

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Александров, А. В. Болдырева и др. Докл. АН СССР, 1973, 210, 161.
2. В. В. Александров, Р. К. Тухтаев и др. ФГВ, 1974, 10, 4, 543.
3. В. В. Александров, Р. К. Тухтаев и др. ФГВ, 1976, 12, 6.
4. А. П. Глазкова. ФГВ, 1974, 10, 3, 323.
5. К. К. Андреев, А. П. Глазкова.— В сб.: Теория взрывчатых веществ. М., «Высшая школа», 1967, с. 321.
6. A. P. Glaskova. Explosifs, 1967, 1.
7. В. К. Боболев, М. Я. Гени др. ФГВ, 1971, 7, 366.
8. О. П. Коробейничев, А. М. Викторенко и др. ФГВ, 1972, 8, 511.
9. И. Н. Лобанов, В. Н. Чуваев, Н. Н. Бахман. ФГВ, 1973, 9, 3, 398.
10. D. J. Hewkin, J. A. Hicks a. o. Combustion Science and Technology, 1971, 2, 5—6, 307.
11. N. Kubota, T. J. Ohlemiller a. o. AIAA — paper N 74-124.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННОГО ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В ВЫХЛОПНОЙ И ИНЖЕКЦИОННОЙ ТРУБАХ

А. С. Гафаров, Ф. Н. Имамудинов

Выхлопная и инжекционная трубы — устройства с периодическим накоплением и сжиганием горючей смеси. Подаваемая в устройство горючая смесь постепенно заполняет ее. Когда смесь входит в контакт с постоянно действующим источником зажигания, возникает фронт пламени. Если существуют условия, при которых фронт пламени перемещается навстречу заполняющей камеру горючей смеси (при условии погасания пламени после выгорания порции смеси), то можно наблюдать релаксационное вибрационное горение (РВГ).

В работах [1, 2] были описаны режимы горения в инжекционной трубе, расположенной вертикально. Опыты [3] выявили зависимость режимов горения от положения инжекционной трубы.

В настоящей работе определялись и сравнивались основные характеристики выхлопной и инжекционной труб для горизонтального положения — области существования релаксационного вибрационного горения, величины давления при горении, частоты колебаний.

Объекты исследования со схемой измерений приведены на рис. 1. Выхлопная труба 2 (рис. 1, а) изготовлена из пирексового стекла длиной $5,00 \cdot 10^{-1}$ м, сечением $5,98 \cdot 10^{-4}$ м². Во входной конец через капиллярные трубы 1 вводятся отдельно горючий газ и воздух. Горючее — пропан, подаваемый из баллона. Расходы горючего и воздуха измеряются реометрами. У выходного конца трубы располагается источник зажигания. Давление при горении измеряется тензодатчиком давления, присоединенным в средней части выхлопной трубы.

Инжекционная труба (рис. 1, б) длиной $5,00 \cdot 10^{-1}$ м, внутренним сечением $5,98 \cdot 10^{-4}$ м² изготовлена также из пирексового стекла. Во входной конец подается горючее через газо-

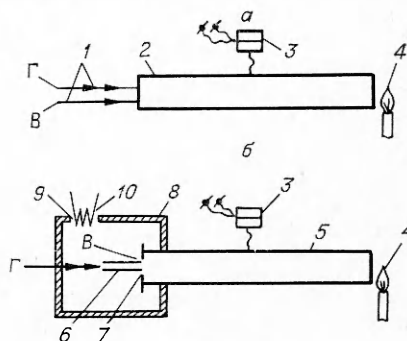


Рис. 1. Объекты исследования со схемой измерений.

1 — капилляры; 2 — выхлопная труба; 3 — датчик давления; 4 — дежурный факел; 5 — смеситель инжекционной трубы; 6 — газовое сопло; 7 — диафрагма; 8 — емкость; 9 — горловина емкости; 10 — нить термоанемометра; В — воздух; Г — горючий газ.

вое сопло b с сечением $0,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, которое установлено соосно со смесителем инжекционной трубы. Выходное сечение газового сопла совпадает с сечением входного конца смесителя. В опытах сечение входного конца смесителя изменяется от полностью открытого до закрытого с помощью диафрагмы 7. Это позволяет изменять коэффициент инжекции при неизменном расходе горючего газа, сохранении скорости его истечения. Для измерения количества инжектируемого воздуха используется емкость 8. В горловине емкости располагается нить термоанемометра, позволяющего измерять расход воздуха. У выходного конца смесителя инжекционной трубы располагается дежурный факел, давление при горении измеряется тензодатчиком давления, присоединенным в средней части инжекционной трубы.

При работе с инжекционной трубой задается определенный расход газа Q_g через газовое сопло и регистрируется расход воздуха Q_v , при котором происходит релаксационное вибрационное горение, условия существования которого определяются. Область существования релаксационного вибрационного горения в выхлопной трубе определяется аналогично в координатах Q_g и Q_v . В опытах с инжекционной и выхлопной трубами измерялось наибольшее значение избыточного давления при горении, частота колебаний. Исследования проводились при комнатной температуре и атмосферном давлении. Ошибки измерения расходов 2, давления 5, частоты 2%.

Область существования релаксационного вибрационного горения в выхлопной трубе с различными расходами горючего газа и воздуха приведена на рис. 2. Там же приводятся результаты исследования инжекционной трубы в режиме релаксационного вибрационного горения. В инжекционной трубе РВГ существует и вне пределов области его существования для выхлопной трубы. Наблюдается смещение линий, вдоль которых наблюдается вибрационное горение в инжекционной трубе от стехиометрической к богатой концентрационной границе РВГ выхлопной трубы при уменьшении сечения входного конца смесителя.

До тех пор, пока концентрация горючей смеси в инжекционной трубе не достигнет богатой концентрационной границы области существования РВГ в выхлопной трубе, процесс горения в инжекционной трубе имеет особенности. Горение не сопровождается характерным «хлопком», как в выхлопной трубе. Пламя от открытого конца распространяется до половины длины инжекционной трубы, затем как бы «растворяется». Горение сопровождается небольшим сажеобразованием. Когда сечение входного конца смесителя более $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, горение — подобно горению в выхлопной трубе, пламя распространяется по всей длине трубы, а горение сопровождается характерным хлопком. Сажеобразование не наблюдается.

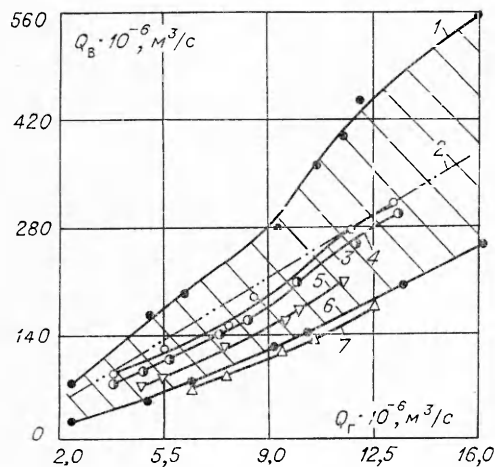


Рис. 2. Область существования релаксационного вибрационного горения в выхлопной трубе и линии, вдоль которых существует релаксационное вибрационное горение в инжекционной трубе.

1 и 6 — выхлопная труба; 2 — линия, вдоль которой сохраняется стехиометрическое отношение Q_g/Q_v ; 3 — открытая инжекционная труба; 4 — инжекционная труба закрыта диафрагмой сечением $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; 5 — $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; 7 — $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Рассмотрим зависимость концентрации горючей смеси η от коэффициента инжекции n — отношения объемных расходов инжектируемого воздуха и инжекти-

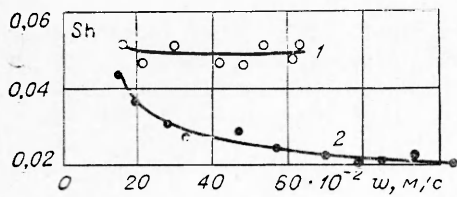


Рис. 3. Зависимость Sh от ω в инжекционной (1) и выхлопной (2) трубах.

сопла; $\delta = \rho_r / \rho_g$ — отношение плотностей инжектируемых сред; ξ — коэффициент сопротивления смесителя.

Анализ уравнения (2) показывает, в частности, что сопротивление смесителя является существенным фактором, влияющим на коэффициент инжекции, следовательно, на концентрацию горючей смеси; большое сопротивление смесителя может привести к прекращению инжекции воздуха.

Коэффициент инжекции и концентрация горючей смеси в смесителе связаны между собой соотношением

$$\eta = Q_r / (Q_r + Q_b). \quad (3)$$

Из (1) следует, что $Q_b = nQ_r$, тогда (3) принимает вид

$$\eta = 1 / (1 + n). \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает, что концентрация горючей смеси в смесителе определяется коэффициентом инжекции, с уменьшением которого η возрастает. Этим объясняется наблюдаемое (см. рис. 2) смещение линий, вдоль которых существует релаксационное вибрационное горение, к богатым концентрациям при уменьшении сечения входного конца смесителя. Не наблюдается РВГ в инжекционной трубе, когда расход воздуха превышает стехиометрический, хотя при тех же условиях в выхлопной трубе релаксационное горение происходит. Это объясняется тем, что рассмотренная конструкция инжекционной трубы не обеспечивает необходимого подсоса воздуха. При росте коэффициентов инжекции за счет увеличения расхода горючего газа РВГ прекращается, переходя в стационарное горение.

Частота колебаний в идеальной выхлопной трубе определяется [5] геометрическими параметрами системы, скоростью наполнения горючей смесью ω и скоростью распространения фронта пламени. На рис. 3 показана экспериментально полученная зависимость числа Струхала $Sh = f ds / (Q_r + Q_b)$ от характерной скорости наполнения ω в выхлопной и инжекционной трубах, где f — частота колебаний, d — диаметр трубы, S — площадь сечения трубы, $Q_r + Q_b$ — расход горючей смеси, скорость наполнения $\omega = (Q_r + Q_b) / S$. По условиям опыта Sh оп-

рующего горючего газа

$$n = Q_b / Q_r. \quad (1)$$

Для практических расчетов в [4] рекомендуется формула, названная основным уравнением инжекции

$$\Phi = (1 + n) (1 + n/\delta) (1 + \xi/2), \quad (2)$$

где $\Phi = F_2 / F_1$ — отношение площадей сечения смесителя и газового

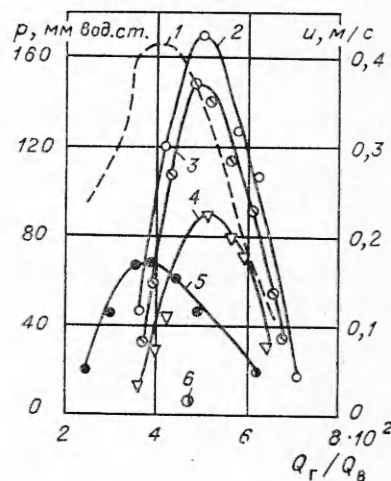


Рис. 4. Зависимость p_{\max} при горении в выхлопной и инжекционной трубах от Q_r/Q_b при различных расходах газа.

1 — кривая зависимости скорости горения u от Q_r/Q_b [6]; 2 — $Q_r = 10,0 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; 3 — $9,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; 4 — $6,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; 5 — $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; 6 — точка, где возможно измерить давление в инжекционной трубе при $Q_r = 11,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

ределяется изменением f и ω , крайние значения Sh — условиями гашения пламени после выгорания смеси. Из сопоставления видно, что частота колебаний в выходной трубе ниже, чем в инжекционной. Время заполнения горючей смесью выхлопной трубы оказывается больше, чем инжекционной, так как в нее смесь поступает через капилляр малого сечения. При увеличении сечения капилляра пламя стабилизируется и РВГ в выхлопной трубе прекращается. В инжекционную трубу газ поступает через капилляр, а воздух — через зазор вокруг капилляра и смесительной трубы. Этим обеспечивается более быстрое заполнение инжекционной трубы горючей смесью, и частота в инжекционной трубе больше, чем в выхлопной.

На рис. 4 показана зависимость максимального давления при горении в выхлопной и инжекционной трубах от Q_r/Q_v . Видно, что максимальное значение давления в выхлопной трубе на два порядка выше, чем в инжекционной. Причина в том, что инжекционная труба открыта с обоих концов и продукты сгорания движутся в обоих направлениях. С выходного конца выбрасываются продукты сгорания, с входного — часть горючей смеси, не успевшей сгореть.

Давление в выхлопной и инжекционной трубах растет с увеличением расхода горючего газа. Концентрация горючей смеси влияет на давление при горении так же, как и на скорость горения.

Казанский государственный
университет

Поступила в редакцию
24/XII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Габидовский, А. С. Гафаров, В. Н. Подымов. Лабораторные исследования некоторых систем вибрационного горения. Казань, Изд-во КГУ, 1971.
2. В. Н. Подымов. Вибрационное горение в некоторых модельных устройствах. Казань, Изд-во КГУ, 1970.
3. А. С. Гафаров. — В сб.: Точные науки. Казань, Изд-во КГУ, 1973.
4. В. В. Мурзаков. Основы теории и практики сжигания газа в паровых котлах. М., «Энергия», 1969.
5. Я. М. Щелоков, Э. М. Телегин, В. Н. Подымов. Пособие по освоению систем релаксационного вибрационного горения. Казань, Изд-во КГУ, 1971.
6. Б. Льюис, Г. Элбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.

К ДИФфуЗИОННО-ТЕПЛОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ

(Сообщение II)

П. П. Лазарев, А. С. Плешанов

Задача диффузионно-тепловой устойчивости ламинарного фронта пламени в предположении непрерывности температуры T и ведущей массовой концентрации c во фронте пламени была поставлена в [1], где был получен также приближенный критерий такой устойчивости в длинноволновом приближении, сводящийся к условию

$$L = D/\chi \leq 1,$$

где D и χ — коэффициенты диффузии и температуропроводности соответственно, L — число Льюиса. В [2] были учтены возможные разры-