

5. В. С. Бабкин, В. И. Бабушок. ФГВ, 1977, 13, 1.
6. В. С. Бабкин, Ю. Г. Кононенко. ФГВ, 1967, 3, 2.
7. J. Nagy, E. C. Seiler et al. RI 7507. US. Dept. of the Interior. Bureau of Mines, 1971.
8. V. M. Morton, M. A. Nettleton. Comb. Flame, 1977, 30, 111.
9. R. C. Eschenbach, J. T. Agnew. Comb. Flame, 1958, 2, 3.
10. A. M. Garforth. Univ. Witwatersrand. Dep. Mech. Eng. Johannesburg. Rep. 57, 1974.
11. А. М. Гурвич, Ю. Х. Шаулов. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения. М.: МГУ, 1955.
12. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
13. С. М. Когарко, Б. А. Иванов. ПМТФ, 1964, 2.
14. В. С. Бабкин, А. М. Бадалян и др. ФГВ, 1981, 17, 3.

О ЗОНЕ ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ ГАЗА В ИНЕРТНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

*А. А. Коржавин, В. А. Бунев, Р. Х. Абдуллин, В. С. Бабкин
(Новосибирск)*

Распространение пламени по газовой смеси в пористых средах с эквивалентным гидравлическим диаметром больше критического, определяемого из условия гашения пламени $Re_{кр} = const$, представляет собой интересное явление, многие аспекты которого недостаточно ясны. Некоторые сведения о сгорании газа в насадках с пористостью до 0,4 (набивки из зернистых материалов типа гравия или металлических шаров) приводятся в [1], где обнаружено, что пламя в таких насадках может ускоряться. Увеличение скорости сгорания связывается с турбулизацией смеси расширяющимися продуктами сгорания.

В работе [2] показано, что распространение пламени в инертной пористой среде (набивки из металлических шаров, пористость 0,4) может происходить стационарно, с постоянной скоростью. При этом скорости пламени, составляющие 0,1—2,6 м/с, превышают нормальные скорости в 1—30 раз. Режим сгорания имеет турбулентный характер и сопровождается мелкомасштабными пульсациями. В этой же работе указывается, что область, в которой существуют зоны химической реакции и горячие продукты сгорания, имеет малую по сравнению с размерами установки протяженность и что сгорание смеси в таких условиях имеет ряд характерных особенностей. Более быстрые режимы горения со скоростями 400—1600 м/с изучались в работах [3—4].

Очевидно, что наряду со скоростью распространения важной характеристикой процесса является размер зоны горения. Однако какие-либо данные о протяженности этой области и ее структуре в литературе отсутствуют. В связи с этим целью данной работы было определение протяженности зоны горения и получение сведений о ее структуре при различных начальных давлениях.

Эксперимент проводился на установке, описанной в [2]. Распространение пламени изучалось в вертикальной трубе сечением 48×48 мм и длиной $L = 2,8$ м. Вся труба заполнялась металлическими полированными шарами диаметром 6 мм, среда имела пористость 0,4. Смесь поджигалась единичной искрой у верхнего торца трубы в свободном пространстве объемом ~ 100 см³. Использовались предварительно приготовленные стехиометрические метано-воздушные смеси. Точность приготовления смеси 0,1%. Начальное давление варьировалось в пределах 0,2—1,5 МПа.

Под зоной горения (или зоной химического тепловыделения) понималась зона вдоль трубы, где начинается и заканчивается химическое превращение исходной смеси (рис. 1). Так как пламя распространялось в этих экспериментах с постоянной скоростью, то протяженность зоны горения можно было определить по среднему времени существования химической реакции в каком-нибудь сечении и средней скорости перемещения фронта пламени. В свою очередь, химическое превращение сопровождается интенсивной хемилюминесценцией, которую можно зарегистрировать фотоэлектронным умножителем. Для определения времени свечения в одном из сечений в пористой среде создавался прямой сквозной канал (см. рис. 1). Канал располагался в центральной части трубы перпендикулярно ее оси, имел длину 48 мм и представлял собой совокупность пор, расположенных на одной линии. Канал имел минимальный размер сквозного отверстия 2 мм и образовывался при засыпке шаров вокруг прямой проволоки диаметром 2 мм. Образованная таким образом структура среды не нарушалась, когда проволока удалялась. Поскольку эквивалентный гидравлический диаметр насадки 2,7 мм, т. е. больше диаметра проволоки, то размер и форма пор канала существенно не отличались от размера и форм пор самой пористой среды. Продолжительность свечения в канале t_b измерялась с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-29 (область спектральной чувствительности 300—600 нм).

Зависимость t_b от начального давления p представлена на рис. 2. Видно, что в диапазоне давлений 0,5—1,5 МПа t_b изменяется незначительно, и только при приближении к пределу распространения пламени в пористой среде ($p = 0,18$ МПа) происходит достаточно резкое его увеличение. Значение t_b при $p = 0,2 \div 1,5$ МПа изменяется от $5 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-2} с.

Зависимость стационарной скорости перемещения пламени S от начального давления приведена на рис. 3. Необходимо отметить, что скорость увеличивается с ростом начального давления и достигает 4 м/с при $p = 1,5$ МПа. Это в 40 раз выше нормальной скорости распространения пламени при данном давлении.

Протяженность зоны горения определялась как произведение среднего времени свечения \bar{t}_b , измеренного с помощью ФЭУ-29, и средней стационарной скорости распространения пламени $\delta = S\bar{t}_b$. Оказалось, что эта величина составляет всего 3—5 см. Зависимость δ от начального давления приведена на рис. 4.

Естественно, что и передняя и задняя границы зоны горения могут быть неровными (см. рис. 1). Чтобы определить степень неровности передней границы зоны, в насадку помещались два фотодиода ФД-3 на расстоянии 4 см друг от друга в одном сечении, перпендикулярном оси трубы. Сдвиг сигналов фотодиодов, соответствующих появлению свечения в непосредственной близости от ФД-3, характеризует неровность передней границы зоны горения. Для $p = 1$ МПа сдвиг сигналов по времени Δt в среднем равен $2 \cdot 10^{-3}$ с. При уменьшении давления по мере приближения к пределу распространения пламени в данной пористой среде Δt увеличивается и достигает $1,8 \cdot 10^{-2}$ с. Сравнивая величины Δt и t_b , можно сделать вывод о том, что при высоких давлениях (0,5—1,5 МПа) отношение $\Delta t/t_b$ мало, причем неровность передней границы зоны горения сравнима с размером шара: при $p = 1$ МПа $\Delta t/t_b = 0,17$ и $\Delta \delta = 0,7$ см. Очевидно, что величина $\Delta \delta$ характеризует общую неровность фронта, обусловлена ли она мелко- или крупномасштабными течениями газа.

Кроме понятия «зона горения» целесообразно ввести понятие «тепловой зоны пламени», включающей собственно зону горения (зону химического тепловыделения) и зону охлаждения продуктов горения. Передняя граница этой зоны, очевидно, совпадает с передней границей зоны горения. Время существования тепловой зоны пламени t_z в данной работе определялось по записи давления как время падения давления до

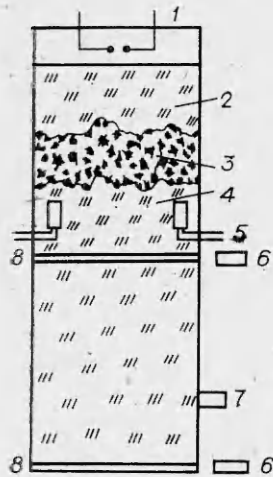


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.
1 — электроды зажигания; 2 — охлажденные продукты сгорания; 3 — зона горения; 4 — исходная смесь; 5 — фотодиоды; 6 — ФЭУ-29; 7 — датчик давления; 8 — каналы в пористой среде.

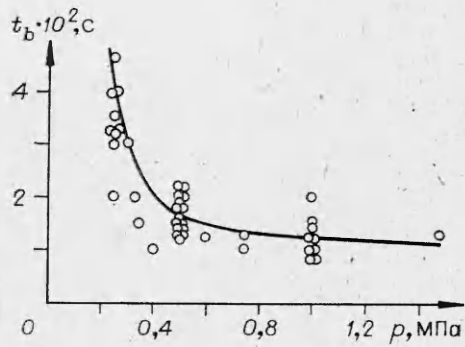


Рис. 2. Зависимость времени t_b от начального давления.

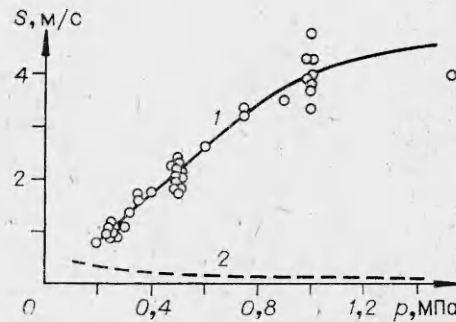


Рис. 3. Зависимость скорости распространения S от начального давления.
1 — S ; 2 — нормальная скорость пламени по [6].

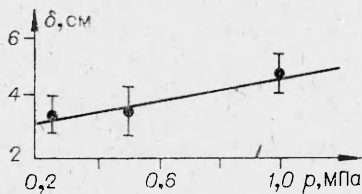


Рис. 4. Зависимость протяженности зоны горения δ от начального давления.

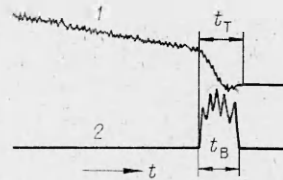


Рис. 5. Запись окончания процесса распространения пламени.
1 — давление; 3 — сигнал ФЭУ.

конечного установившегося значения с момента подхода пламени к нижнему торцу трубы. Типичная осциллограмма окончания процесса горения в пористой среде приведена на рис. 5. Падение давления в системе (на фоне мелкомасштабных высокочастотных пульсаций с частотой 200—1000 Гц) по мере распространения пламени обусловлено конденсацией паров воды, образующейся в результате сгорания смеси. Более крутое падение давления в конце процесса связано с исчезновением тепловой зоны пламени, начинающимся с момента подхода передней границы зоны горения к торцу. Момент касания пламенем торца отмечался с помощью ФЭУ-29, фиксировавшего излучение из прямого канала в пористой среде, расположенного в торцевом сечении трубы.

Оказалось, что во всех опытах продолжительность существования тепловой зоны пламени t_T равна продолжительности свечения t_b из канала, т. е. $t_T = t_b$. Другими словами, протяженности зоны горения и тепловой зоны пламени одинаковы. Отсюда следует важный вывод о структу-

ре зоны горения: процессы химического превращения и охлаждения продуктов сгорания идут в каждом сечении одновременно, т. е. очаги химической реакции соседствуют с охлаждающимися продуктами реакции. При этом охлаждение продуктов сгорания заканчивается практически в том же сечении, где исчезают последние очаги химической реакции. Это возможно только в том случае, если время охлаждения горячих продуктов реакции t_r (время тепловой релаксации) существенно меньше времени сгорания смеси t_b . В самом деле, время тепловой релаксации газа в насадке из стальных шаров диаметром 6 мм, оцененное по [5], равно 10^{-3} с, что на порядок меньше длительности существования зоны горения.

При оценке рассматривалась модель кондуктивного охлаждения нагретого газа в плоской щели с металлическими стенками, находящимися при постоянной температуре T_0 . Ширина щели $2R$ выбиралась таким образом, чтобы ее удельная поверхность $F = 1/R$ была равна удельной поверхности пористой среды на единицу свободного объема, т. е.

$$1/R = (1 - \varepsilon)/\varepsilon \cdot 6/d,$$

где d — диаметр шара, ε — пористость. За характерное время тепловой релаксации принималось время, за которое средняя температура газа в щели упадет в e раз. При начальном давлении 0,5 МПа, $T = 2000$ К, $T_0 = 300$ К для воздуха $t_r = 10^{-3}$ с. Необходимо отметить, что выбранная модель соответствует условиям экспериментов (без учета влияния конвекции, которая может только сократить время охлаждения), поскольку тепловая емкость шаров велика по сравнению с тепловой емкостью газа, а тепловая активность шаров много больше тепловой активности газа.

Таким образом, в настоящей работе определена протяженность зоны горения газовой смеси, находящейся в пористой среде, и сделан вывод о том, что зона горения содержит наряду с очагами химической реакции также и охлаждающиеся продукты. На основании полученных данных (протяженность зоны горения существенно больше толщины фронта ламинарного пламени, $S > S_u$, S растет с ростом давления в отличие от S_u (см. рис. 3)) можно сделать вывод о том, что режим распространения пламени в пористой среде имеет турбулентный характер. Важная особенность рассматриваемого процесса состоит в том, что в исследованном диапазоне давлений $t_b > t_r$. Следовательно, зона горения включает в себя как исходную смесь, так и холодные продукты сгорания, которые могут уже в самой зоне перемешиваться, приводя тем самым к существенной неполноте выгорания, обычно наблюдаемой при горении газов в пористых средах [2]. Кроме того, при интенсивном охлаждении продуктов сгорания условие отсутствия роста давления в закрытых сосудах при горении газов без увеличения числа молей может быть записано в виде $L > \delta$.

Поступила в редакцию 11/II 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Х. Шаулов. Распространение пламени через пористые среды. Баку: Изд-во АН АзССР, 1954.
2. В. С. Бабкин, В. А. Бунев, А. А. Коржавин. — В сб.: Горение газов и натуральных топлив. Черноголовка: ОИХФ, 1980.
3. О. Е. Попов, С. М. Когарко, В. А. Фотеев. Докл. АН СССР, 1974, 219, 592.
4. Г. М. Мамонтов, В. В. Митрофанов, В. А. Субботин. — В сб.: Детонация. Черноголовка: ОИХФ, 1980.
5. А. В. Лыков. Теплообмен. М.: Энергия, 1978.
6. G. E. Andrews, D. Bradley. Comb. Flame, 1972, 19, 275.