

## ДЕТОНАЦИЯ ГАЗА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ГЛУБИНОЙ 50 МИКРОН

В. И. Манжалей

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Обнаружено, что передача взрыва по узкому каналу из одного объема газа в другой низкоскоростной детонацией происходит при начальном давлении в три раза меньшем, чем при передаче многофронтной детонацией.

Низкоскоростные режимы (низкоскоростная детонация и галопирующая волна) обнаруживаются в условиях, когда распространение классических волн горения и детонации оказывается невозможным. Их исследование ведет к пересмотру пределов по давлению при сгорании газов в каналах и поэтому важно при рассмотрении вопросов взрывобезопасности.

Низкоскоростная детонация в капиллярах, наблюдавшаяся ранее в смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  [1, 2] при начальных давлениях  $p_0$  ниже, чем в случае спиновой детонации, является комплексом, состоящим из ударной волны и пламени (рис. 1). Пламя движется со скоростью ударной волны за счет ухода газа из ядра течения в пограничный слой. В системе отсчета, связанной со стационарной ударной волной, поток газа за ней тормозится. Пламя стабилизируется в сечении трубы, где скорость газа на оси равна нормальной скорости пламени. В смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  измеренное расстояние от пламени до ударного скачка равнялось 3–8 диаметрам  $d$  канала [1, 2]. Пламя почти плоское в основном потоке, а в пограничном слое отстает. Скорость детонации составляла 0,45–0,6 скорости детонации Чепмена — Жуге без потерь. Нагрев газа в ударном скачке такой, что малый объем газа при движении между скачком и пламенем не успевает самовоспламениться; обратное означает быстрое формирование детонационной волны Чепмена — Жуге в ударно-сжатом газе и переход к галопирующей детонации.

В [1, 2] было обнаружено, что в смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  области существования обычной многофронтной и низкоскоростной детонаций в капилляре данного диаметра разделены интервалом начальных давлений, в котором невозможны оба стационарных режима. В этом диапазоне начальных давлений детона-

ционное сгорание осуществляется в галопирующем режиме, представляющем собой автоколебания между низкоскоростной детонацией и многофронтной [2, 3].

В опытах детонация возбуждалась искрой в смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  в трубке 1 длиной 10 см с внутренним диаметром 4 мм, а затем переходила в плоский канал длиной 110 мм с поперечным сечением  $0,05 \times 5$  мм, образуемый плоским оптическим стеклом и шлифованной стальной пластиной (см. рис. 1). Вдоль канала устанавливалась маска со щелями шириной 0,5 мм, прорезанными в ней через каждые 5 мм, либо маска с отверстиями диаметром 1 мм — через каждые 10 мм. Моменты прохождения детонации мимо щелей регистрировались фотоумножителем ФЭУ-18А на цифровом осциллографе С9-16. Плоский канал откачивался до давления менее 0,1 мм рт. ст., а остатки газа при заполнении вытеснялись в трубку 5 (см. рис. 1) диаметром 4 и длиной 20 мм. Оси трубок 1 и 5 были перпендикулярны плоскому каналу.

При съемке через маску с отверстиями осциллограмма состояла из ряда узких пиков. Некоторые пики свечения были выше почти

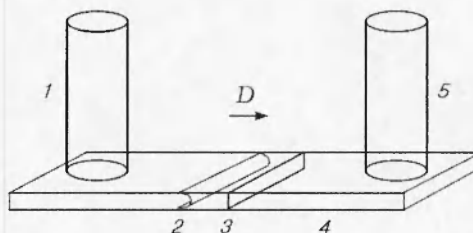


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — трубка, 2 — пламя, 3 — ударный скачок, 4 — плоский канал, 5 — дополнительный цилиндрический объем

на порядок. При съемке через щелевую маску ширина пиков возрастала примерно до половины расстояния между ними, что свидетельствовало о значительных перекосах волны либо о неоднородности свечения. Скорость в промежутках между отверстиями флуктуировала до  $\pm 15\%$  во всем интервале значений  $p_0$ . Эти факты дают основание полагать, что в низкоскоростной волне в канале присутствуют поперечные течения газа, приводящие к появлению сильно светящихся, а следовательно, и быстрее движущихся элементов волны, а также поперечных фронтов реакции.

Зависимость средней скорости детонации от начального давления приведена на рис. 2. Все экспериментальные точки, за исключением предельной, хорошо легли на прямую  $D = 700 + 833p_0$ . Скорость плавно увеличивалась от 930 до 1280 м/с при росте значений  $p_0$  от 0,36 до 0,82 атм, в то время как в капилляре с  $d = 0,6$  мм скорость низкоскоростной детонации менялась от 1050 до 1350 м/с в диапазоне  $p_0 = 0,05 \div 0,11$  атм, галопирующие волны наблюдались при  $p_0 = 0,11 \div 0,16$  атм [2], а спиновая и многофронтная детонации были зафиксированы при  $p_0 \geq 0,16$  атм. В плоском канале многофронтная детонация обнаруживалась при  $p_0 = 0,9$  атм ( $D = 2000$  м/с).

Как в капилляре, так и в плоском канале нижний предел низкоскоростных режимов приблизительно в три раза меньше нижнего предела высокоскоростной детонации — спина в капилляре и многофронтной детонации в плоском канале. Близким оказалось и произведение гидравлического диаметра на предельное начальное давление —  $3 \cdot 10^{-5}$  атм · м для капилляра и  $3,6 \cdot 10^{-5}$  атм · м для плоского канала. По-видимому, это является следствием независимости скорости горения ацетиленокислородной смеси от давления [4]. В тех смесях газов, где скорость пламени растет с повышением начального давления, следует ожидать расширения области низкоскоростных режимов в более узких каналах.

Скорость детонации при одном и том же значении  $dp_0$  оказалась в капилляре на 150  $\div$  200 м/с больше, чем в плоском канале, несмотря на то, что скорость детонации Чепмена — Жуге без потерь при росте начального давления в шесть раз увеличивается на  $\approx 100$  м/с. Чтобы разобраться в ситуации, предположим, что низкоскоростная детонационная волна движется с одинаковой скоростью и в капилляре диаметром  $d$ , и в плоском канале глубиной

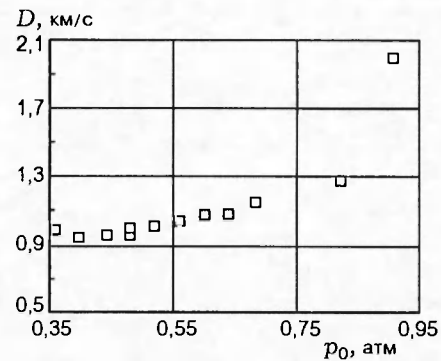


Рис. 2. Зависимость средней скорости детонации от начального давления смеси

$H = d/2$  при одном и том же значении  $p_0$ . В обоих случаях гидравлический диаметр ( $d_h$ ) одинаковый, поэтому будут одинаковыми толщины пограничных слоев ( $\delta_f$ ) в сечениях каналов, где находится пламя, расстояния от ударной волны до пламени ( $x_{sf}$ ), относительный расход газа через пограничный слой ( $Q_f$ ), а также параметры течения в ядре потока за пламенем. Как в плоском канале, так и в капилляре пламя должно не доходить до стенки на одно и то же расстояние, что обеспечивает идентичность течений и в пограничном слое. Остается предполагать потерю устойчивости пламени и разбегание его на ячейки вдоль ширины плоского канала; ситуация может быть аналогична пламени на щелевой горелке [5]. Это явление могло влиять на скорость пламени относительно газа перед ним и приводить к изменению средней скорости низкоскоростной детонации в плоском канале по сравнению с капилляром.

В таблице приведены экспериментальные и расчетные параметры низкоскоростной детонации в плоском канале с поперечным сечением  $0,05 \times 5$  мм и капилляре диаметром 0,6 мм при одном и том же значении  $d_h p_0$ . Отток газа в ламинарный пограничный слой рассчитывали по [6, 7], а затем находили скорость газа относительно ударной волны в зависимости от координаты и определяли положение пламени относительно ударной волны. Зависимость нормальной скорости ламинарного пламени  $v_n$  от температуры  $T$  за ударным скачком задавали формулой  $v_n = 12,2(T_1/T_0)^{3/2}$  м/с,  $T_0 = 298$  К [2], число Прандтля  $Pr$  полагали равным 0,7, а вязкость  $\eta$  смеси газов находили по данным [8].

Разделить на рис. 2 области низкоскоростной детонации и галопирующего режима по величине средней скорости на промежут-

$p_0$ , атм	$D$ , м/с	$x_{sf}/d_h$	$T$ , К	$Re_f$	$\delta_f/d_h$	$v_n$ , м/с	$Q_f$	$u$ , м/с	$\gamma_{eff}$
Капилляр									
0,06	1100	4,6	764	$9 \cdot 10^4$	0,12	51	0,70	229	1,30
Плоский канал									
0,36	900	6,8	612	$8 \cdot 10^4$	0,16	37	0,74	225	1,31

Примечания.  $x_{sf}$  — расчетное расстояние от ударного скачка до пламени,  $Re_f$  — число Рейнольдса,  $\delta_f$  — толщина пограничного слоя,  $v_n$  — нормальная скорость ламинарного пламени в ударно-сжатом газе,  $Q_f$  — относительный расход газа через пограничный слой,  $u$  — скорость газа за ударным скачком,  $\gamma_{eff}$  — эффективное отношение теплоемкостей. Величины с индексом  $f$  относятся к сечению капилляра, где находится пламя в основном потоке.

как между соседними отверстиями оказалось невозможным, так как расстояние между ними  $200H$ , что сравнимо с длиной пульсации галопирующей волны. Кроме того, при проведении опытов в капиллярах [2] было обнаружено совпадение средней скорости обоих режимов в месте их стыка на графике  $D(p_0)$ .

Последнее отверстие в маске располагалось напротив места стыка плоского канала с дополнительным объемом. Во всех опытах на осциллограммах можно было видеть поджигание газа в этом объеме, а затем резкую вспышку слоя несгоревшего газа, сжатого при движении пламени. Этот результат показывает, что взрыв может передаваться из одного объема в другой по узким зазорам низкоскоростными волнами детонации при низких значениях  $p_0$ , когда передача взрыва высокоскоростной детонацией невозможна.

Сформулируем основные результаты.

1. Получены данные по кинематике и границам области существования низкоскоростных режимов детонации ацетиленокислородной смеси в плоском канале глубиной 50 микрон. Обнаружено, что относительная ширина области существования низкоскоростных режимов приблизительно та же, что и в капиллярах диаметром 0,6 мм.

2. Обнаружено, что низкоскоростная детонация смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  всегда инициирует взрыв при выходе из плоского канала в объем (при угле выхода  $\pi/2$ ).

3. Получены косвенные данные, позволяющие предположить, что в канале с достаточно большим отношением поперечных размеров ( $\approx 100$ ) распространяется низкоскоростная детонация с сильными поперечными возмущениями на переднем фронте.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 97-01-01073).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Мянжалей В. И. Низкоскоростная детонация газа в капиллярах // Докл. АН РАН. 1992. Т. 324, № 3. С. 582–584.
- Мянжалей В. И. Режимы детонации газа в капиллярах // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 93–100.
- Mianzhalei V. I., Mitrofanov V. V., Aksamentov S. M. Investigation of galloping detonation // Proc. of Russian-Japanese Seminar on Combustion. Chernogolovka, 1993. P. 178–180.
- Основы горения углеводородных топлив // Под ред. Л. Н. Хитрина, В. А. Попова. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
- Нестационарное распространение пламени // Под ред. Д. Маркштейна. М.: Мир, 1968.
- Майрлс Г. Затухание в ударной трубе, обусловленное действием неустановившегося пограничного слоя // Ударные трубы / Под ред. Х. А. Рахматулина, С. С. Семенова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. С. 286–319.
- Mirels H. Test time in low-pressure shock tubes // Phys. Fluids. 1963. V. 6, N 9. P. 1201–1214.
- Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. / Под ред. И. С. Григорьевой, Е. З. Мейлиховой. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Поступила в редакцию 4/III 1998 г.