

ДЕТОНАЦИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ С ПОПЕРЕЧНЫМИ РЕБРАМИ

В. И. Манжалей

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, manzh@hydro.nsc.ru

Представлены результаты экспериментов по распространению детонации в прямоугольном горизонтальном канале с высокими ребрами на нижней стенке. Опыты проводились с ацетиленокислородными смесями. Обнаружен интервал начальных давлений, в котором существует низкоскоростная детонация со стационарной скоростью $0.38 \div 0.55$ от скорости детонации Чепмена — Жуге без потерь. Эта детонационная волна является комплексом, состоящим из ударной волны и пламени. Пламя за счет оттока газа в слой, занятый ребрами, удерживается на постоянном расстоянии от ударного скачка, примерно равном свободному поперечному размеру канала. Это расстояние слабо уменьшается с ростом начального давления и почти не зависит от скорости горения газа при нормальной температуре.

Ключевые слова: ударная волна, детонация, пламя, низкоскоростная детонация, отток в пограничный слой, шероховатый канал, ацетиленокислородная смесь.

ВВЕДЕНИЕ

Низкоскоростная детонация взрывчатых газовых смесей обнаруживается в трубках малого диаметра вблизи нижнего предела распространения фронта химического превращения. Ее скорость равна $(0.4 \div 0.55)D_0$, где D_0 — скорость идеальной детонации без потерь [1–3]. При торможении ядра потока за ударной волной за счет ухода газа в вязкий пограничный слой на стенке трубы пламя удерживается на расстоянии в несколько диаметров канала от ударной волны [1–3]. Пламя устанавливается там, где скорость газа в ядре потока равна нормальной скорости пламени в системе отсчета ударного скачка.

Очевидно, что можно организовать более быстрый отток газа по сравнению со стоком в пограничный слой, например, в канале с поперечными ребрами или крупными шероховатостями на стенке. В этом случае расстояние от ударного скачка до пламени должно существенно сократиться.

Впервые детонация в шероховатых трубках исследовалась в работе [4], где были обнаружены небольшое уменьшение скорости детонации и существенное сокращение времени перехода от горения к детонации. Исследования в каналах с крупной шероховатостью проводились в [5]. В смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ была обнаружена детонация с весьма низкой скоростью,

$550 \div 1000$ м/с. В распространении такого режима основная роль отводилась процессам реинициирования и дифракции пламени на препятствии.

Одной из целей данной работы является проверка соответствия данных эксперимента модели низкоскоростной детонации с удержанием пламени на постоянном расстоянии от ударной волны за счет оттока газа в толстый пристенный слой канала с поперечными ребрами.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Детонационный канал состоял из медной разъемной прямоугольной трубы сечением $B \times A = 57 \times 25$ мм и длиной 2.3 м, состыкованной с оптической секцией длиной 26 см (длина стекла 18.9 см, рис. 1). Он устанавливался горизонтально, при этом сторона B была вертикальной. Перед опытом канал вакуумировался и заполнялся исследуемой смесью со стороны оптической секции. Эксперимент проводился с двумя ацетиленокислородными смесями:



Рис. 1. Оптическая секция детонационной трубы

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-01-00817).

$C_2H_2 + 5O_2$ и $C_2H_2 + 11O_2$.

На дно канала на всем его протяжении устанавливалась металлическая полоса с поперечными ребрами высотой $H = 23$ мм, расположенными через 25 мм. Для свободного движения газа оставалась верхняя часть канала высотой $h = 34$ мм. Детонация инициировалась искрой.

Съемка велась перпендикулярно продольной оси канала фоторегистратором совместно с тепловым прибором ИАБ-451 с просвечиванием импульсной лампой, синхронизированной с моментом инициирования и с вращением зеркала. На оптической секции располагалась маска с горизонтальной щелью, прорезанной на 20 мм ниже верхнего края канала. В опытах варьировалось начальное давление взрывчатых смесей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Фоторазвертки детонации приведены на рис. 2. Темная линия — ударная волна, светлая соответствует зоне тепловыделения. Ось времени направлена вправо. Реальный размер по вертикали 18.9 см. По результатам обмера разверток построены зависимости скоростей детонации D от начального давления p_0 (рис. 3). Второй фронт на рис. 2, а, в — наклонная ударная волна, состоящая из ударных волн, отраженных от ребер. На рис. 2, б, в видны ударные волны, исходящие из пламени и «подпитывающие» основной ударный фронт.

В смеси $C_2H_2 + 5O_2$ низкоскоростная детонация наблюдалась в диапазоне $p_0 = 0.012 \div 0.052$ атм и ее скорость возрастала от 770 до 980 м/с. При $p_0 \geq 0.044$ атм наблюдалась многофронтная детонация со скоростью от 1550 м/с и дефицитом скорости до 26 % по сравнению с расчетным значением. Скорость детонации этой смеси без потерь 2100 м/с при $p_0 = 0.1$ атм (расчет по программе «Безопасность» [6]). В дополнительных опытах с этой смесью, выполненных в круглой гладкой трубе диаметром 18 мм, спиновая детонация регистрировалась начиная с $p_0 = 0.032$ атм, ее скорость составляла 1800 м/с. Гидравлический диаметр свободной части прямоугольного канала 28.8 мм, что в 1.6 раза больше, чем диаметр трубы, а предельное значение p_0 в 2.7 раза меньше. Поэтому можно сказать, что наличие ребер в 1.7 раза уменьшает предел по давлению для распространения химического превращения в каналах.

В смеси $C_2H_2 + 11O_2$ низкоскоростная детонация наблюдалась при $p_0 = 0.04 \div 0.16$ атм и ее скорость менялась в диапазоне 700 ÷ 1000 м/с. Многофронтная детонация наблюдалась при $p_0 \geq 0.18$ атм и распространялась со скоростью $D \geq 1470$ м/с.

На рис. 4 приведено изменение расстояния L от ударного скачка до фронта пламени в зависимости от начального давления. Это расстояние оказалось примерно равным высоте свободной части канала и слабо росло со скоростью детонации.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ

Выполнена оценка расстояния от ударной волны до точки, в которой поток останавливается относительно ударного фронта. Для этого рассчитывали поперечную скорость газа по теории распада произвольного разрыва.

Считалось, что поперечная ударная волна в «кармане» формируется путем распада состояния за основным скачком с повышенными температурой и давлением и нулевой поперечной скоростью. Между ударной волной и областью повышенного давления находилась центрированная волна разрежения.

Для обеих смесей расчет выполнялся при отношении теплоемкостей $\gamma = 1.3$. Вначале находили отношение давления, плотности и скорости звука на ударной волне:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{2\gamma M^2}{\gamma + 1} - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1},$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{(\gamma - 1)M^2 + 2}, \quad \frac{c}{c_0} = \sqrt{\frac{p\rho_0}{p_0\rho}},$$

где ρ , ρ_0 — текущая и начальная плотность, $M = D/c_0$ — число Маха волны, c , c_0 — текущая и начальная скорость звука. Затем по формуле [7]

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{2\gamma M^2}{\gamma + 1} - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \times \left[1 - \frac{c_0}{c} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \left(M_{\perp} - \frac{1}{M_{\perp}} \right) \right]^{-\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}$$

вычислялось число Маха M_{\perp} поперечной ударной волны в «кармане». Расстояние до точки остановки потока за основной ударной волной получалось из равенства потока массы через нее и потока в «слой» ребер длиной x :

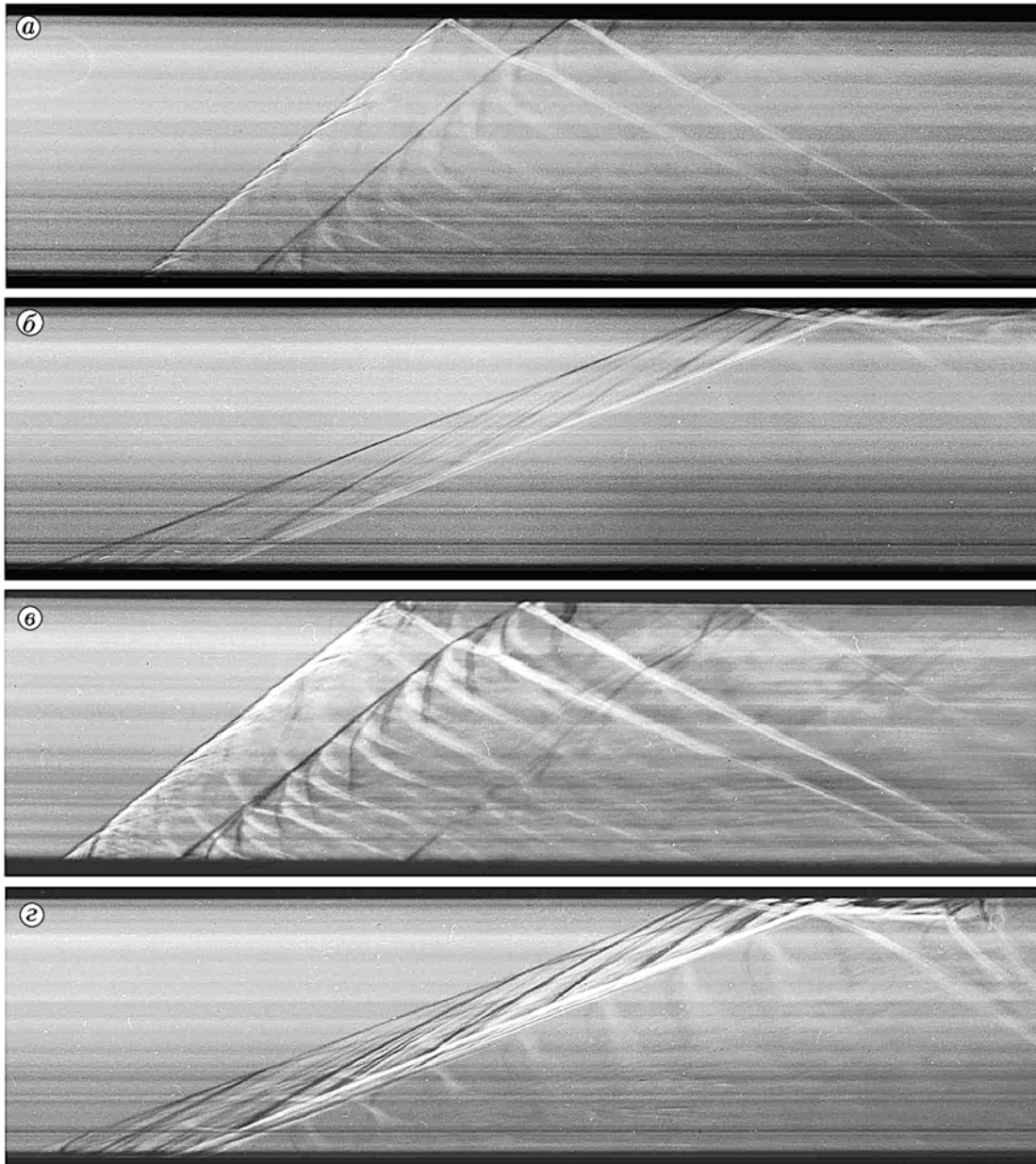


Рис. 2. Многофронтная (а, в) и низкоскоростная (б, г) детонация в смесях $C_2H_2 + 5O_2$ (а, б) и $C_2H_2 + 11O_2$ (в, г):

а — $p_0 = 0.056$ атм, $D = 1740$ м/с; б — $p_0 = 0.012$ атм, $D = 770$ м/с; в — $p_0 = 0.192$ атм, $D = 1640$ м/с;
г — $p_0 = 0.056$ атм, $D = 750$ м/с

$$\rho_{\perp} u_{\perp} x = \rho_0 D h,$$

где ρ_{\perp} и u_{\perp} — плотность и скорость за поперечным скачком, h — расстояние от гребня ребра до верхней стенки канала.

Результаты расчета поперечной массовой скорости в зависимости от числа Маха основной волны приведены в таблице. В диапазоне $M = 2.3 \div 3.0$ ($D = 760 \div 990$ м/с) число Маха

поперечной волны менялось от 1.55 до 1.74, а скорость газа за фронтом поперечной волны — от $0.79c_0$ до $1.01c_0$. В этих условиях расстояние от ударной волны до точки остановки потока варьировалось в диапазоне $x = (1.43 \div 1.24)h$.

Учет скорости горения смеси $C_2H_2 + 5O_2$ на расстоянии от ударной волны до пламени $x' \cong x(1 - v/u)$ приводит к уменьшению этого расстояния до $(1.28 \div 1.04)h$ в границах диа-

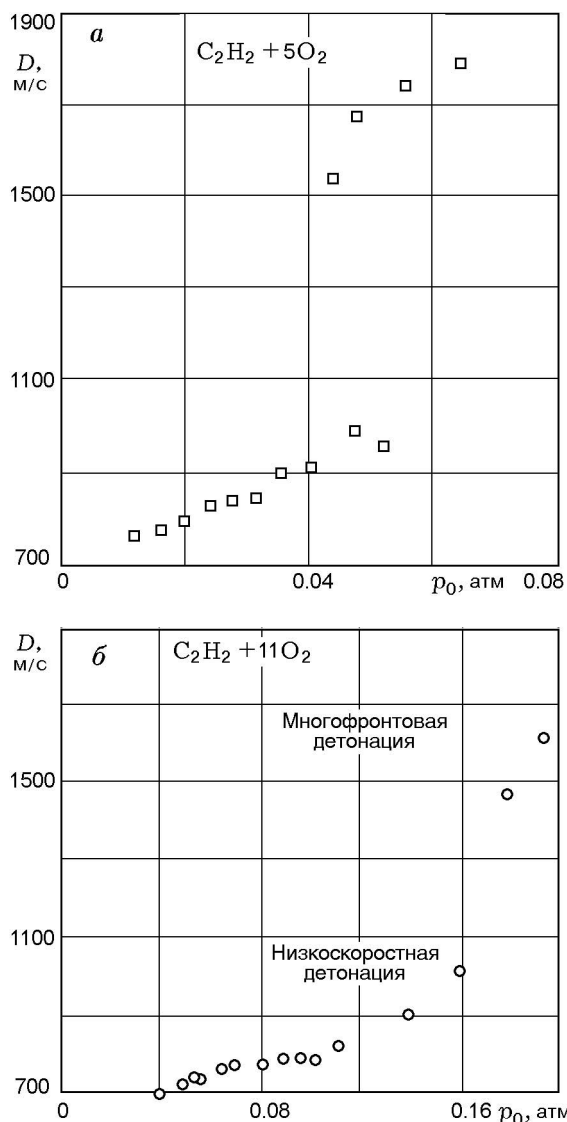


Рис. 3. Зависимость скорости детонации смесей $C_2H_2 + 5O_2$ (а) и $C_2H_2 + 11O_2$ (б) от начального давления

пазона, что почти совпадает с экспериментом (здесь u — скорость газа относительно основного ударного скачка, $v = v_0 T^2 / T_0^2$ — скорость пламени относительно газа [7], T — температура перед пламенем, $v_0 = 9$ м/с — скорость ламинарного пламени при комнатной температуре T_0 в смеси $C_2H_2 + 5O_2$ [3, 8]). Некоторое различие может быть связано с тем, что не учитывается турбулизация пламени ударными волнами, отраженными от ребер.

Ниже рассмотрен еще один метод оценки величины оттока газа в область ребер. Нижний край ударного скачка вблизи ребер пульсиру-

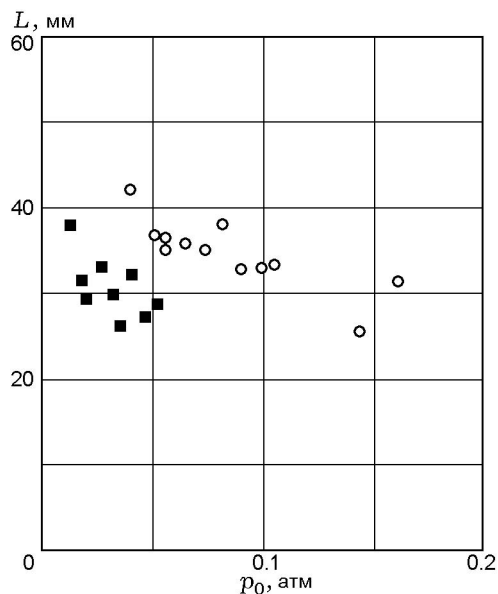


Рис. 4. Зависимость расстояния от ударного скачка до пламени от начального давления (кружки — более бедная смесь)

Сравнение экспериментальных и расчетных величин

Смесь газов	$C_2H_2 + 5O_2$		$C_2H_2 + 11O_2$		
v_0 , м/с	9.3		5		
M	2.3	3	2.3	3	
D , м/с	760	990	760	990	
L/h (эксперимент)	1.03	0.76	1.18	0.82	
Расчет по распаду произвольного разрыва	x/h	1.44	1.24	1.44	1.24
	x'/h	1.29	1.04	1.36	1.10
Расчет по максимальной поперечной скорости	x/h	1.32	0.74	1.32	0.74
	x'/h	1.18	0.63	1.24	0.68

ет из-за его взаимодействия с ребрами. Тем не менее можно определить средний угол $\varphi < \pi/2$ между втекающим потоком и скачком, что является следствием поворота потока в сторону ребер. За косым ударным скачком компоненту скорости, перпендикулярную слою ребер, можно определить по формуле

$$u_{\perp} = u \sin \chi,$$

где согласно [9]

$$u = c \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M^2}{2\gamma M^2 \sin^2 \varphi - (\gamma - 1)} \right) +$$

$$c = c_0 \left(\frac{p}{p_0} \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2} + \frac{2M^2 \cos^2 \varphi}{2 + (\gamma - 1) \cos^2 \varphi} \Big)^{1/2},$$

$$\frac{p}{p_0} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M^2 \sin^2 \varphi - 1),$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{2(M^2 \sin^2 \varphi - 1)}{(\gamma - 1)M^2 \sin^2 \varphi},$$

$$\chi = \operatorname{arccctg} \left\{ \operatorname{tg} \varphi \left[\frac{(\gamma + 1)M^2}{2(M^2 \sin^2 \varphi - 1)} - 1 \right] \right\} —$$

угол поворота потока в косо́й ударной волне.

Предполагая, что реализуется максимальная поперечная скорость, для диапазона $M = 2.3 \div 3$ из численного решения этих уравнений получаем максимальную поперечную скорость $(0.676 \div 1.041)c_0$ и расстояние от ударной волны до точки останова́ потока $(1.32 \div 0.74)h$ [мм] соответственно. Учет скорости пламени для смеси $C_2H_2 + 5O_2$ уменьшает это расстояние до $(1.18 \div 0.63)h$, что практически совпадает с экспериментом. Учет турбулизации пламени еще больше снизит эти величины, поэтому первую оценку следует считать более правильной. Она же более обоснована физически.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов обнаружены низкоскоростные режимы детонации в трубах с поперечными ребрами в ацетиленокислородных смесях газов. Определены области существования таких режимов. Обнаружено небольшое снижение предела детонации по давлению за счет наличия поперечных препятствий.

Расстояние от ударного скачка до пламени оказалось примерно равным поперечному размеру канала. Приближенные расчеты этих расстояний, учитывающие поток массы в область ребер и связанное с этим торможение основного потока относительно ударного фронта, хорошо согласуются с опытом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манжале́й В. И. Режимы детонации газа в капиллярах // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 93–100.
2. Манжале́й В. И. Низкоскоростная детонация газа в капиллярах // Докл. АН. 1992. Т. 324, № 3. С. 582–584.
3. Манжале́й В. И. Пределы низкоскоростной детонации газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 89–96.
4. Щелкин К. И. Влияние шероховатости трубы на возникновение и распространение детонации в газах // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. С. 823–827.
5. Teodorczyk A., Lee J. H. S., Knujstautas R. Photographic study of the structure of quasidetonation in rough tubes // Twelfth Intern. Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Ann Arbor, Michigan, July 1989. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 133: Dynamics on Detonations and Explosions: Detonations / A. L. Kuhl, J. R. Bowen, J. C. Leyer, A. Borisov (Eds)). AIAA, 1989. P. 223–240.
6. Васильев А. А., Валишев А. И., Васильев В. А., Панфилова Л. В. Характеристики горения и детонации гидразина и его метилпроизводных // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 81–96.
7. Основы горения углеводородных топлив / Под ред. Л. Н. Хитрина, В. А. Попова. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
8. Волков Е. А., Лапидус А. С. Техника безопасности при производстве ацетиленов из природного газа. М.: Химия, 1964.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. 6: Гидродинамика. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986.

Поступила в редакцию 17/V 2006 г.