

О СТРУКТУРЕ ТЕЧЕНИЯ В СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЕ

Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн

(Новосибирск)

В работах [1-4] на основе экспериментального материала, полученного фоторегистрацией спина методом полной компенсации, предложена схема течения в области излома фронта, отличающаяся тем, что сжигание основной массы газа происходит позади ударного фронта в поперечной детонационной волне. Авторы работ [5-7] настаивают на структуре течения, при которой наиболее ярко светящаяся область представляет собой «излом» переднего фронта детонационной волны. В ряде работ [8-10] приводятся попытки объяснить явление детонационного спина с точки зрения акустических явлений за фронтом спиновой детонации, не рассматривая подробно картины течения в области излома переднего фронта. Ранее указывалось, что при используемых обычно газовых смесях должна осуществляться картина течения, в которой излом переднего фронта является отошедшим скачком [1-4]. В этих же работах есть первые экспериментальные данные, подтверждающие гипотезу о существовании ударного фронта перед зоной наиболее яркого свечения, которой является поперечная детонационная волна.

На фотографиях самосвечения спина этот ударный фронт не виден из-за слабой светимости, поэтому были поставлены опыты по обнаружению переднего фронта на установке Теплера.

Для съемки на детонационной трубке выделялась узкая продольная щель. Ось трубки устанавливалась под углом $\arctg 0.5$ к оси прибора, так, чтобы не было наложения контуров переднего фронта на ближней к фоторегистру стенке на явления, происходящие на задней стенке трубки. Съемка производилась методом полной компенсации, в этом случае снимки дают мгновенную фотографию фронта на стенке трубки. Одна из теплерограмм, полученных в этих опытах, приведена на фиг. 1,а.

Фиг.1. Фотографии спиновых поперечных волн, полученные методом полной компенсации: а — теплерограмма, детонационная трубка образует с оптической осью угол $\alpha = 64^\circ$; б — снимок самосвечения в той же постановке, направление вращения спина противоположное; в — снимок самосвечения (негатив) с осевой заслонкой внутри трубки, $\alpha = 90^\circ$

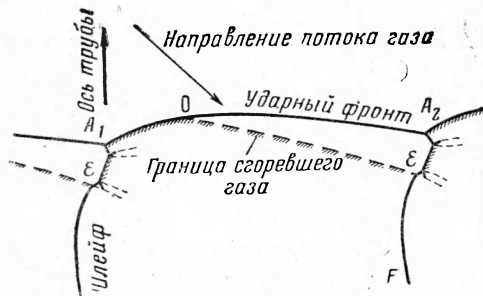


При сравнении снимков, полученных методом Теплера, и снимков самосвечения (фиг. 1, б, в) можно видеть, что перед зоной максимального свечения обнаруживается ударная волна, в которой происходит предварительное сжатие газа.

В результате сравнения снимков самосвечения и теплорограмм получена картина расположения фронтов, изображенная на фиг. 2.

Направления натекающего потока газа и оси трубки показаны стрелками.

Из фотографий, приведенных на фиг. 1, можно видеть, что зона свечения совпадает с ударной волной между точками A_1O . Начиная от точки O , фронт свечения все более отстает от ударного. Далее между ударным фронтом и фронтом свечения распространяется поперечная детонационная волна A_1E .



Фиг. 2. Схема расположения фронтов на стенке трубы (развертка цилиндра)

Таким образом, можно считать, что линия фронта A_1O будет детонационной волной между точками A_1 и O ; далее, так как угол между направлением потока и нормалью к фронту увеличивается, то это будет все более ослабевающая ударная волна. Волна A_1O является пересжатой и лишь в самой точке O нормальная скорость газа удовлетворяет условию Чепмена — Жуге. Интересно отметить, что именно в этой точке начинается

отделение фронта горения. Как показывают расчеты, температура газа за ударной волной вблизи точки O равна 1530°K . Это означает, что задержка воспламенения в этих условиях составляет несколько микросекунд, что согласуется с данными работы [11].

Наличие фронта предварительного поджатия OA_2 было обнаружено и при помощи пьезодатчиков давления. Следовательно, можно считать установленным, что зона наиболее яркого свечения располагается позади переднего фронта, свечение в изломе переднего фронта значительно слабее.

На основе полученных экспериментальных результатов была построена схема течения в окрестности поперечной волны.

В работах [1-4] показано, что построить согласующуюся с экспериментом схему течения с одной тройной точкой не удастся. На теплорограммах процесса в области переднего фронта обнаруживаются две тройные точки. Поэтому была принята схема течения, изображенная на фиг. 3, где AA' — фронт ударной волны, AA'' — косая пересжатая детонационная волна, A и B — две тройные точки, BB' — фронт поперечной детонационной волны, AB'' и $B'CD$ — контактные разрывы, BB'' — ударная волна.

Расчет производился для смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$ при начальном давлении 0.5 атм по таблицам термодинамических величин [12]. Скорость детонации принималась равной 1700 м/сек . Угол между потоком и фронтом AA' был определен из эксперимента равным 34° . Все фронты принимались прямолинейными. Как показал предварительный расчет, температура, развивающаяся за скачками AA'' и BB' , превышает 2600°K , поэтому в дальнейшем считалось, что в этих скачках химическая реакция проходит мгновенно до равновесия.

Температура за скачком BB'' около 2000°K , тем не менее этот фронт считался как ударный, без химической реакции, так как в противном случае угол фронта BB' сильно отличается от измеренного в эксперименте.

При расчете установлено, что положение скачка BB'' определяется неоднозначно, т. е. при заданных начальных условиях возможны два разных варианта течений, однако здесь можно сделать однозначный выбор.

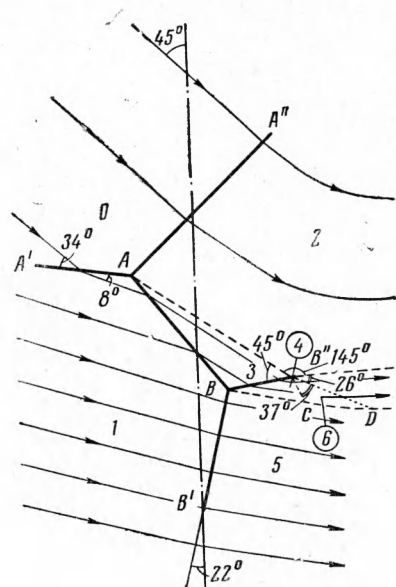
Один из вариантов изображен на фиг. 3. В другом варианте фронт BB'' оказывается наклоненным вперед по потоку. Расчет показал, что

в этом случае поток за скачком BB'' остается сверхзвуковым, следовательно, возмущения могут распространяться лишь вдоль фронта от точки B'' к точке B ; в то же время нет причин, которые могли бы породить такие возмущения в точке B'' . В этом варианте наклон фронта BB' сильно отличается от экспериментального. Течение в области 4 является сверхзвуковым, поэтому согласование давлений между зонами 4 и 2 происходит в центрированной волне разрежения, занимающей область $CB''D$.

Течение в областях 2 и 5 дозвуковое. В связи с этим необходимо отметить следующее. Задача о согласовании течения на контактном разрыве AB'' между зонами сверхзвукового и дозвукового потока очень сложна, однако, предполагая, что давление вдоль контактного разрыва AB'' изменяется мало, скачок можно считать прямым.

Вторая трудность согласования потока состоит в том, что, как видно из схемы течения, основная масса газа за принятой конфигурацией фронтов имеет скорость значительно ниже звуковой. Этот газ в дальнейшем проходит через ударную волну EF (фиг. 2), которой вблизи фронта является шлейф спиновой детонации. В плоской схеме поток в области 5 дозвуковой, расходящийся, скорость его падает, а давление растет. Рассмотрение же осциллограмм давления показало, что за фронтом BB' оно резко падает. Следовательно, в дозвуковом потоке скорость должна расти. Это противоречие объясняется при рассмотрении снимков соударения спина с плоской стенкой, приведенных в работе [13], из которых можно видеть, что при прохождении спиновой волны поток прижимается к стенке трубы. Таким образом, дозвуковой поток в области за скачками BB' и AA' фактически сходящийся, скорость его растет, а давление падает.

Результаты расчета состояния газа (фиг. 3) для смеси $2CO + O_2$ при начальных условиях $p_0 = 0.5$ атм, $T_0 = 290^\circ$ К, $D = 1700$ м/сек представлены в таблице. Для сравнения приведены величины давления и температуры для скачков AA'' и BB' , рассчитанных без учета химической реакции (ударные).



Фиг. 3. Теоретически рассчитанная картина течения в окрестности поперечной детонационной волны

Таблица

Скачок	Давление, $\frac{p}{p_0}$	Температура, °К	Сжатие на скачке, η	Скорость потока u , м/сек	Число Маха за скачком, M	Угол потока с фронтом, ϕ	Поворот течения, θ
AA'	18.7	1090	4.96	2010	3.08	34°	22°
AA'' (D) ¹	56.2	3850	4.74	509	0.47	87.3°	10°
AA'' (S)	60.8	2670	—	—	—	—	—
AB	56.2	1460	2.23	1770	2.33	32°	16.3°
BB'	178	1980	2.35	1320	2.01	45°	22°
BB' (D)	178	4100	2.85	697	0.63	87°	5.7°
BB' (S)	210	2630	—	—	—	—	—

¹ Здесь (D) — детонационная волна, (S) — ударная волна.

Полученные в результате расчета углы фронтов AA'' и BB' с осью детонационной трубки с точностью до 2° совпадают с измеренными в экспериментах.

Аналогичной системой скачков можно согласовать течение за поперечной волной и прилегающей частью шлейфа, как изображено на фиг. 2. Численный расчет этого течения не проводился, так как состояние газа за фронтом горения OE неизвестно.

Таким образом установлено, что структура течения при спиновой детонации, предложенная в работах [1-4], подтверждается. Полученные расчеты хорошо совпадают со всем известным до сих пор экспериментальным материалом. Схема течения вблизи стенки представлена на фиг. 3.

Результаты эксперимента опровергают схемы течения при спине, предложенные в работах [5-7].

Авторы благодарят Л. В. Овсянникова и Р. И. Солоухина за ряд советов и обсуждение работы.

Поступила 26 I 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. О спиновой детонации. ДАН СССР, 1957, т. 114, № 4, стр. 717.
2. Войцеховский Б. В. Исследования структуры фронта спиновой детонации. Тр. МФТИ, т. I, Оборонгиз, 1958.
3. Войцеховский Б. В., Котов Б. Е. Оптические исследования фронта спиновой детонационной волны. Изв. СО АН СССР, 1958, № 4, стр. 74.
4. Войцеховский Б. В., Котов Б. Е., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Оптические исследования поперечных детонационных волн. Изв. СО АН СССР, 1958, № 9, стр. 44.
5. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Пульсирующая и спиновая детонация газовых смесей в трубах. ДАН СССР, 1959, т. 125, стр. 110.
6. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Механизм детонационного сгорания. ПМТФ, 1960, № 1, стр. 22.
7. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Структура газовой детонации в трубах. ЖТФ, 1960, т. XXX, вып. 4, стр. 450.
8. Фау J. A. A mechanical theory of spining detonation. J. Chemical Physics, 1952, vol. 20, № 6.
9. Manson N. Propagation des detonations et des deflagrations dans les mélanges gazeux. L'Office National d'Etudes et des Recherches Aéronautiques, Paris, 1947.
10. Солоухин Р. И., Топчиян М. Е. Исследование шлейфа спиновой детонации. ДАН СССР, 1959, т. 127, стр. 772.
11. Солоухин Р. И. Применение ударных волн для изучения воспламенения газа. ПМТФ, 1960, № 2, стр. 90.
12. Синярев Г. Б., Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. Оборонгиз, 1955.
13. R. E. Duff. Investigation of Spining Detonation and Detonation Stability. The Physics of Fluids, 1961, № 11, p. 1427.