стабилизирующее влияние на фронт пламени.

На рис. 4 представлены фрагменты из фильма, иллюстрирующего распространение пламени вниз от открытого конца. Кривая 2 на рис. 2 показывает изменение видимой скорости пламени. Из графика следует, что к моменту достижения максимального значения перегрузки $u = 0$, а само пламя становится практически плоским. Однако плоским фронт не сохраняется: на нем быстро развиваются мелкомасштабные возмущения, которые в дальнейшем укрупняются. Возможно, что они обязаны колебаниям газа акустической природы, вызванным торможением контейнера, и, таким образом, проявляется гидродинамическая неустойчивость плоского фронта пламени по Ландау.

Необходимо отметить, что эффективность влияния импульсного ускорения как на устойчивость фронта пламени, так и на скорость его рас-



Рис. 3.



Рис. 4.

Подобная реакция пламени на импульсное воздействие ускорения полностью аналогична имеющей место при прохождении слабой ударной волны через пламя [8]. Наблюдаются лишь некоторые различия в форме, ширине воронки и скорости ее образования, которые зависят от интенсивности воздействия ускорения на пламя.

В [8] показано, что образование воронки в центре пламени под влиянием импульсного ускорения можно объяснить, используя результаты анализа тейлоровской неустойчивости поверхности контакта двух жидкостей, описанные в [9]. Согласно [8],

пространения уменьшилась с размером поперечного сечения трубы. Например, для трубы с сечением $2,7 \times 2,7$ см изменение скорости пламени не превышало 20 см/с, при этом фронт пламени оставался устойчивым.

Отличие характера изменения скорости пламени при распространении «снизу вверх» и «сверху вниз» объясняется не только различным проявлением неустойчивости пламени. В основном оно определяется различными условиями развития течений холодного газа и горячих продуктов горения, возникающих при торможении реакционной трубы, а также конвекционных течений в продуктах горения.

*Поступила в редакцию 22/II 1983,
после доработки — 8/XII 1983*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Бартльме. Газодинамика горения. М.: Энергия, 1981.
2. G. D. Lewis, C. E. Imith. Psatt and Whitney Interim. Rept. PWA. JR-6954, 1974.
3. В. Н. Кривулин, Е. А. Кудрявцев, А. Н. Баратов и др. ФГВ, 1981, 17, 1, 47.
4. В. С. Бабкин, А. М. Бадалян, А. В. Борисенко и др. ФГВ, 1982, 18, 3, 45.
5. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев, А. П. Баратов и др. — В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
6. В. П. Самсонов, С. А. Аbruков, А. Е. Давыдов и др. ФГВ, 1982, 18, 6, 45.
7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953.
8. Дж. Г. Маркштейн. Нестационарное распространение пламени. М.: Мир, 1968.
9. G. Jaylor. J. Proc. Roy. Soc., A201.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ТРУБЕ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ, ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ

*В. П. Самсонов, Н. И. Кидин, С. А. Аbruков
(Чебоксары)*

В работах, посвященных теоретическому исследованию ламинарных пламен при распространении в каналах, одним из обязательных допущений являлось предположение об отсутствии сил тяжести. Проверка результатов теоретических исследований до настоящего времени была невозможна из-за отсутствия экспериментальных данных по распространению пламени в условиях невесомости. Необходимость проведения серии экспериментов по визуализации пламени в условиях невесомости, когда сила тяжести не оказывает влияния на гидродинамику течения, указывалась в работе [1].

С целью проверки некоторых выводов, сделанных в [1, 2], в настоящей работе проведено исследование структуры пламени и закономерностей его распространения в полуоткрытой трубе квадратного сечения в условиях невесомости с помощью шпирен-метода. Кроме того, методом стробоскопической съемки исследовалась эволюция перемещения к стенке одиночных возмущений по поверхности пламени в ситуации, наиболее близкой к описанной в работах [1, 3, 4].

В экспериментах невесомость создавалась при свободном падении контейнера с находящейся внутри него реакционной трубой в течение 0,55 с. Время развития свободной конвекции в нормальных гравитационных условиях, определяющее время установления стационарного состояния фронта пламени, для использовавшихся труб составляло около 0,15 с. Тот факт, что смесь поджигали после «включения» невесомости, а время развития конвекции значительно меньше времени существования невесомости, позволяет считать эксперимент поставленным корректно. Более подробно экспериментальная установка и методика проведения экспериментов описаны в работе [5].