

УДК 536.46

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПОНТАННОЙ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ С ФРОНТОМ ПЛАМЕНИ

В. П. Самсонов

Сургутский государственный университет, 628400 Сургут

Экспериментально исследован процесс спонтанного вихреобразования в продуктах горения вблизи фронта пламени, распространяющегося по горючей смеси в вертикальной трубе вниз. Показано, что свободная конвекция при определенных условиях подавляет или стимулирует развитие вихревых возмущений, возникающих на фронте пламени. Обнаружена зависимость между периодическим изменением интенсивности вихря и колебаниями фронта пламени, определяемая скоростью теплообмена между фронтом пламени, продуктами горения и стенками трубы. Структура вихревого течения зависит от формы замкнутой траектории, по которой перемещается ведущая точка пламени в связанной с ним системе координат.

Ключевые слова: вихревая структура, гидродинамическая неустойчивость, фронт пламени, эксперимент.

Вопросы гидродинамической неустойчивости пламени, в частности влияние на нее различных факторов (например, ускорения), являются основными в теории распространения пламени. Теоретические аспекты проблемы подробно изложены в работах [1, 2], в которых кратко обсуждается роль вихревого компонента возмущений. В [2–4] рассмотрены основные принципы управления нестационарным горением, как правило, сводящегося к периодическому воздействию на зону горения вынуждающих вихревых течений. Самопроизвольное формирование вихревых структур в продуктах горения обусловлено возрастанием энтропии во фронте пламени, как и на любой другой поверхности разрыва [5]. Интенсивность вихревого течения определяется ускорением потока на поверхности пламени и, следовательно, ее кривизной [1]. При малых скоростях распространения пламени в трубе влияние на вихревое течение оказывает также свободная конвекция. Выяснение механизмов взаимодействия спонтанной вихревой структуры с фронтом пламени является важной задачей с точки зрения разработки методов управления автоколебательными режимами горения и увеличения интенсивности тепло- и массообмена в камерах сгорания.

В работе [6] экспериментально исследовано развитие вихревой дорожки Кармана за фронтом пламени, имеющим большой радиус кривизны поверхности и распространяющимся вниз в вертикальной трубе прямоугольного сечения с постоянной скоростью. Симметрия фронта пламени в течение всего времени распространения сохранялась. Тот факт, что вихревые ячейки не сносятся вниз по потоку, как это происходит при обтекании тел, а движутся вслед за пламенем, в работе [6] остался незамеченным. Не проанализировано также влияние периодического изменения скорости вращения газа в вихре на устойчивость и скорость распространения фронта пламени. Целью данной работы является изучение зависимости между вихревой структурой и фронтом пламени, приводящей к автоколебательному режиму горения и формированию когерентной вихревой структуры.

Экспериментальная установка представляла собой контейнер, который мог свободно падать с высоты 3,4 м. Внутрь контейнера помещалась реакционная труба прямоугольного сечения с отношением длин сторон, равным 1,5. Поскольку размеры поперечного сечения были неодинаковыми, вихревые ячейки получались в виде цилиндров, оси которых ориентировались в поперечном сечении трубы вдоль большей стенки. В экспериментах

использовались реакционные трубы с поперечными сечениями от $1 \times 1,5$ до 10×15 см. Это позволяло в широком диапазоне значений числа Рэлея управлять временем t_0 , в течение которого скорость свободноконвективного течения возрастает до максимального значения, и скоростью конвективного подъема продуктов горения. Длина трубы превышала больший размер поперечного сечения в 20 раз.

После воспламенения горючей смеси верхний конец трубы автоматически открывался, и пламя распространялось вниз с постоянной скоростью. Распространение пламени визуализировалось интерференционным методом с помощью теневого прибора ИАБ-451, а также методом трассирующих частиц и регистрировалось скоростной кинокамерой СКС-1М и кинокамерой АКС. Киносъемка фронта пламени и продуктов горения производилась через прозрачные боковые стенки контейнера и трубы, изготовленные из оптического стекла. Для реализации метода трассирующих частиц в горючую смесь перед воспламенением вводились частицы оксида магния. Размеры частиц не превышали 50 мкм. Частицы освещались "световым ножом", образованным пучком света от ртутной лампы ДРШ, проходящим через диафрагму, имеющую вид узкой щели в боковой стенке трубы. Эксперименты проводились в нормальных гравитационных условиях и условиях невесомости, что позволяло выявить роль свободной конвекции в самопроизвольном формировании вихревой структуры.

Анализ интерференционных картин распространения пламени, полученных в работе [6], показал, что чередование вихревых ячеек на противоположных стенках трубы сопровождается колебаниями фронта пламени с малой амплитудой. При этом поверхность пламени поворачивается относительно плоскости поперечного сечения трубы. Угол поворота составляет $2-3^\circ$. При этом пламя сохраняет почти плоскую форму. В связи с этим в данной работе особое внимание уделялось точности вертикальной ориентации оси трубы. Обнаружено, что отклонение оси трубы от вертикального положения на $2-3^\circ$ приводит к потере симметричности фронта пламени, развитию его колебаний и формированию вихревой структуры преимущественно вблизи той стенки трубы, где проекция вектора ускорения свободного падения на нормаль к поверхности положительна.

В качестве горючего газа использовались бедные смеси пропана с воздухом. Богатые смеси не применялись, чтобы исключить теплодиффузионную неустойчивость и связанное с ней образование ячеек на поверхности пламени. Концентрация пропана немного превышала пределы распространения, что позволяло уменьшить скорость распространения пламени. Ее значение не превышало $4-12$ см/с. Скорость продуктов горения изменялась от 15 до 45 см/с, что соответствовало значениям числа Рейнольдса $Re = vd/\nu = 50 \div 300$ (d — больший размер поперечного сечения трубы; v — скорость продуктов горения; ν — кинематическая вязкость). В условиях невесомости течение продуктов горения оставалось ламинарным даже при увеличении скорости распространения пламени до 25 см/с.

Визуализация течения за фронтом пламени при его распространении в реакционных трубах с различным поперечным сечением позволила определить условия спонтанного формирования вихревой структуры в продуктах горения. Установлено, что чередование вихревых ячеек в дорожке Кармана обусловлено колебаниями фронта пламени. Изменение равновесного положения фронта пламени и его формы вызывает искажение результирующего профиля скорости свободноконвективного и вынужденного течений, что приводит к различию условий формирования вихревой структуры на противоположных стенках трубы и разрушению дорожки Кармана. Для проверки этого предположения реакционная труба устанавливалась под небольшим углом относительно вертикали. Угол наклона изменялся от 1 до 10° . Дальнейшее увеличение угла наклона приводило к существенному изменению формы пламени и характера его распространения вблизи концентрационных пределов. На рис. 1 представлены интерференционные картины фронта пламени и тече-

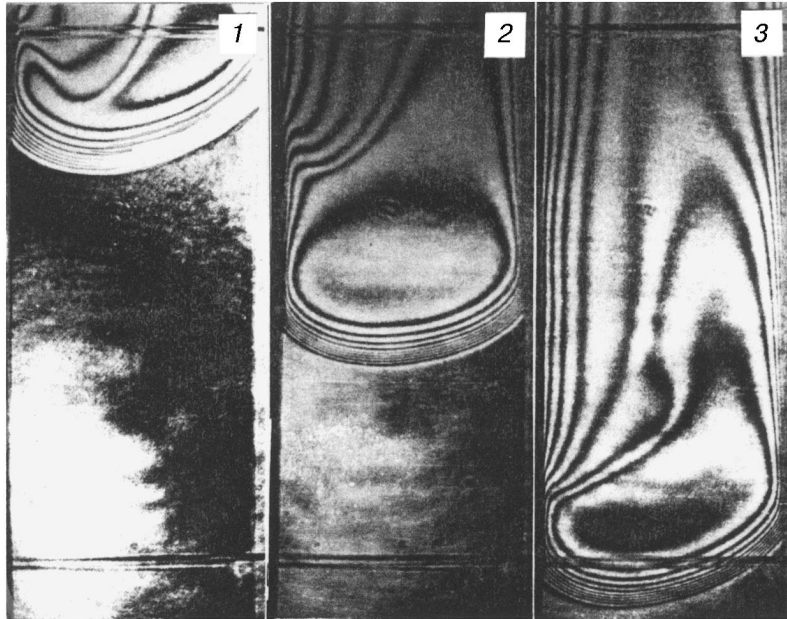


Рис. 1

ния продуктов горения. Время между кадрами 1–3 составляет 0,33 с, что соответствует $1/3$ периода колебаний фронта пламени. Труба с поперечным сечением $1,8 \times 2,7$ см наклонена в плоскости фотографии под углом 3° вправо относительно вертикали. Скорость распространения пламени равна 7 см/с. Из рис. 1 следует, что из-за отклонения трубы от вертикального положения фронт пламени не симметричен. Его распространение сопровождается ярко выраженными колебаниями возле некоторого положения равновесия (кадр 2 на рис. 1). Интерференционные линии, расположенные выше фронта пламени, иллюстрируют динамику развития вихревой ячейки в продуктах горения. Отклонение трубы от вертикального положения приводит к исчезновению дорожки Кармана. Вихревые ячейки формируются лишь со стороны стенки, на которую теплоперенос свободной конвекции более интенсивен (на кадрах 1–3 слева).

Для интерпретации интерференционной картины, получаемой в условиях данного эксперимента, оценим влияние температуры, скорости и геометрических размеров вихревой ячейки на порядок интерференции. Разность фаз световой волны вычисляется по формуле $\delta = 2\pi(n - n_0)l/\lambda$, где λ — длина световой волны; $n - n_0$ — разность показателей преломления света на пути интерферирующих световых волн; l — длина пути светового луча. Влияние параметров среды на изменение разности фаз (номера интерференционной линии) определяется соотношением $\Delta\delta/\delta = \Delta(n - n_0)/(n - n_0) + \Delta l/l$, где $\Delta(n - n_0)$ — изменение показателя преломления, вызванное изменением температуры ΔT , давления ΔP и отклонением Δl формы вихревой ячейки от цилиндрической. Из соотношения Гладстона — Дейла $(n - 1)/\rho = \text{const}$ и уравнения состояния газа $P = \rho RT$, где ρ — плотность продуктов горения; R — универсальная газовая постоянная, получим выражение

$$\Delta\delta/\delta = \Delta(\rho v^2)/P + \Delta T/T + \Delta l/l. \quad (1)$$

Здесь v — максимальная скорость продуктов горения, определяющая перепад давлений газа в трубе и вблизи открытого конца трубы. Первое слагаемое в выражении (1) дает вклад в величину $\Delta\delta/\delta$ менее 0,001 %. Порядок величины $\Delta l/l$ определяется геометрическим подобием течения вниз по потоку и может быть оценен по отношению продольного размера пламени к поперечному. Размер фронта пламени, измеренный по фотографии,

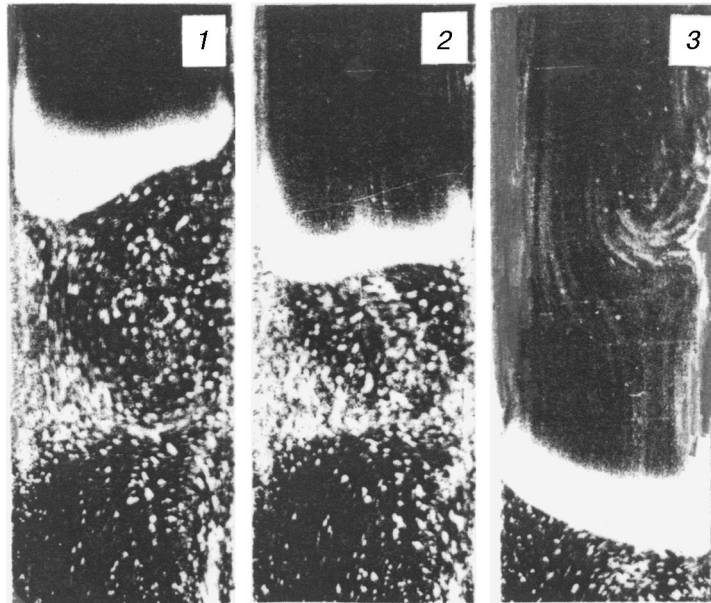


Рис. 2

равен $\Delta l/l \approx 15\%$. Следовательно, порядок интерференции в основном определяется локальными изменениями температуры, и интерференционные линии приближенно можно считать изотермами.

На рис. 1 показано также влияние вихревого течения на распределение температуры вблизи стенки трубы и на фронте пламени (кадр 1). Максимальные порядки интерференции на фронте пламени на кадрах 1 и 2 различаются на 10–15%. Понижение температуры на некотором участке фронта пламени вызывает уменьшение нормальной скорости распространения фронта пламени на этом участке, уменьшение кривизны поверхности и возвращение фронта пламени в положение равновесия. Амплитуда вихревых возмущений, порождаемых фронтом пламени, уменьшается, что приводит к уменьшению скорости ротации в вихревой ячейке. Ядро вихревой ячейки (кадр 2) смещается вниз по потоку от фронта пламени на расстояние порядка ширины поперечного сечения трубы. По истечении времени, равного периоду колебания, температура всех участков фронта пламени выравнивается, скорость свободной конвекции вновь возрастает и процесс повторяется. Зарождение новой вихревой ячейки показано на кадре 3. Видно, что ядро вихревой ячейки сместилось в сторону фронта пламени. Анализ отдельных кадров показывает, что колебания координаты ядра вихревой ячейки и температуры газа в ней отстают по фазе на $\pi/2$ от колебаний температуры и координаты участка фронта пламени, примыкающего к стенке трубы.

Фотографии, представленные на рис. 2, дополняют картину спонтанного вихреобразования в трубе. Кадры 1–3 получены при съемке свечения пламени и течения продуктов горения, визуализированного методом трассирующих частиц. Размеры поперечного сечения трубы $5,0 \times 7,5$ см, скорость распространения фронта пламени 10 см/с. Труба расположена вертикально. В проведенных экспериментах амплитуда колебаний симметричного фронта пламени оказалась больше амплитуды, полученной в работе [6], так как при большей скорости свободноконвективного течения фронт пламени становится менее устойчивым из-за увеличения радиуса кривизны. На кадре 3 направление вращения продуктов горения в вихревой ячейке совпадает с направлением движения часовой стрелки, что соответствует опусканию газа с меньшей температурой вблизи стенки трубы.

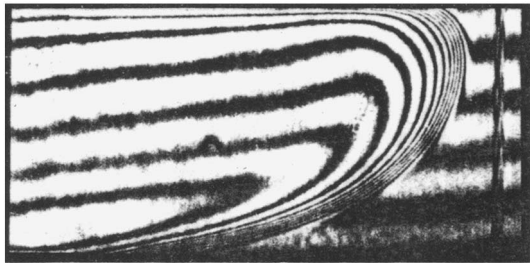


Рис. 3

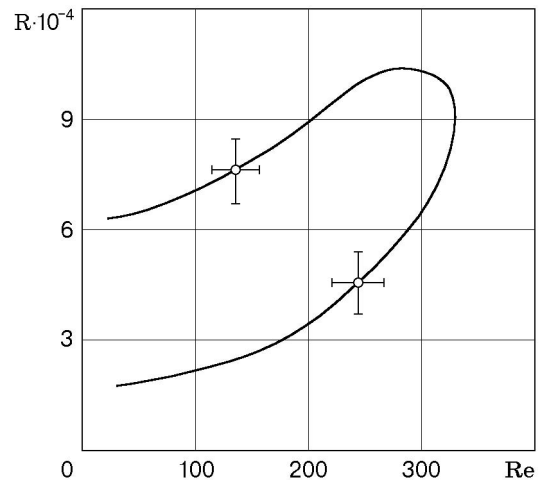


Рис. 4

Положение вихря и скорость ротации газа в вихревой ячейке можно описать с использованием понятия ведущей точки фронта пламени. В [1] ведущая точка рассматривается как точка фронта пламени, наиболее выдвинутая по направлению скорости распространения пламени. В данной работе по интерференционным фильмам и результатам съемки свечения пламени изучены траектории движения ведущей точки. Оказалось, что при строго вертикальном положении трубы такими траекториями являются окружности. Вихрь образуется вблизи той стенки трубы, ближе к которой находится ведущая точка пламени. В трубе, наклоненной под небольшим углом к вертикали, траекторией ведущей точки является эллипс. Большая ось эллипса перпендикулярна оси трубы, а центр смещен к стенке, вблизи которой развивается вихревая ячейка. При увеличении амплитуды колебаний длины большой и малой осей эллипса изменяются. Большая ось эллипса становится вертикальной, после чего фронт пламени теряет устойчивость.

На фотографиях, приведенных на рис. 1, 2, видно, что ядро вихревой ячейки образуется спонтанно в области, где течение продуктов горения в предшествующий момент времени было ламинарным, а условия для турбулизации потока отсутствуют, так как $Re < 300$. Координаты формирующейся вихревой ячейки определены точно. В системе отсчета, связанной с фронтом пламени, вертикальная координата равна произведению скорости распространения пламени и времени t_0 . Горизонтальная координата определяется кривизной фронта пламени (кадр 3 на рис. 2). Предполагаемый механизм возникновения автоколебаний пламени и вихревой дорожки Кармана подтверждается тем фактом, что вихревая структура в условиях невесомости не формируется ни при каких скоростях.

При распространении пламени в горизонтальной трубе ведущая точка расположена в верхней части фронта пламени, и ее положение не меняется. На рис. 3 представлена интерференционная картина распространения пламени в горизонтальной трубе с размерами поперечного сечения $5,0 \times 7,5$ см при горении пропановоздушной смеси, содержащей 2,7 % пропана. Скорость пламени из-за увеличения площади его поверхности возрастает до 21 см/с. Из рис. 3 следует, что вихреобразования в продуктах горения не происходит. По-видимому, это связано с тем, что свободноконвективное течение не успевает развиваться из-за уменьшения характерного времени пребывания продуктов горения вблизи фронта пламени. Увеличение кривизны фронта пламени при прочих неизменных условиях также не приводит к вихреобразованию.

На рис. 4 показана область существования спонтанной вихревой структуры за фронтом пламени, ограниченная кривой зависимости числа Рэлея от числа Рейнольдса. Зна-

чения числа Рэлея вычислялись по соотношению $R = g\beta T d^3 / (a\nu)$, где g — ускорение свободного падения; β , a — термический коэффициент объемного расширения и температуропроводность газа; T — температура пламени. Внутренняя область, ограниченная кривой зависимости $R(\text{Re})$, заполнена экспериментальными точками, соответствующими значениям R и Re , при которых за фронтом пламени формируются вихри. На противоположных границах области приведены две экспериментальные точки для указания интервалов погрешностей, с которыми они получены. При малой скорости распространения пламени время t_0 меньше характерного времени распространения фронта пламени, равного u/d (u — скорость видимого распространения пламени). В продуктах горения успевает развиться свободноконвективное течение, направленное вниз вблизи стенок трубы и вверх в центре трубы. Результирующий профиль скорости является суперпозицией распределений скорости свободноконвективного течения и потока продуктов горения, расширяющегося на фронте пламени, где линии тока преломляются. Перегиб результирующего профиля скоростей соответствует отрыву пограничного слоя и, согласно [7], переносу энергии от основного течения к вихревому. Поскольку изменение величины переносимой кинетической энергии потока пропорционально поперечному градиенту скорости продуктов горения $\partial u / \partial y$, максимальную интенсивность вихря можно определить в момент времени, когда вихревая ячейка занимает наибольшую часть поперечного сечения трубы. Сравнение профилей скоростей свободноконвективного и вынужденного течений имеет смысл лишь на небольшом, порядка ширины поперечного сечения трубы, расстоянии от фронта пламени. При удалении от него линии тока становятся параллельными, что свидетельствует о затухании вихревых возмущений, порождаемых фронтом пламени. Для получения вихревой структуры при большей скорости распространения пламени требуется увеличить размеры поперечного сечения трубы. Это объясняется тем, что уменьшение времени t_0 достигается за счет увеличения числа Рэлея, пропорционального размерам поперечного сечения трубы в третьей степени. Из рис. 4 следует, что в трубах с большим поперечным сечением спонтанная вихревая структура может быть получена при значительных скоростях распространения пламени. Увеличение размеров поперечного сечения до величин, определяющих верхнюю границу области существования спонтанной вихревой структуры, приводит к турбулизации течения и разрушению вихревой структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
2. Маркштейн Дж. Г. Нестационарное распространение пламени. М.: Мир, 1968.
3. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987.
4. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
6. Абруков С. А., Самсонов В. П. Закономерности конвективного вихребразования за фронтом пламени при его распространении в трубе // ПМТФ. 1985. № 6. С. 68–72.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

*Поступила в редакцию 5/XI 2001 г.,
в окончательном варианте — 7/V 2002 г.*