

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ НА ТЕПЛООБМЕН В «ОПРОКИНУТОМ» ПЛАМЕНИ

В. П. Самсонов

Сургутский государственный университет, 628400 Сургут, svp@iff.surgu.ru

Исследованы закономерности образования вихревых структур при горении смеси горючего газа с воздухом, вдуваемой через отверстие в плоской пластине вертикально вниз. Обнаружено, что форма, расположение и число вихревых ячеек определяются скоростью истечения и составом горючей смеси. Показано, что при увеличении скорости начиная от минимального критического значения, при котором возникает вихревая структура, число вихревых ячеек уменьшается от пяти-шести до одной. Дальнейшее увеличение скорости истечения газа приводит к турбулизации потока продуктов горения. Наличие вихревой структуры увеличивает критическое число Рейнольдса, при котором течение становится турбулентным. Обратный переход к структуре с увеличенным количеством вихревых ячеек происходит с «запаздыванием» по скорости истечения газа (гистерезис по расходу газа). Изменение скорости истечения сопровождается бифуркацией числа вихревых ячеек.

Ключевые слова: пламя, вихревая структура, тепловой поток, гистерезис.

При горении газа, истекающего из отверстия в плоской поверхности вертикально вниз, образуются вихревые структуры. В работах [1, 2] показано, что при определенных условиях формирование этих структур происходит под воздействием свободной конвекции продуктов горения в поле сил тяжести. Кроме того, большую роль играет эффект растяжения фронта пламени вблизи критической точки. Известно [3], что струя газа, истекающая из отверстия в плоской поверхности, может оставаться ламинарной до критических чисел Рейнольдса:  $Re_* \approx 30 \div 40$  (число Рейнольдса определяется по диаметру отверстия и скорости истечения газа). Упорядочение течения газа в случае возникновения вихревой структуры отодвигает границу турбулизации до значений  $Re_* \approx 300 \div 400$ . Существование различных форм вихревого течения подтверждает выводы авторов [4] о том, что при  $Re < Re_*$  оказываются устойчивыми несколько форм движения среды, реализующихся в зависимости от пути достижения данного значения числа Рейнольдса. В настоящее время в большинстве работ, посвященных изучению вихревых течений в пламени, исследуется воздействие принудительной закрутки потока или геометрии камер сгорания на структуру пламени. Влияние физических процессов, приводящих к образованию вихревых структур, как правило, не рассматривается. Закономерности вихреобразования в пла-

мени могут быть объяснены с позиций авторов лишь нескольких работ. В работе [5] отмечается, что в вихревом течении в зависимости от чисел Рэлея возможны сопровождающиеся гистерезисом переходы от одновихревых структур к структурам с большим числом вихрей. В [6] показано, что вихреобразование в пламени вызывает бифуркации пространственной структуры течения и стационарных режимов горения. Изменение скорости тепло- и массообмена в вихревой зоне приводит к гистерезисной зависимости полноты сгорания топлива от температуры горения. В экспериментах [7] обнаружено, что на процесс горения влияет перестройка только крупномасштабных вихревых структур.

В данной работе изучаются закономерности перестройки вихревой структуры пламени, предшествующей турбулизации, и влияние различных форм вихревого течения на теплообмен продуктов горения с плоской поверхностью.

Схема эксперимента, условия формирования вихревой структуры пламени и способы визуализации мелкомасштабных вихревых течений описаны в работе [1]. На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки для исследования теплообмена между плоской поверхностью и стационарным вихревым пламенем. В качестве плоской поверхности, вблизи которой формирова-

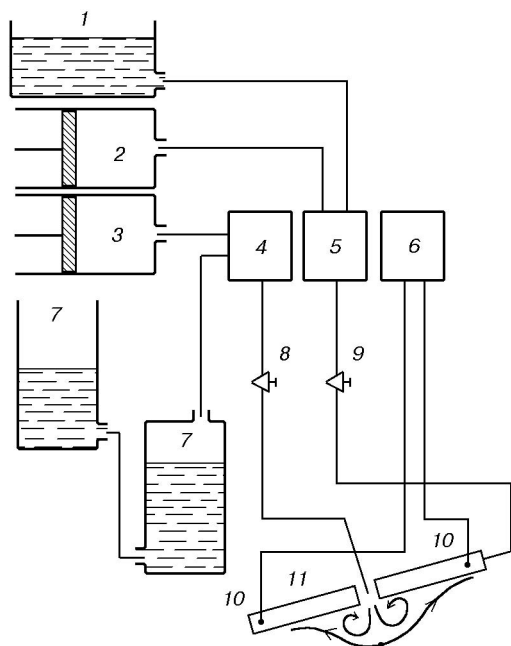


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — резервуар с постоянным уровнем воды, 2 — цилиндрический резервуар с поршнем для вытеснения воды, 3, 7 — газометры, 4 — расходомер газа, 5 — расходомер воды, 6 — потенциометр, 8, 9 — вентили, 10 — термопары, 11 — сосуд из нержавеющей стали

лось пламя, использовали большую сторону сосуда, изготовленного из нержавеющей стали в форме прямоугольного параллелепипеда размером  $2 \times 25 \times 40$  см. Сосуд одновременно выполнял роль калориметра, теплоприемника и горелочного устройства. Верхнюю и боковые стенки сосуда тщательно теплоизолировали. Через отверстия в противоположных боковых стенках подводили воду путем ее слива из резервуара, в котором уровень воды поддерживали постоянным, либо путем вытеснения ее поршнем из цилиндрического резервуара. Объемный расход воды измеряли расходомером по перепаду давления на калиброванных капиллярах. Температуру воды в нескольких точках внутреннего объема теплоприемника измеряли термопарами, сигналы с которых записывались потенциометром. В качестве горючего газа использовали смеси пропана с воздухом. Горючий газ подавали из газометров через отверстие в основании теплоприемника. Диаметры отверстий изменяли от 1 до 12 мм. Объемный расход газа измеряли расходомером. Точную регулировку расхода воды и горючего газа осуществ-

ляли дросселированием с помощью вентиляей. Концентрацию пропана в смеси изменяли от 100 до 10 %. Относительная погрешность измерения объемного расхода воды не превышала 0,1 %, горючего газа — 3,3 %, а температуры — 0,5 К.

Влияние перестройки вихревой структуры на теплообмен определяется зависимостью отношения тепловых потоков  $q/q_0$  к поверхности из вихревого и невихревого «опрокинутого» пламени от расхода горючего газа. Тепловые потоки  $q$  и  $q_0$  вычисляли при одинаковых расходах горючего газа по соотношению  $q = Q/S$ , где  $Q = c\rho V(T_2 - T_1)$  — установившееся количество тепла, получаемое водой с поверхности теплоприемника в единицу времени,  $V$  — объемный расход воды,  $T_2 - T_1$  — разность температур воды на входе и выходе из теплоприемника,  $c$  и  $\rho$  — удельная теплоемкость и плотность воды при 293 К,  $S$  — площадь поверхности теплоприемника. Объемный расход воды во всех опытах устанавливали одинаковым и равным  $0,15 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Разность температур  $T_2 - T_1$  изменялась от 30 до 60 К в зависимости от диаметра отверстия и скорости вдува горючего газа. Расход горючего газа характеризовали числом Рейнольдса  $Re = vd/\nu$ , определяющим размеры и форму вихревой структуры пламени. Здесь  $v$  — скорости газа в отверстии вдува,  $d$  — диаметр отверстия вдува,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости при температуре 293 К. Для получения изображения стационарных вихревых структур в пламени методом осаждения сажи на поверхность теплоприемника последний наклоняли под углом  $3 \div 5^\circ$  относительно горизонта. В случае, когда поверхность теплоприемника оставалась горизонтальной, сажевый след давал мало информации о характере течения в пограничном слое, так как вихревые ячейки визуализировались в виде концентрических колец (сажевых пятен), расположенных в определенном порядке, либо не оставляли следов совсем. Устойчивое невихревое «опрокинутое» пламя получали, располагая поверхность теплоприемника под углом  $30^\circ$  относительно горизонта.

При скоростях истечения горючего газа, соответствующих  $Re < 40$ , в пламени формируется вихревая структура, содержащая пять и более вихревых ячеек. Минимальный размер вихревой ячейки изменяется в пределах  $\approx 10^{-3} \div 10^{-4}$  м. Увеличение числа Рейнольдса до значения  $Re \approx 50 \div 70$  вызывает умень-

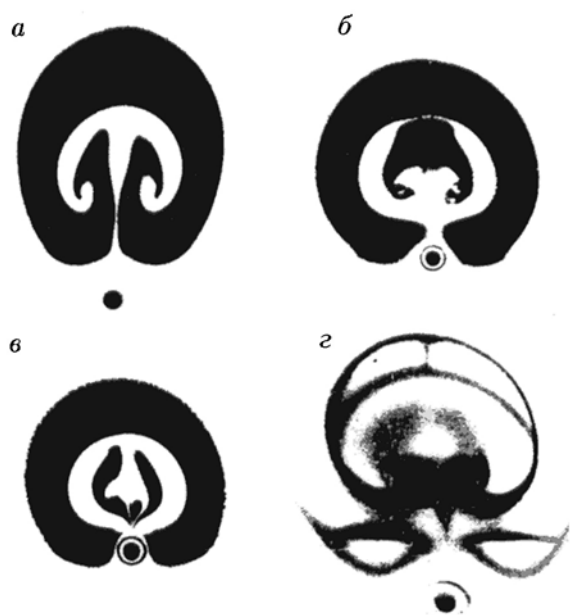


Рис. 2. Фотографии сажевых следов вихревых структур в пламени:

*a-в* — диффузионное пламя пропана с одной, двумя и тремя вихревыми ячейками,  $Re = 100$ ; *г* — пламя, образованное при горении смеси 50 % пропана с воздухом,  $Re = 100$

шение количества вихревых ячеек и при  $Re = 120 \div 150$  формируется один кольцевой вихрь. На рис. 2 представлены изображения сажевых следов, соответствующие типичным устойчивым вихревым течениям в пламени. Эти следы образуются при диффузионном горении пропана и смеси 50 % пропана с воздухом. Число Рейнольдса определяет характерные размеры пламени и, соответственно, градиенты температур, а также степень растяжения фронта пламени вблизи критической точки, в которой осевая скорость газа уменьшается до нуля и появляются тангенциальные (относительно поверхности пламени) составляющие вектора скорости газа. Вихревая структура пламени может иметь признаки структур Бенара, Марангони или кольцевого вихря. Кольцевой вихрь представляет собой структуру, содержащую одну вихревую ячейку. При горизонтальном расположении теплоприемника за счет вращения газа в кольцевом вихре формируется тор, расположенный на поверхности обтекания. Центр тора совпадает с осью струи вдуваемого газа. Схематически течение в кольцевом вихре показано на рис. 1. Сажевый след, оставляемый кольцевым вихрем, показан на рис. 2, *a*. Изме-

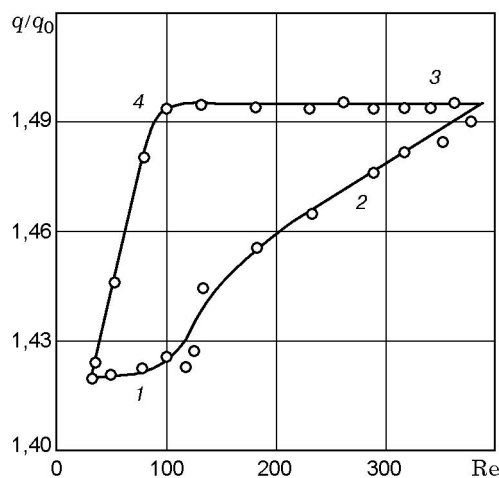


Рис. 3. Интенсивность теплоотдачи от пламени к поверхности вдува:

цифрами 1–3 указано направление нижней ветви гистерезисной зависимости при увеличении расхода горючего газа, а цифрами 3, 4, 1 — верхней ветви гистерезисной зависимости при уменьшении расхода горючего газа

нение скорости вдува газа, размеров и температуры пламени приводит к появлению периодичности вихревого течения в продуктах горения, т. е. появлению дополнительных вихревых ячеек, которые располагаются между кольцевым вихрем и поверхностью теплоприемника. Скорость вращения продуктов горения зависит от градиента температуры во фронте пламени и его кривизны. При горении горючих смесей, близких к стехиометрическим, скорость вращения газа в пламени и устойчивость вихревой структуры больше. Сравнение рис. 2, *a-в* и рис. 2, *г* показывает, что вихревые структуры в кинетическом и диффузионном пламенах при прочих равных условиях существенно отличаются.

После перестройки вихревой структуры в одиночный кольцевой вихрь дальнейшее увеличение скорости истечения газа приводит к турбулизации продуктов горения ( $Re \geq 350 \div 400$ ). Уменьшение скорости истечения газа позволяет вновь перейти к вихревой структуре с несколькими вихревыми ячейками. Перестройка течения происходит внезапно, без каких-либо промежуточных состояний и при гораздо меньших скоростях истечения горючего газа. Так, если при увеличении скорости газа вихревая структура с двумя вихревыми ячейками является устойчивой в интервале  $Re = 80 \div 100$ , то при обратном переходе эта структура мо-

жет существовать в интервале  $Re = 45 \div 70$ . При малых скоростях истечения горючего газа, соответствующих диапазону  $Re = 10 \div 40$ , перестройка вихревой структуры сопровождается «перескоком» числа вихревых ячеек, минуя промежуточные, например, с двух на четыре, минуя три.

Вихреобразование в продуктах горения увеличивает интенсивность теплоотдачи к поверхности. Основной вклад в конвективный перенос тепла дают крупные вихревые ячейки, формирующиеся при больших скоростях движения газа. На рис. 3 приведена зависимость  $(q/q_0)(Re)$  при истечении смеси 50 % пропана с воздухом. Анализ представленных данных показывает, что интенсивность теплоотдачи связана с характером течения в продуктах горения. Наибольшее изменение теплового потока происходит при уменьшении числа вихревых ячеек до одной-двух. Большие значения коэффициента теплоотдачи могут быть получены при меньших расходах горючего газа за счет гистерезисного характера процесса формирования вихревой структуры в пламени.

Итак, в работе установлено, что:

- число вихревых ячеек в вихревой структуре и коэффициент теплоотдачи продуктов горения неоднозначно зависят от скорости вдува горючего газа, наблюдается их гистерезис по расходу газа;

- наибольшее увеличение теплового потока на обтекаемую поверхность связано с вращением газа в крупных вихревых ячейках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев М. В., Самсонов В. П., Фатеев И. Г. Закономерности спонтанного образования вихревого диффузионного пламени // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 6. С. 47–50.
2. Скорняков Г. В. Самоорганизация и преобразование тепла в работу // Журн. техн. физики. 1996. Т. 65, вып. 1. С. 35–46.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
5. Русаков С. В., Русакова О. Л., Тарунин Е. Л. Влияние теплового излучения границ области на конвекцию газа при подогреве снизу // Изв. РАН. Механика жидкостей и газа. 1992. № 5. С. 60–67.
6. Натанзон М. С., Меньшикова О. М. Бифуркации стационарных режимов горения и их влияние на возникновение высокочастотных колебаний в камерах сгорания // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 10–18.
7. Сухинин С. В., Ахмадеев В. Ф. Автоколебания в газовой полости реактивного двигателя твердого топлива // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 1. С. 42–52.

*Поступила в редакцию 17/IX 2001 г.,  
в окончательном варианте — 30/IX 2002 г.*