

## ЛИТЕРАТУРА

1. З е л ь д о в и ч Я. Б. О распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва, в частности, при сферическом распространении детонационной волны. Ж. эксперим. и теор. физ., 1942, т. 12, вып. 9.
2. Б а м - З е л и к о в и ч Г. М. Распад произвольного разрыва в горючей смеси. Сб. Теоретическая гидромеханика, № 4, Оборонгиз, 1949.
3. З е л ь д о в и ч Я. Б., К о м п а н е е ц А. С. Теория детонации. Гостехиздат, 1955.
4. О п е н г е й м А. Газодинамический анализ развития детонации в газе и его гидравлическая аналогия. Четвертый симпозиум по горению, Оборонгиз, 1958.
5. Т р о ш и н Я. К. Обобщение уравнения Гюгонио на нестационарные процессы распространения пламени в трубах. Докл. АН СССР, 1955, т. 103, № 3.
6. Т р о ш и н Я. К. Газодинамический анализ нестационарного распространения пламени в трубах. Изв. АН СССР, ОТН, 1956, № 1.
7. B r o s s a r d J., M a n s o n N. Propriétés des adiabatiques dynamiques dans le cas d'une double discontinuité: onde choc-onde de combustion. C. R. Acad. Sci., Paris, Juil. 1959, vol. 249.
8. B r o s s a r d J., M a n s o n N. Application de la théorie de la double discontinuité: caractéristiques des detonations dans les mélanges gazeux. C. R. Acad. Sci., Paris, Sept. 1959, vol. 249.
9. Л а н д а у Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1953.

### ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО КОНУСА

*И. Л. Кузнецов, М. Д. Маланов*

(Новосибирск)

Исследуется турбулентная скорость распространения пламени в гомогенной смеси пропан-воздух методом обратного конуса. Истинный угол входа потока во фронт конуса пламени определяется путем фотографирования капроновой нити, помещенной перед фронтом пламени.

Измерению скорости распространения пламени в турбулентном потоке гомогенной смеси методом обратного конуса, т. е. при непрерывном поджигании смеси в точке, посвящено значительное число работ. Однако большие расхождения результатов исследований различных авторов, а также расхождения между скоростями распространения пламени, измеренными методом обратного конуса и методом прямого конуса (при периферийном зажигании), указывают на то, что трудности, возникающие при использовании метода обратного конуса, еще не преодолены.

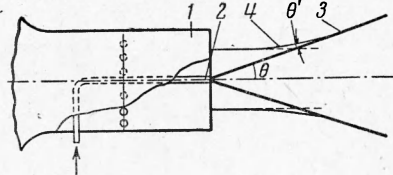
Одним из обстоятельств, затрудняющих использование метода, является отклонение осредненных линий тока исходной смеси, набегающей на фронт обратного конуса пламени. Способ учета этого явления при обработке экспериментальных данных оказывает весьма существенное влияние на полученную величину турбулентной скорости распространения пламени. Так, например, в работе [1] турбулентная скорость  $u^*$  вычислялась по формуле

$$u^* = W \sin \theta \quad (1)$$

где  $W$  — скорость набегающего потока;  $\theta$  — половина угла раствора конуса пламени,

измеряемого по фотографиям. Схема образования обратного конуса пламени в свободной струе приведена на фиг. 1, на которой: 1 — горелка, 2 — стабилизирующее устройство, 3 — конус пламени, 4 — осредненная линия тока. При таком способе вычисления  $u^*$  эффект отклонения линий тока не учитывается, что приводит к завышению величины  $u^*$ . Вследствие этого значения  $u^*$ , определенные методом обратного конуса пламени, в 2—3 раза превосходят значения, определенные в той же работе методом прямого конуса.

Удачная попытка учесть эффект отклонения линий тока предпринята в работе [2]. Авторы этой работы вычисляют турбулентную скорость распространения пламени на основании уравнения расхода, составленного в предположении линейного распределения температуры по зоне горения и равенства скорости продуктов сгорания скоро-



Фиг. 1

сти набегающего потока. Однако последнее предположение (о равенстве скоростей) находится в противоречии с экспериментальными данными работы [3], где указывается на то, что скорость продуктов сгорания выше скорости набегающего потока. Это обстоятельство, вероятно, приводит к занижению  $u^*$  в работе [2]. Аналогичные замечания о методе работ [1, 2] уже были высказаны в [4].

Из изложенного выше вытекает необходимость при определении  $u^*$  методом обратного конуса либо непосредственно путем трассирования проследить ход линий тока в потоке исходной смеси, набегающей на конус пламени, либо определить истинный угол ухода потока в некоторой точке поверхности фронта пламени.

Ниже турбулентная скорость пламени определялась из соотношения

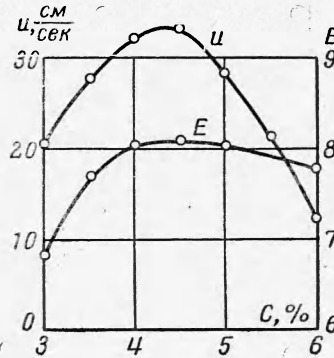
$$[u^* = W \sin \theta' \quad (2)$$

Здесь  $W$  — скорость набегающего потока,  $\theta'$  — угол входа потока во фронт пламени.

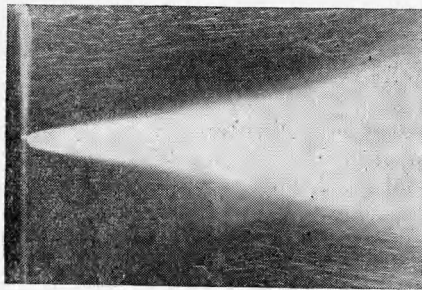
Измерения проводились в свободной струе, вытекающей из трубы квадратного сечения  $40 \times 40$  мм. Для изменения степени турбулентности потока использовались турбулизирующие решетки с диаметром прутьев 2 и 5 мм. Скорость потока изменялась в пределах  $8 \div 40$  м/сек. Степень турбулентности потока определялась на различных расстояниях от среза трубы и в различных точках сечения струи при помощи термоанемометра ТА-1, регистрировавшего пульсации скорости в диапазоне частот  $0 \div 65000$  гц.

Обратный конус пламени стабилизировался при помощи дежурного факела стехиометрической водородо-кислородной смеси, образованного на конце тонкой трубки (диаметром 0,8 мм), помещенной на оси потока. Тепловыделение дежурного факела не превосходило 0,5% тепловыделения основного факела. В качестве горючего использовался газ следующего состава:  $C_2H_6$  — 4,5%,  $C_3H_8$  — 80,4%,  $C_4H_{10}$  — 15,1%. Концентрация газа в смеси с воздухом менялась в пределах 3,5—5,5% (стехиометрической смеси соответствует 4%). Зависимость нормальной скорости пламени  $u$  и коэффициента расширения продуктов сгорания  $E$  от содержания  $C$ % смеси (пропан-бутан) в воздухе при  $t = 25^\circ$  и  $p = 1$  атм приведена на фиг. 2. Нормальная скорость определялась методом бомбы постоянного объема с использованием начальной стадии процесса [5]. Коэффициент расширения рассчитывался термодинамически с учетом диссоциации продуктов горения.

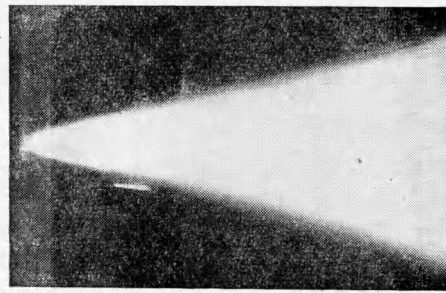
Для получения трасс (линий тока) в поток вводился порошок алюминия. Поток с летящими частицами алюминиевого порошка освещался плоским пучком света толщиной 2 мм и шириной 60 мм, создававшимся специальной оптической системой с



Фиг. 2



Фиг. 3

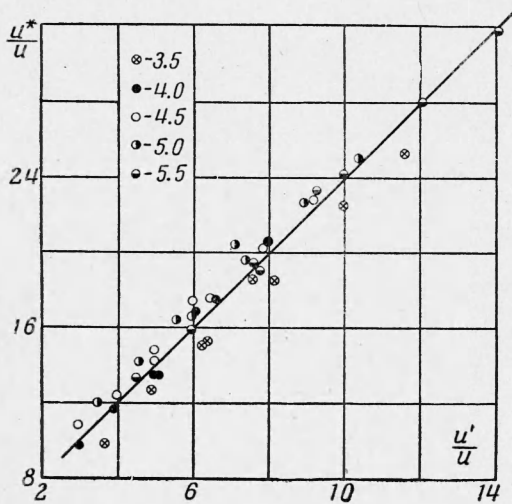


Фиг. 4

импульсной лампой ИФК-120 в качестве источника света. Благодаря этому при фотографировании регистрировались трассы частиц, лежащие в плоскости, перпендикулярной направлению съемки и проходящей через ось конуса пламени. Экспозиция при фотографировании факела выбиралась таким образом, чтобы ее увеличение не приводило к изменению очертаний факела на снимке.

На фиг. 3 приведена регистрация трасс в потоке, набегающем на конус пламени. Несмотря на то, что отклонение потока перед фронтом пламени определенно усматривается из фоторегистрации трасс, проведение осредненных линий тока здесь затруднительно из-за разброса в направлениях трасс, вызванного пульсациями скорости потока.

Более определенные данные о среднем направлении потока были получены при помощи тонкой капроновой нити, помещенной в поток на растяжке из тонкой проволоки (диаметром 20 мк). Нить располагалась как можно ближе к конусу пламени и освещалась импульсной лампой при фотографировании. На фиг. 4 приведена фоторегистрация обратного конуса пламени с нитью. Хотя нить колеблется в некоторых пределах, среднее направление нити, соответствующее среднему направлению потока, можно определить довольно точно. По таким фоторегистрациям определялся истинный угол входа потока во фронт пламени и локальная турбулентная скорость распространения пламени вычислялась по формуле (2). При этом предполагается, что скорость потока, входящего во фронт конуса пламени, мало отличается от скорости неотклоненного потока. Следует отметить, что такой метод дает несколько завышенные значения  $\theta'$ , так как нить отстоит от фронта пламени на некотором расстоянии. Для определения величины ошибки, возникающей из-за этого, было снято поле направлений во всем набегающем потоке и построены осредненные линии тока. Углы входа построенных линий тока во фронт пламени отличались от углов входа, определенных с помощью нити, на величину, не превышающую погрешность эксперимента.



Фиг. 5

ной величины пульсаций скорости набегающего потока  $u'/u_r$  для смесей, содержащих 3,5, 4, 4,5, 5, 5,5% газа, приведенная в виде графика на фиг. 5. Значения  $u_r^*$  соответствуют температуре исходной смеси 25° С и атмосферному давлению. Величины  $u'$  брались в тех же точках потока, где определялась локальная турбулентная скорость. Полученная зависимость соответствует соотношению

$$\frac{u^*}{u} \sim 2 \frac{u'}{u}$$

Коэффициент пропорциональности 2, возможно, объясняется тем, что при использовавшемся методе фотографирования регистрировалась граница факела, определяемая не средней квадратичной величиной пульсаций скорости потока, а некоторой величиной максимальных пульсаций.

Поступила 28 XI 1963

#### ЛИТЕРАТУРА

- Хитрин Л. Н., Гольденберг С. А. Исследование процесса распространения турбулентного фронта пламени при больших скоростях потока. Газодинамика и физика горения. Изд. АН СССР, 1959.
- Петров Э. А., Талантов А. В. Скорость распространения пламени и протяженность зоны горения в турбулентном потоке. Тр. Казанск. авиац. ин-та, 1958.
- Хитрин Л. Н., Гольденберг С. А., Сундуков И. Н. Закономерности образования фронта пламени в свободной струе. Газодинамика и физика горения, Изд. АН СССР, 1959.
- Козаченко Л. С. О методах измерений турбулентной скорости распространения пламени. ПМТФ, 1961, № 3.
- Бабкин В. С., Козаченко Л. С., Кузнецов И. Л. Влияние давления на скорость распространения пламени в метано-воздушной смеси. ПМТФ, 1964, № 2.