

О. Е. ПОПОВ, С. М. КОГАРКО, В. А. ФОТЕЕНКОВ

О БЫСТРОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В СРЕДАХ С ВЫСОКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

(Представлено академиком В. Н. Кондратьевым 16 IV 1974)

В соответствии с теорией предела распространения пламени ⁽¹⁾ горение газовой смеси, заполняющей пористую среду, не затухает в ней при условии, что размер каналов больше критического для данного состава смеси. В противном случае теплоотдача в стенку каналов прекращает распространение химической реакции по пористому веществу.

Условия распространения и гашения пламен газовых смесей в средах с пористостью до 0,4 (набивки из зернистых материалов типа гравия или металлических шаров) изучались в работе ⁽²⁾, где впервые было обнаружено, что пламя в набивках может ускоряться. Причиной такого ускорения, по-видимому, следует считать турбулизацию несгоревшей газовой смеси расширяющимися продуктами горения. Увеличение скорости пламени топливно-воздушных смесей было невелико: 2–3 раза по сравнению со скоростью в трубке без набивки при абсолютных значениях скоростей до 10 м/сек.

Для быстрых дефлаграционных и детонационных пламен, входящих в пористые среды, определены лишь пределы гашения ⁽³⁾. Механизм горения газа в пористом веществе, если пламя в нем не затухает, остается невыясненным, в особенности для класса веществ, у которых пористость может достигать величин 0,96–0,98. К таким веществам относятся, например, пенопласты, исследование распространения пламени в которых было целью настоящей работы.

Авторы изучали горение газообразных смесей, заполняющих пористую пластмассу — пенополиуретан (ППУ). Среда представляет собой ячеистую структуру застывшей пены и состоит из скелета, образующего такую структуру, и пленок-перегородок, разделяющих отдельные ячейки. Средний размер ячеек, определяющий плотность и пористость вещества, лежит в пределах от 0,8 для мелкоячеистого до 4 мм для крупноячеистого ППУ.

Методика исследований заключалась в фоторегистрации пламени газовой смеси, распространяющегося в пористом веществе, с одновременной фиксацией давления и ионизационного тока. Эксперименты проводились на установке (рис. 1), представляющей собой стальную двухсекционную трубу прямоугольного сечения 100×100 мм² и длиной 2 м. Секция А служила основной измерительной секцией со щелевыми окнами для получения фоторазвертки процесса, а также пьезоэлектрическими и ионизационными датчиками, сигнал с которых регистрировался на двухлучевом осциллографе ОК-24.

Взрывчатые смеси состава $C_2H_8 + 5O_2 + xN_2$, где $0 \leq x \leq 18,8$, готовились в отдельном смесителе и подавались в вакуумированную трубу, заполненную пористым материалом. Длину вставки материала меняли в пределах от 0,02 до 1 м, а с добавлением секции Б и до 2 м в зависимости от необходимости изменять скорость пламени до вхождения в пористую среду и для выяснения возможности достижения пламенем максимальной постоянной скорости. Горение в большинстве случаев инициировалось пере-

жиганием тонкой медной проволоочки в торце секции *A* или *B*. В ряде экспериментов производились фоторазвертки горения в стеклянных трубках $\varnothing 28$ мм с вставками из пористого материала при зажигании как у закрытого, так и у открытого конца трубки.

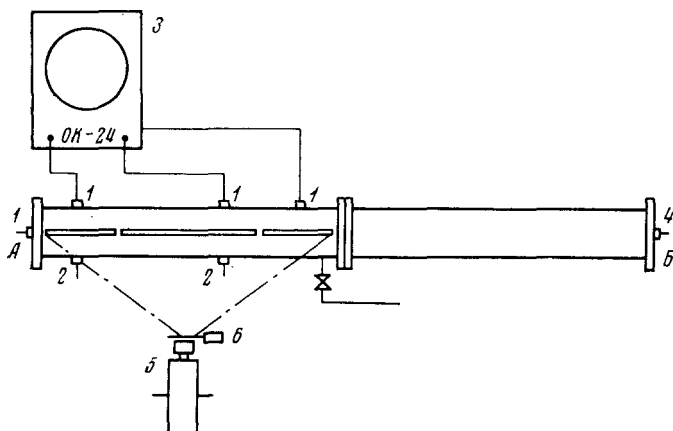


Рис. 1. Схема установки для исследования распространения пламени в пористой среде. 1 — пьезодатчики, 2 — ионизационные датчики, 3 — катодный осциллограф, 4 — свеча зажигания, 5 — фоторегистр, 6 — затвор

По осциллограммам давления и ионизационного тока можно было определить среднюю скорость процесса горения и проследить за формированием ударной волны в пористой среде. Для выяснения характера развития процесса горения во времени проводились фоторегистрации самосвечения на вращающуюся пленку. На рис. 3 показаны примеры фоторегистрации и их расшифровка в координатах x, t . До вхождения в пористую среду пламя ведет себя так же, как и в короткой трубке, не заполненной пористым веществом. В частности, при зажигании у закрытого конца за счет заметной разницы в акустических сопротивлениях газовой и пористой среды наблюдается замедление или даже отброс пламени волнами сжатия, отраженными от границы раздела. После вхождения в пористую среду за счет интенсивной турбулизации течения пламя резко ускоряется, формируя ударную волну, которая в дальнейшем участвует в распространении процесса горения в пористом веществе.

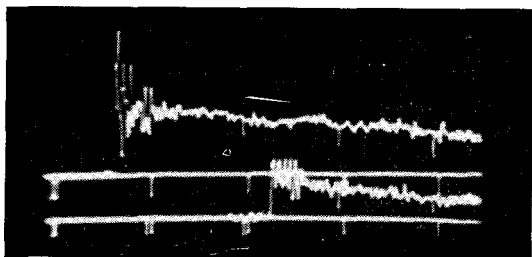


Рис. 2. Осциллограмма давления в волне, распространяющейся по пористому веществу. Между отметками времени 250 мксек.

При наблюдающихся скоростях температура в проходящей волне T_2 , рассчитываемая по соотношению

$$T_2/T_1 = (2\gamma M_1^2 - \gamma + 1)(2M_1^{-2} + \gamma - 1)/(\gamma + 1)^2,$$

где $M_1 = D/c_1$, а $\gamma = c_p/c_v$ недостаточна, чтобы воспламенить смесь с малыми задержками. Об этом также свидетельствует картина выхода ударной волны и пламени из пористого материала с последующим воспламенением при отражении волны от торца трубы. Мы полагаем, что при движении волны в материале отражение от скелета и перегородок, как от стенки с

плотностью $\rho = 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³, приводит к возникновению множественных местных очагов воспламенения, позволяющих пламени следовать за ударной волной со скоростями до 1600 м/сек. Скорость такого быстрого сверхзвукового горения при постоянном составе газовой смеси зависит от пористости материала и при неизменной ее величине горение распространяется с постоянной скоростью, но заметно меньшей скорости детонации в гладкой трубе.

Подтверждением предлагаемого механизма распространения пламени в пористой среде и роли ударной волны в этом механизме могут служить опыты, результаты которых представлены на рис. 3б, где ударная волна,

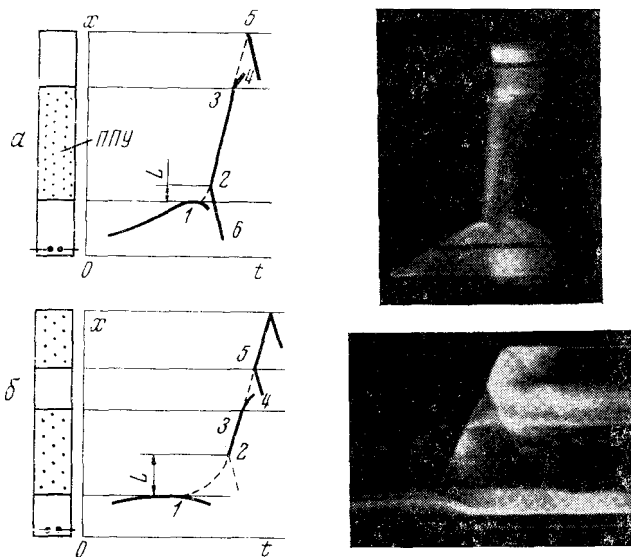


Рис. 3. Развертка движения пламени в трубе с пористым веществом. 0-1 — след пламени до входа в ППУ, 1-2 — слабо различимое ускоряющееся пламя, 2-3 — фронт сверхзвукового горения, 3-4 — пламя, выходящее из ППУ, 5 — воспламенение у торца трубы, 6 — детонационная волна; а — $C_3H_8 + 5O_2 + 3N_2$, б — $C_3H_8 + 5O_2 + 7N_2$

выходящая из одного блока материала и не воспламеняющая смесь, так как температура газа, сжатого в ней, недостаточна, входит во второй блок такого же материала, где процесс сверхзвукового горения начинается без участка разгона непосредственно сразу после взаимодействия фронта волны с поверхностью материала. Скорость горения во втором блоке оказывается постоянной и равной скорости в первом.

В том случае, когда в пористую среду входит не ударная волна докритической амплитуды, а медленно распространяющееся пламя, режим быстрого сверхзвукового горения формируется не сразу, а на длине, которая зависит от состава смеси и уменьшается для быстро горящих газовых смесей. Ниже приводятся данные измерений длины участка формирования в зависимости от разбавления стехиометрической пропан-кислородной смеси азотом при постоянном начальном давлении 1 атм для среды с пористостью 0,97.

xN_2	0	3	4	5	6	7	8
$D_{ст}$, 10^3 м/сек	1,60	1,46	1,39	1,32	1,20	1,11	1,03
L , мм	7,0	19	24	31	39	47	58
L/ϕ	0,25	0,68	0,86	1,1	1,4	1,7	2,1

При отсутствии разбавления участок формирования чрезвычайно мал и составляет $1/4$ калибра трубы. Здесь же показаны измеренные значения стационарных скоростей процесса горения для тех же смесей. Эксперимен-

ты проводились при разбавлении смеси азотом вплоть до 18,8 (топливо-воздушная смесь), но при $x > 10$ пламя по исследуемой пористой среде не распространяется ни с большими скоростями, ни с малыми.

При анализе механизма быстрого сверхзвукового распространения пламени с постоянной скоростью в пористой среде следует вспомнить опыты К. И. Щелкина в шероховатых трубах (⁴, ⁵), показавшего значительное влияние аэродинамических факторов, в частности турбулентности, на процесс ускорения пламени. С помощью спирали, расположенной вдоль стенки трубы, создавался пристеночный очаг воспламенения, а пламя распространялось от периферии к центру трубы, образуя сильно вытянутую турбулентную область сгорания. Такой механизм воспламенения при отражении, предложенный Я. Б. Зельдовичем (⁶), позволяет пламени в шероховатых трубах двигаться с постоянной скоростью до $0,4 D$, где D — скорость детонации в гладкой трубе.

Из наших опытов следует, что такой механизм может осуществляться не только в шероховатых трубах, но и в средах с высокой пористостью, в частности в пенопластмассах. В отличие от шероховатых труб, препятствия на пути ударной волны, служащие источником воспламенения при отражении, находятся не только у стенки, но и во всем пространстве внутри трубы. В промежутках между очагами воспламенения смесь сгорает по механизму турбулентного горения, образуя множественные, но значительно более короткие, чем в шероховатых трубах, шлейфы пламени.

Распространение пламени со сверхзвуковой постоянной скоростью, обусловленное участием ударной волны, сближает процесс быстрого горения в пористой среде с детонационным горением. Но, так как скорость его зависит от пористости и ниже, чем может быть для детонации с потерями, этот режим, так же как и «детонация в шероховатых трубах», является еще одним примером «неклассической» детонации (⁷). Оба эти случая могут быть объединены одним термином «детонация с малой скоростью» в газообразных взрывчатых смесях.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
10 IV 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ, т. 11, 159 (1941). ² Ю. Х. Шаулов, Распространение пламени через пористые среды, Баку, 1954. ³ А. И. Розловский, Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами, М., 1972. ⁴ К. И. Щелкин, ЖЭТФ, т. 10, 823 (1940). ⁵ К. И. Щелкин, Быстрое горение и спиновая детонация газов, М., 1949. ⁶ Я. Б. Зельдович, Теория горения и детонации газов, Изд. АН СССР, 1944. ⁷ К. И. Щелкин, В сб. Механика в СССР за 50 лет, т. 2, «Наука», 1970.