

А. В. ПИНАЕВ, В. В. МИТРОФАНОВ

**СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ В ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЕ
ТИПА ГАЗ — ПЛЕНКА**

(Представлено академиком М. А. Лаврентьевым 23 VI 1975)

При детонации некоторых гетерогенных систем, состоящих из газообразного окислителя и пленки жидкого горючего на стенках трубы, В. Ф. Комов, Я. К. Трошин и затем другие авторы (¹⁻³) регистрировали вторичные волны сжатия, возникающие в зоне химической реакции и догоняющие передний ударный фронт. Наиболее детальные эксперименты выполнены в квадратичных трубах, где наблюдался самоподдерживающийся периодический процесс поочередного отражения дугообразных вторичных волн, названных α -волнами (²), от противоположных стенок.

На основании представлений, развитых при исследованиях спиновой детонации в гомогенных газовых смесях (⁴), и результатов цитированных выше работ можно ожидать, что в круглой трубе достаточно большого диаметра возникает гетерогенная спиновая детонация (с.д.), при которой вторичная волна сжатия будет вращаться вдоль стенки трубы, примыкая к переднему фронту и поддерживаясь за счет ускоренного сгорания смеси за фронтом вторичной волны. Вращающуюся вторичную волну в зоне реакции, как и при с.д. газовых смесей, будем называть поперечной волной (п.в.). При малом диаметре трубы с.д. может не возникать, так как за время оборота п.в. не успеет накопиться новая смесь. Длина окружности трубы, по-видимому, должна быть такой, чтобы момент прихода п.в. после очередного оборота немного опережал самопроизвольное возникновение новой вторичной волны. Кроме того, спиновую детонацию более вероятно получить в том случае, когда скорость смесеобразования не слишком мала по сравнению со скоростью химических реакций при температуре смешения, так как процессы смесеобразования (срыв капель, испарение, перемешивание с окислителем) менее чувствительны к дополнительному воздействию п.в., чем химическая реакция.

С целью поиска спинового режима при гетерогенной детонации проведены опыты в трубах диаметром (d) 27 и 50 мм длиной около 3 м. Стенки трубы смазывались керосином. Заполнение кислородом осуществлялось при атмосферном давлении продувкой. Давление паров керосина в опытах было меньше 5 тор, т. е. по крайней мере в 10 раз меньше, чем требуется для стехиометрии, и значительно ниже концентрационных пределов для детонации в газовой фазе. Толщина пленки керосина изменялась от 3,5 до 10 мк (6 мк — соответствует стехиометрическому составу для трубы $d=50$ мм). При этом еще не наблюдалось стекания керосина вдоль стенки. Расположение труб — горизонтальное. Иницирование осуществлялось с помощью дополнительной секции, отделенной рвущейся диафрагмой и заполнявшейся стехиометрической смесью пропана с кислородом. Смесью поджигалась высоковольтной искрой. Фотографирование производилось фоторегистратором на движущуюся пленку через продольную щель шириной 2 мм и длиной 400 мм, расположенную вблизи закрытого конца трубы. Часть опытов выполнена с металлической заслонкой размером $1 \times 14 \times 500$ мм или с цилиндрическими вставками разного диаметра (d_1), установленными по оси трубы.

На рис. 1а, б приведены поперечные фоторазвертки детонации в трубе $d=50$ мм. Снимки (эти и последующие) ориентированы так, что направление оси трубы совпадает с вертикалью. Ясно видны периодические изменения структуры фронта при движении вдоль щели, а также длинные наклонные полосы повышенного свечения в глубине от фронта, напоминающие шлейфы при с.д. гомогенных газовых смесей. В опыте с заслонкой период процесса в 2 раза больше, чем в опыте заслонки, что свидетельствует о поочередном появлении светящейся зоны у передней и задней стенок

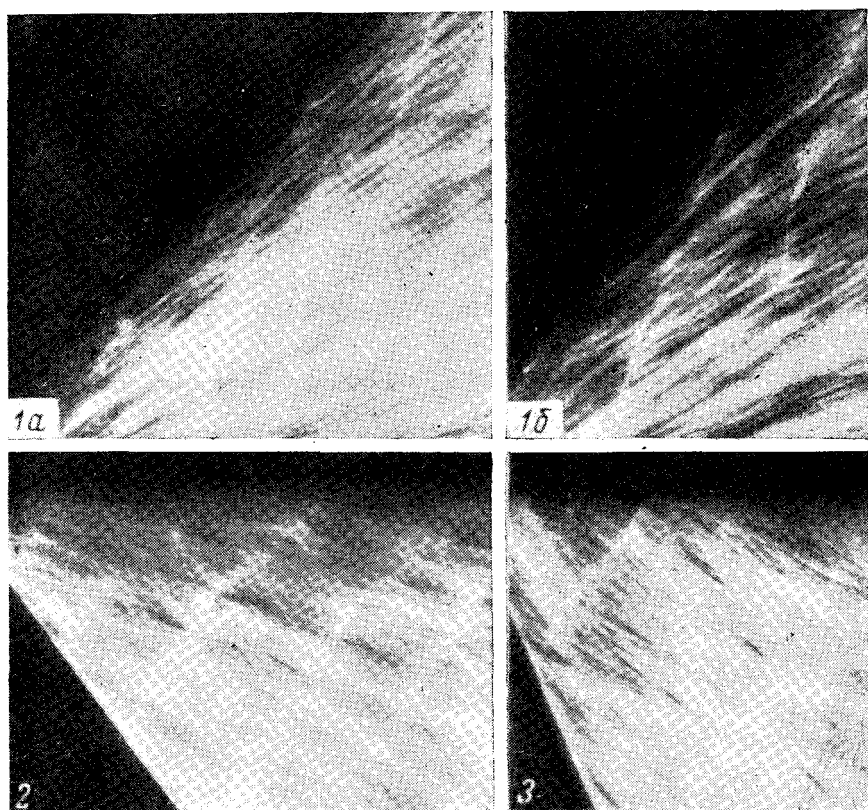


Рис. 1. Фоторазвертки свечения гетерогенной детонации в трубе $d=50$ мм. а — $d_1=0$, пленка движется под углом $\beta=90^\circ$ к оси трубы; б — $d_1=0$, с осевой заслонкой, $\beta=90^\circ$; 2 — $d_1=0$, $\beta=42^\circ$; 3 — $d_1=40$ мм, $\beta=29^\circ$

ки трубы против щели. Такой характер снимков стабильно повторялся во всех опытах без вставок, со вставкой $d_1=14$ мм и с осевой заслонкой. Для того чтобы убедиться в наличии вращающейся п.в., регистрация свечения дополнена следовым методом ⁽³⁾: в конец трубы вставлялась вплотную к стенкам закопченная фольга, не смазанная керосином. После прохождения детонации на фольге оставался спиральный след, свидетельствующий о наличии сильного вращающегося возмущения, включающего в себя излом ведущего ударного фронта. Таким образом, в данных условиях гетерогенная детонация является спиновой.

Дополнительным подтверждением спинового характера детонации явилась возможность получать заданное направление вращения п.в. с помощью обрезка направляющей спирали в начальном участке трубы, что использовалось при съемке структуры волны методом полной компенсации ⁽⁴⁾. Один из снимков, полученных этим методом в трубе $d=50$ мм приведен на рис. 1, 2. От аналогичных снимков с.д. в гомогенных газовых

смесях внешнее отличие здесь лишь в более размытой и менее стабильной структуре области пересечения п.в. с передним фронтом и в более длинном наклонном участке вращающейся волны. Однако следует учесть, что при гетерогенной детонации систем рассматриваемого типа нельзя провести, как в газах, четкого разделения между п.в., сжигающей смесь, и сопровождающей волной в продуктах реакции, так как из-за медленности процессов срыва горючего со стенки и перемешивания с окислителем горение смеси происходит по мере ее образования на большой длине вращающейся волны, составляющей несколько диаметров трубы. При этом с удалением от переднего фронта, наклон вращающейся волны постепенно уменьшается. Из сопоставления с газовой с.д. можно предполагать, что поверхность Чепмена — Жуге (Ч — Ж), ограничивающая область влияния на передний

Таблица 1

d , мм	d_1 , мм	D , м/сек	h , см	h/d	c^*/D
27	0	1900 ± 100	—	—	—
27	14	1600 ± 100	12,8	4,75	0,50
50	0	1600 ± 120	17,5	3,5	0,52
50	14	1600 ± 50	20	4	0,52
50	30	1650 ± 50	24,5	4,9	0,51
50	40	1620 ± 40	27,5	5,5	0,52

фронт, находится приблизительно там, где наклонная волна, имеющая резкий фронт, трансформируется в более размытую акустическую волну (шлейф), направленную под малым углом к образующей трубе. На основании такого предположения и снимков, подобных рис. 1, 2, можно заключить, что поверхность Ч — Ж располагается на расстоянии 3—5 d от переднего ударного фронта и, следовательно, здесь заканчивается стадия химической реакции, поддерживающая фронт.

В опытах со вставками $d_1=30$ мм и $d_1=40$ мм, не смазанными керосином, наблюдалось большое число нерегулярных возмущений зоны реакции разного масштаба (рис. 1, 3). Среди них, как правило, можно было выделить одно более сильное возмущение, вероятно, связанное с вращающейся п.в., так как сохраняется приблизительно постоянным шаг между точками его появления против щели. Значения шага h , отношения h/d и скорости детонации D приведены в табл. 1. Разброс измерявшихся величин в указанных пределах имел место как между разными опытами, так и между разными периодами волны в одном опыте. Отклонения от средней величины скорости детонации D , указанные в табл. 1, находятся в зависимости от толщины пленки керосина на стенке. Если керосин наносился также на поверхность вставки, никаких неоднородностей зоны свечения на фоторазвертках не обнаруживалось.

В трубе $d=27$ мм спиновый режим возникал лишь при наличии вставки $d_1=14$ мм и сравнительно редко. В остальных случаях детонация распространялась без видимых вторичных волн. Характерно, что п.в. фиксировались только при скорости $D \approx 1600$ м/сек и исчезали во всех случаях при скорости $D \approx 1900$ м/сек (см. табл.). Этот факт говорит в пользу высказанного вначале соображения о том, что для существования п.в. при гетерогенной детонации процесс экзотермического превращения не должен протекать в чисто «диффузионной» области (здесь имеется в виду турбулентная диффузия) и сравнимую роль должен играть химико-кинетический фактор, сильнее зависящий от температуры. Подтвердилась также существенная роль масштабного фактора: в трубе большего диаметра с.д. показывает стабильнее и область существования п.в. шире.

В таблице также приведена вычисленная с помощью акустической теории ⁽⁴⁾ по значениям h/d эффективная относительная скорость звука

c^*/D в окрестности поверхности Ч — Ж, которая дает равную наблюдаемой частоту вращения при однородном состоянии газа по сечению трубы. Видим, что при гетерогенной детонации эта величина оказывается заметно меньше значения 0,55, характерного для газовых смесей.

По мнению авторов, природа п.в. при с.д. гетерогенных систем в круглой трубе и « α -волн» ⁽²⁾ в квадратной трубе близка и соотношение между ними такое же, как в однородных газовых смесях между п.в. при с.д. в круглой трубе и п.в. при околопредельной детонации в прямоугольной трубе ⁽⁶⁾.

Предварительный анализ показывает, что сопряжение п.в. с передним ударным фронтом может осуществляться посредством одной либо двух тройных точек в зависимости от углов их наклона в области сопряжения, которые в проведенных опытах не могли быть достаточно точно определены. В случае сопряжения с двумя тройными точками конфигурация скачков близка к исследованной при с.д. газовых смесей ⁽⁴⁾ с той разницей, что все скачки в области тройных точек нужно считать ударными, а сам поперечный фронт очень сильно вытянут в направлении продуктов детонации и может содержать изломы в точках пересечения с контактным разрывом, оставшимся в газе после прохождения п.в. на предыдущем витке.

Институт гидродинамики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
13 VI 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. Ф. Комов, Я. К. Трошин, ДАН, т. 162, № 1 (1965). ² С. А. Лесняк, М. А. Казаров и др., ДАН, т. 182, № 5 (1968). ³ K. W. Ragland, J. A. Nicholls, AIAA J., v. 7, № 5 (1969). ⁴ Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиан, Структура фронта детонации в газах, Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963. ⁵ Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин, ДАН, т. 125, № 1 (1959). ⁶ R. A. Strehlow, C. D. Engel, AIAA J., № 3 (1969).