

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 полукрытой 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].

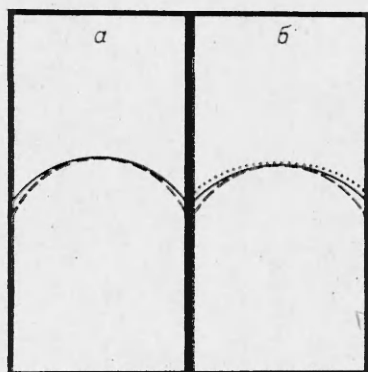


Рис. 1. Формы пламени, наблюдаемые экспериментально и полученные численным расчетом.

а)  $\varepsilon=0,35$  (3,1% пропана с воздухом); б)  $\varepsilon=0,30$  (2,8% пропана с воздухом).

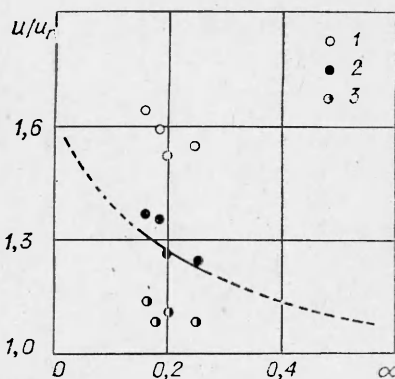


Рис. 2. Зависимость  $u/u_n$  от  $\alpha$  при распространении пламени «снизу вверх» (1) и «сверху вниз» (2) в нормальных гравитационных условиях и в невесомости (3).

Бедные пропановоздушные и смеси СО — воздух сжигали в трубах, ширина канала менялась от 2,7 до 6 см. Сравнение полученных экспериментальных результатов с данными теоретических расчетов, приведенных в [1, 2], было возможно лишь для определенных значений степени расширения газа во фронте пламени  $\alpha = T_0/T$  и параметра  $\varepsilon = u/u_n - 1$ . Здесь  $T_0$  и  $T$  — начальная температура горючей смеси и конечная температура продуктов горения;  $u$  и  $u_n$  — видимая и нормальная скорости распространения пламени. Изменение концентрации горючего в смеси с воздухом влияло на величины  $\varepsilon$  и  $\alpha$ .

Нормальную скорость пламени вычисляли по измеренным значениям видимой скорости пламени и площади его поверхности с использованием методики [6]. Данные о температуре горения смесей брались из [7], затем вычислялись значения  $\varepsilon$  и  $\alpha$ .

На рис. 1 приведены результаты сравнения численного расчета формы пламени с экспериментально наблюдаемыми. Для удобства штриховыми и пунктирными линиями нанесены расчетные формы пламени, взятые из [1, 2] соответственно. На рис. 2 представлена зависимость  $u/u_n = f(\alpha)$ , где сплошная линия соответствует интервалу достижимых значений  $\alpha$ . График зависимости  $u/u_n = f(\alpha)$  взят из [1], точками отмечены экспериментально наблюдаемые результаты. Достаточно большой разброс значений  $u/u_n$  и узкий интервал величин  $\alpha$  не позволили четко выявить функциональную зависимость  $u/u_n = f(\alpha)$ , однако результаты свидетельствуют о близком совпадении значений  $u/u_n$ , вычисленных для конкретных значений чисел  $\alpha$  теоретически в предположении отсутствия сил тяжести и полученных экспериментально в опытах со свободно падающим контейнером.

Эксперименты по изучению устойчивости пламени к мелкомасштабным возмущениям проводили в вертикально расположенной трубе с нижним открытым концом в нормальных гравитационных условиях. В этом случае влияние свободной конвекции сказывается лишь на выпуклости фронта пламени и скорости его движения [5]. При этом общие закономерности поведения возмущений на поверхности пламени, очевидно, не меняются.

В ходе экспериментов возмущения на поверхности пламени создавали с помощью проволочек диаметром 2—0,05 мм, расположенных по ходу параллельного пучка света между коллиматором и приемной частью теневого прибора ИАБ-451. Характер и поведение возникающих на поверхности пламени возмущений при этом оставались неизменными. Визуализация пламени осуществлялась методом стробоскопической съемки, что позволяло легко проследить динамику развития и гибели возмущений на стенке трубы.

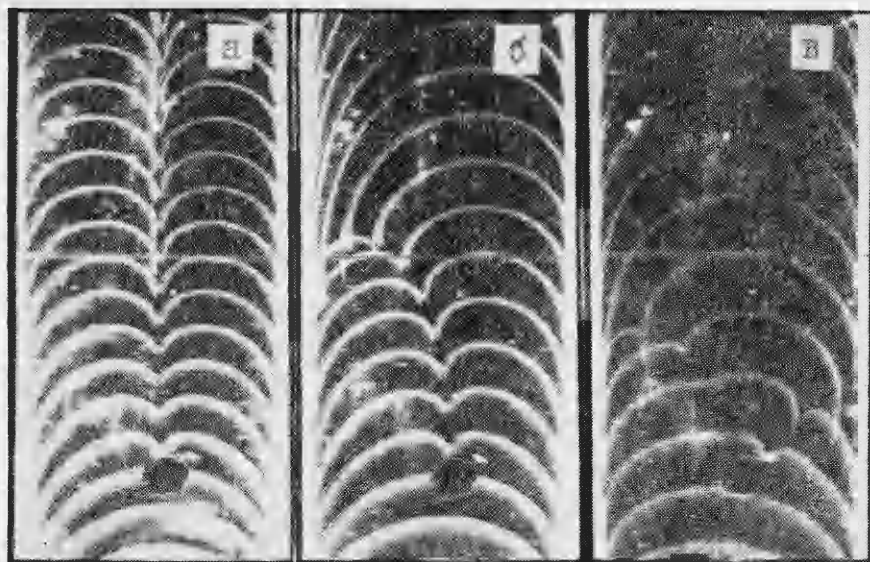


Рис. 3. Стробограммы пламени с возмущением на поверхности.  
 а) возмущение в ведущей точке пламени,  $Re=10$ ; б) возмущение сбоку от ведущей точки,  $Re=10$ ; в) то же,  $Re=20$ .

На рис. 3 показаны стробограммы, иллюстрирующие траектории движения возмущений по поверхности пламени после их зарождения на преграде. Возмущения, возникающие сбоку от ведущей точки пламени, сносятся к стенке трубы по кривым траекториям. Кривизна объясняется тем, что перед фронтом пламени имеется течение, которое перемещает возмущение к стенкам трубы. Кроме того, при движении возмущения нормаль к поверхности пламени постоянно меняет направление. Рис. 3, в иллюстрирует самопроизвольное возникновение вторичных возмущений на поверхности пламени после того, как первое возмущение, зародившееся на преграде, начало свой путь к стенке. Многочисленные опыты показали, что подобное явление возникает при увеличении скорости пламени до такой величины, когда число Рейнольдса  $Re \geq 20$  и больше (число  $Re$  рассчитывали по скорости распространения пламени вдоль трубы, ширине поперечного сечения трубы и вязкости холодного газа). На рис. 4 представлены графики зависимости относительной длины вол-

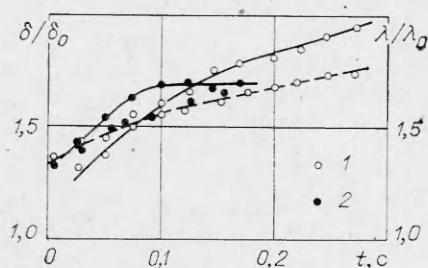


Рис. 4. Зависимость относительной длины волны (штриховая кривая) и амплитуды возмущения (сплошные кривые) от времени.

1 — возмущение в ведущей точке; 2 — возмущение сбоку от ведущей точки.

ны возмущения  $\lambda/\lambda_0$  и относительной амплитуды возмущения  $\delta/\delta_0$  от времени. Здесь  $\lambda_0$  и  $\lambda$  — начальная и текущая длина волны возмущения,  $\delta_0$  и  $\delta$  — начальная и текущая амплитуды. Видно, что через некоторое время после зарождения на преграде обе величины линейно возрастают со временем, за исключением тех возмущений, которые достигают стенки трубы.

Поступила в редакцию 4/VII 1983,  
 после доработки — 10/X 1983

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ja. B. Zeldovich, A. G. Istratov, N. I. Kidin e. a. Comb. Sci. Technol., 1980, 24, 1—2, 1.
2. В. И. Борисов. ФГВ, 1978, 14, 2, 26.
3. Ja. B. Zeldovich. Comb. Sci. Technol., 1981, 40, 3, 225.
4. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
5. В. П. Самсонов, С. А. Аbruков и др. ФГВ, 1982, 18, 6, 45.
6. Г. А. Барский, Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1950, 24, 3, 589.
7. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957.

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ КЕРОСИНА ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ

*В. Н. Груздев, М. Д. Тавгер*

*(Казань)*

Диапазон использования в технике двухстадийного горения чрезвычайно широк. По этому методу работают промышленные установки утилизации отходов нефтехимического производства, форсажные камеры авиационных двигателей, запальники и дежурные пламена, форкамерные автомобильные двигатели и т. п.

При конструировании установок, использующих двухстадийные процессы горения, каждую стадию горения рассчитывают обычно по единой методике с той лишь разницей, что расчет горения во второй стадии производят с учетом концентрации балластных газов, изменяющей содержание кислорода, и температуры, т. е. считают, что продукты сгорания первой стадии находятся в термодинамическом равновесии.

Вместе с тем при исследовании условий воспламенения углеводородного горючего во второй стадии двухстадийного процесса в [1—3] обнаружено, что двух параметров — концентрации кислорода и температуры потока — не всегда бывает достаточно для определения времени задержки воспламенения. Так, обнаружено, что температура  $T_v$ , при которой воспламеняется углеводородное горючее, зависит от скорости потока, расстояния  $L$  между зонами организации двухстадийного процесса горения, конструктивных особенностей проточного тракта, эффективности работы газогенераторов и др.

К числу основных возможных причин, обуславливающих неоднозначность процесса воспламенения, обычно относят наличие сажистых частиц в продуктах сгорания, температурную неоднородность потока и присутствие в нем химически активных частиц, причем сторонникам какого-либо одного определяющего фактора обычно противопоставляют другие причины, роль которых установить по результатам проведенного исследования практически невозможно. В предлагаемой работе поставлена цель — определить степень влияния перечисленных выше факторов на температуру воспламенения.

Сажистые частицы в потоке продуктов сгорания первой стадии горения могут инициировать воспламенение на поверхности или в пограничном слое в том случае, если температура частиц превышает среднюю температуру потока. Не останавливаясь на подробностях механизма сажеобразования, отметим, что температура поверхности частицы не превысит, очевидно, средней температуры самой горячей части зоны горения первой стадии. В качестве газогенератора в экспериментах использовали камеру сгорания, изготовленную на базе жаровой трубы авиадвигателя Д20П. Наличие сажистых частиц в продуктах сгорания определяли визуально по светящимся «трекам».

Температуру воспламенения керосина измеряли по методике, описанной в [3]. Она принималась равной температуре потока продуктов сгорания в момент вспышки и последующего устойчивого горения за желобковым стабилизатором пламени. В самую горячую зону газогене-