

О РЕЖИМЕ БЫСТРОГО ДОЗВУКОВОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ В ИНЕРТНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ПЛАВНЫМ ПОДЪЕМОМ ДАВЛЕНИЯ В ВОЛНЕ

Г. А. Лямин, А. В. Пинаев

(Новосибирск)

В последние годы наряду с изучением детонации и горения в ударных трубах проводится исследование процессов сгорания газов в пористых системах. Это вызвано не только научным, но и практическим интересом, например, в связи с проблемой обеспечения взрывобезопасности — применением огнепреградителей при эксплуатации газовых систем [1, 2]. В [3—5] изучались стационарные режимы распространения пламени по воздушным смесям некоторых углеводородов в засыпках из шариков и в пенополиуретане со скоростями $D \approx 0,1 \div 5$ м/с; в экспериментах с более активными смесями [6—10] в аналогичных средах зарегистрированы детонационные (сверхзвуковые) режимы сгорания ($D \approx \geq 400 \div 500$ м/с [9—10]). В [11] при исследовании ацетиленовоздушных смесей в насыпных средах установлено, что при изменении начального давления возможен внезапный переход турбулентного горения ($D_{\max} \approx \approx 5 \div 50$ м/с) в детонацию, т. е. в отличие от [3—10] на смесях фиксированного (а не только разного) состава получены режимы и горения, и детонации.

Однако до настоящего времени не выяснено, реализуются ли в пористых системах процессы с $50 \leq D \leq 400 \div 500$ м/с и возможны ли здесь какие-то качественно новые стационарные режимы горения. Ввиду значительной сложности явления и отсутствия теоретических моделей экспериментальный подход к выяснению этих вопросов является в настоящее время единственным.

Эксперименты выполнены в вертикально расположенных стальных трубах диаметром $d = 35$ и 20 мм, длиной $L = 3$ и $0,7$ м, заполненных стальной дробью размером $\delta = 2,6 \div 3,6$ мм. Величина L/d_k в настоящих опытах $\geq 10^3$ (средний размер каналов $a_k \approx \delta/3$), пористость сред составляла $35\text{—}40\%$. Исследовали смеси состава $\alpha\text{H}_2 + (100\% - \alpha)\text{O}_2$ ($\alpha = 10 \div 20\%$). Смеси инициировали у верхнего торца трубы накаливанием или подрывом нихромовой проволоки от батареи конденсаторов.

Методика исследований заключалась в регистрации скорости, свечения и профиля давления в волнах реакции. Свечение фиксировали фотоумножителями ФЭУ-31 через световоды, установленные напротив пьезодатчиков. Пьезодатчики (собственная частота 300 кГц) подключали к истоковым повторителям с постоянной времени ~ 1 с; свечение и давление записывали осциллографом С8-14. Скорость волн определяли высокочувствительными ионизационными датчиками, расположенными вдоль трубы, и частотомерами ЧЗ-34. Непрерывную регистрацию D на начальном участке засыпки проводили для некоторых смесей через прозрачную секцию фоторегистратором барабанного типа. Погрешность измерения давления p не превышала 10% , $D - 1\text{—}3\%$. При малом перепаде давления в волне горения для исключения записи паразитных сигналов из-за деформации корпуса датчика при тепловом контакте с пламенем его поверхность защищали слоем вязкой жидкости.

В экспериментах установлено, что в исследуемых системах наряду с известными стационарными режимами: I — низкоскоростным дозвуковым ($D < 10$ м/с) без изменения давления в волне горения, III — сверхзвуковым (детонационным) с ударным скачком во фронте и $D \approx \geq 400 \div 500$ м/с, осуществляется и режим II — высокоскоростной дозвуковой ($D \sim 10^2$ м/с) с плавным повышением давления в волне реакции. В режимах I и II скорость в среднем равномерна и структура волн неизменна по длине трубы, но, строго говоря, эти режимы являются квазистационарными из-за возможного слабого изменения давления в

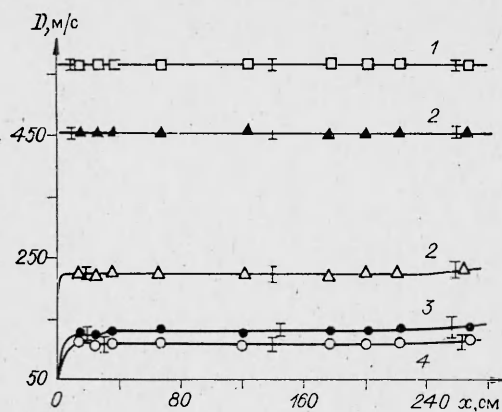


Рис. 1. Измерение D для волн горения и детонации по длине трубы в водородокислородных смесях, $\delta = 2,6 \div 3,6$ мм. α , %: 20 (1), 18 (2, 3), 17 (4); p_0 , атм: 2 (1), 3 (2), 1,5 (3), 2 (4).

системе перед волной в установке ограниченного размера (для обеспечения большей стационарности процесса обычно снизу трубы подсоединяли ресивер объемом 2 л).

На рис. 1 в качестве примера приведено несколько кривых $D(x)$, где x — расстояние от начала пористой среды; точки соответствуют

положениям ионизационных датчиков, а начальный участок построен по фоторазверткам процесса. Для режима III скорость устанавливается на длине нескольких десятков d_k — примерно на порядок быстрее, чем для режимов I и II. Относительный разброс скорости для режима III меньше, чем для I и II, к концу трубы для режимов I, II наблюдается незначительный рост D , что связано с влиянием торца трубы.

В режимах I давление в системе до прихода волны изменяется менее чем на 3–5%, перепад давлений в волне горения отсутствует (как и в [3–5]). В волнах детонации (III), как и в [9, 10], регистрируется скачок давления во фронте, перед волной p постоянно; скачок p во фронте, длительность свечения и спада p растут с повышением p_0 и δ .

Для режима II (рис. 2) характерно наличие области повышенного давления в волне, максимум p лежит вблизи места начала горения, рост и спад p плавный (происходит поджатие несгоревшего газа, а затем расширение и охлаждение продуктов реакции), длительность фазы сжатия $\sim 10^{-3}$ с, пространственная протяженность волны $l_w \approx 10 \div 20$ см. Перепад давлений в волне $\Delta p = (p_{\max} - p_0)/p_0 \approx 2 \div 5$ (зависит от D и состава смеси). На расстояниях $\geq 0,3-0,5$ м от волны давление возрастает менее чем на 3%, но и это значение следует считать завышенным, поскольку величина регистрируемых датчиками паразитных акустических наводок по стенкам трубы была такого же порядка. Падение p за волной по сравнению с p_0 (см. рис. 2, а) в смесях $H_2 - O_2$ менее 15–20%, и можно оценить, что полнота сгорания в системе не превышает 70%. По мере продвижения волны быстрого горения профиль давления и характер свечения не меняются, что проиллюстрировано на рис. 2, б, где записи давления и свечения получены в разных сечениях

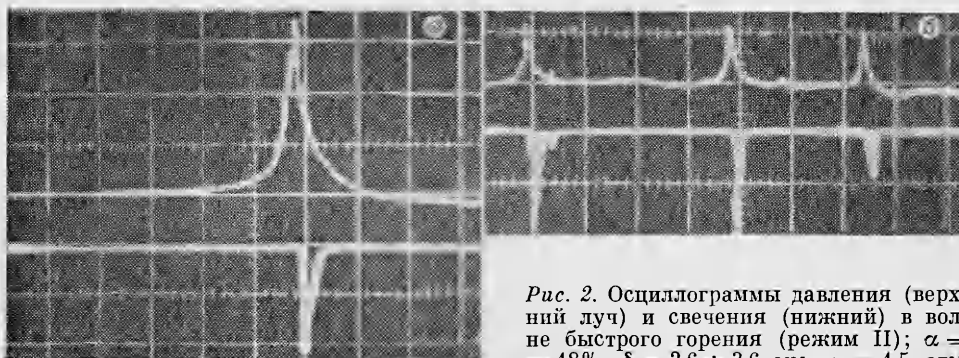
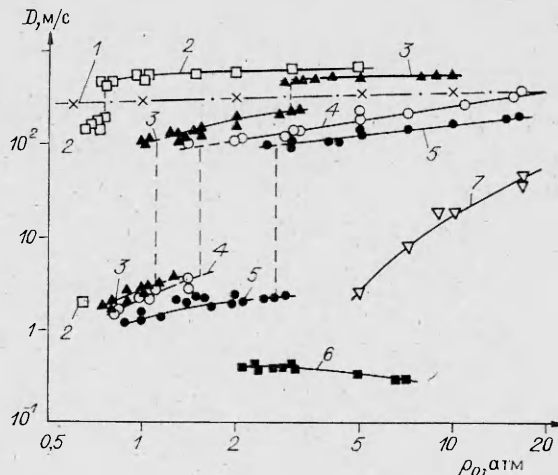


Рис. 2. Осциллограммы давления (верхний луч) и свечения (нижний) в волне быстрого горения (режим II); $\alpha = 18\%$, $\delta = 2,6 \div 3,6$ мм, $p_0 = 1,5$ атм, $D = 130$ м/с.

Масштаб по горизонтали, мс/дел: 0,5 (а), 2 (б), по вертикали, атм/дел: 1,1 (а) и 3,1; 3,15; 3,4 (б). Положение датчиков x , см: 160 (а) и 45, 155, 230 (б).

Рис. 3. Экспериментальные зависимости $c_{оп}(p_0)$ для $\nu = 0,5 \div 3$ кГц (1) и $D(p_0)$ (2-7); $\delta = 2,6 \div 3,6$ мм (1-6) и $0,7 \div 1,2$ мм (7). α , %: 1 - $15 \div 20$, 2 - 20, 3 - 18, 4 - 17, 5 - 15, 6 - 10; 7 - $\beta = 7\%$.



В одном опыте (сигналы с фотоумножителей зависят от взаимного положения световодов и частиц и поэтому обычно различаются по величине). Подобие профиля p во времени, сохраняющееся различие давлений перед и за волной объясняются затрудненной фильтрацией газа из

области повышенного p через пористую среду и затуханием слабых звуковых возмущений давления. Продольные градиенты давления ослабляются сопротивлением трения движущегося газа о среду, что приводит к спаду давления и остановке потока уже на небольших расстояниях от зоны реакции.

Установившиеся значения D в пористой среде в зависимости от p_0 представлены на рис. 3. При $\alpha = 10\%$ наблюдается только режим I со скоростью, близкой к нормальной скорости пламени u_n и убывающей с ростом p_0 . В более активных смесях ($\alpha = 15 \div 18\%$) при определенных p_0 происходит скачкообразный переход с режима I на режим II, интенсивность свечения и D увеличиваются при этом более чем на порядок, минимальные значения $D_{II} \approx 80 \div 100$ м/с.

Скорость звука в пористой среде $c_{оп}(\nu)$ измеряли двумя электромагнитными датчиками (излучатель и приемник звуковых колебаний в диапазоне частот $\nu = 0,5 \div 3$ кГц). По результатам измерений $c_{оп}(\nu)$ на 10-25% ниже скорости звука в газе. Переход через скорость звука с режима II на III происходит либо скачком ($\alpha = 18 \div 20\%$), либо непрерывно ($\alpha = 17\%$). В области p_0 , где ситуация неоднозначна (штриховые линии на рис. 3), в зависимости от инициирования реализуется один из трех режимов по всей длине трубы либо по мере распространения волны один режим сменяется другим. С удалением от таких значений p_0 процесс устойчив по всей длине независимо от способа инициирования, и результаты опытов воспроизводимы.

В других смесях возможны промежуточные между режимами I и II состояния и плавные переходы с I на II. Этот результат получен для ацетиленовоздушных смесей состава $\beta C_2H_2 + (100\% - \beta)$ воздух ($\beta = 6 \div 8\%$) в засыпке из песка ($\delta = 0,7 \div 1,2$ мм). Здесь, например, при $\beta = 7\%$ с изменением D от 20 до 50 м/с (см. рис. 3, 7) в волне горения II с плавным профилем давления (как в смесях $H_2 - O_2$) уже регистрируется подъем давления $\Delta p \approx 0,1 \div 1$. Диапазон скоростей $10 \leq D \leq 20$ м/с, где $\Delta p < 0,1$ можно считать промежуточным между I и II, кривая зависимости $D(p_0)$ непрерывна и переход с режима I на II осуществляется плавно.

Существование волн горения, которые имеют качественное и количественное отличие от волн низкоскоростного горения и детонации в пористых системах, позволяет выделить отдельно стационарные режимы быстрого горения с наличием области сжатия в волне реакции.

Из сопоставления значений D в различных режимах со скоростью детонации D_0 в гладкой трубе ($L = 7$ м, $d = 35$ мм) со смесями $H_2 - O_2$ при $p_0 = 0,2 \div 3$ атм следует, что минимальные значения $D_{III} = 0,25D_0$ и $D_{II} \approx 0,06D_0$ (при $p_0 = 1$ атм $D_0(\alpha = 18\%) = 1455 \pm 5$ м/с, $D_0(\alpha = 20\%) = 1535 \pm 5$ м/с). Анализ экспериментальных данных, полученных в раз-

личных условиях, позволяет установить, что для достоверности результатов необходимо соблюдение критериев: $d/d_k \gg 1$, $L/d_k \gg 1$, $L/l_b \gg 1$. В более бедных смесях D и скорость ее роста (с повышением p_0) при прочих равных условиях заметно ниже, чем в более активных (см. рис. 3), что, вероятно, является следствием влияния потерь на тепловыделение и химическую кинетику в зоне реакции. Минимум $D^*(p_0^*)$ для каждой из кривой 2—6 на рис. 3 соответствует предельным значениям D . Несмотря на то, что $D^* > u_n$, величину p_0^* можно оценить по критерию Пекле ($Pe = 65$), как это, сделано, например, в [1, 9, 10]. Механизмы сгорания в режимах I и III обсуждались в [3—5, 9—11]. В режиме II пламя распространяется по турбулентному механизму, из-за высокой скорости фильтрации поток газа в волне турбулизован сильнее, чем в режиме I, и перед воспламенением имеет место заметное сжатие газа.

В данных экспериментах при изменении p_0 в водородно-кислородных смесях обнаружены скачкообразные переходы с режимов низкоскоростного горения I при $1 \leq D \leq 10$ м/с на режимы II быстрого горения ($D \approx 10^2$ м/с) с четко обозначенной областью существования. В смесях $C_2H_2 +$ воздух возможны режимы II без явно выраженной по p_0 нижней границы — переход на эти режимы с I осуществляется плавно с повышением p_0 . Наличие обособленного и явно выделенного режима быстрого горения в водородно-кислородных смесях объясняется, по-видимому, особенностями химической кинетики для этих смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Розловский. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1980.
2. И. И. Стрижевский, В. Ф. Заказнов. Промышленные огнепреградители. М.: Химия, 1966.
3. В. С. Бабкин, В. А. Бунев, А. А. Коржавин.— В кн.: Горение газов и натуральных топлив. Черноголовка, 1980.
4. А. А. Коржавин, В. А. Бунев и др. ФГВ, 1982, 18, 6, 20.
5. В. С. Бабкин, В. А. Бунев и др. ФГВ, 1985, 21, 5, 17.
6. Г. М. Мамонтов, В. В. Митрофанов, В. А. Субботин.— В кн.: Детонация. Черноголовка, 1980.
7. О. Е. Попов, С. М. Когарко, В. А. Фотеенков. Докл. АН СССР, 1974, 219, 3, 592.
8. С. W. Kauffman, Yan Chuanjun, J. A. Nicholls. XIX Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1982.
9. Г. А. Лямин, А. В. Пинаев.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 68. Новосибирск, 1984.
10. Г. А. Лямин, А. В. Пинаев. Докл. АН СССР, 1985, 283, 6, 1351.
11. Г. А. Лямин, А. В. Пинаев. ФГВ, 1986, 22, 5, 64.

Поступила в редакцию 27/VI 1986,
после доработки — 13/X 1986

ВЕРХНИЙ КОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ ПРЕДЕЛ ГОРЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ Mg — ПММА — NaNO₃

М. М. Арш, Н. Н. Бахман, А. В. Корнилов,
А. М. Коробков, Е. М. Кривуца, И. Н. Лобанов
(Москва)

В работе [1] изучен верхний концентрационный предел (ВКП) горения смесей ПХА + ПММА и ПХА + полистирол при различной дисперсности окислителя и различном давлении. В данной работе проведены аналогичные опыты с модельной системой $C \cdot Mg + (100 - C) (NaNO_3 + \text{ПММА}, \alpha = 1)$. Варьировались процентное содержание C и дисперсность магния и давление.

Опыты проведены с прессованными ($p_{\text{пресс}} = 3000$ атм) образцами диаметром 10 мм. Относительная плотность образцов $\delta = \rho/\rho_{\text{max}}$ была