

скорее для исследования движения электронов в задаваемых полях, чем для исследования самих полей. Однако даже и в этих случаях использование пучков может дать определенную информацию о структуре полей. В качестве последней иллюстрации на фиг. 7 приведено отражение пучка 8 кэв электронов от магнитного экрана.

В заключение необходимо отметить, что для исследования полей приведенными выше методами необходимо использование достаточно интенсивных моноэнергетических пучков электронов. Для ввода таких пучков из вакуума в газ, как правило, нельзя использовать фольговые окна из-за ограничения плотности тока и сильного нарушения моноэнергетичности, особенно при малых ускоряющих напряжениях. Для этой цели наиболее пригодны различного рода газодинамические окна. В данной работе использовалась электронная пушка конструкции ВЭИ с дифференциальным газодинамическим окном С. Т. Синицына.

Поступила 3 V 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Blaup F., Schedling J. A. Improvements in visual depiction of Magnetic lines of force by means of a gas discharge, J. Appl. Phys., 1951, 22, 1, 11—13.
2. Арденне М. Применение газоразрядной трубки с точечным катодом для визуального определения формы силовых линий сильного магнитного поля. ЖЭТФ, 1953, т. 25, № 6, стр. 749—750.
3. Grün A. E. Lumineszenz-photometrische Messungen der Energieabsorption im Strahlungsfeld von Elektronenquellen Eindimensionaler Fall in Luft, Zeitschrift für Naturforschung, 1957, 12a, 2, 89—95.
4. Davoine F. Etude d'une sonde électronique fine Applications, J. Phys. et Radium, 1954, 15, 12, 90—91.
5. Schmidt K. Abklingung und Mechanismus der Lumineszenz, von Gasen bei Anregung durch schnelle Elektronen, Zeitschrift für Naturforschung, 1956, 11a, 12, 1023—1030.
6. Warren R. W. Measurement of electric fields as applied to glow discharges, Rev. Scient. Instrum., 1955, 26, 8, 765—770.
7. Солнцев Г. С., Порохин А. Г., Чистякова Н. М. Измерение электрических полей в высокочастотном разряде низкого давления при помощи электронного пучка. Изв. АН СССР, серия физ., 1959, т. 23, № 8, стр. 1026—1030.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ДАТЧИКАМИ ДАВЛЕНИЙ

М. Е. Топчиян (Новосибирск)

Явление спиновой детонации исследовалось до последнего времени в основном оптическими методами [1—5]. Постановка эксперимента в этих работах дает возможность исследовать структуру скачков. В работах [6—9] для исследования спина применялся метод следовых отпечатков на закопченных стенках детонационной трубки. Для выяснения формы переднего фронта был применен метод соударения спиновой детонационной волны со встречным ударным фронтом. Эти опыты подтвердили существование излома переднего фронта, обнаруженное ранее в работах [1,2] и предполагавшееся в работах [10,11].

В настоящее время существуют две основные гипотезы о системе скачков в области наиболее яркого свечения. Первая, выдвинутая в работах [10,11], основана на предположении, что область наиболее интенсивного свечения находится в изломе переднего фронта; вторая, предложенная в работах [1,2,3,12], предполагает, что эта область находится позади переднего фронта и является самостоятельной детонационной волной, распространяющейся по газу, предварительно подогретому сжатием в передней волне.

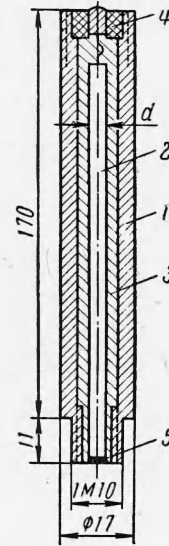
Расчеты, произведенные авторами этих двух гипотез, показывают существенную разницу в величинах максимальных давлений, которые могут развиваться при спине. Для первой гипотезы эта величина ни при каких условиях не может превышать 60 атм при начальном давлении смеси 1 атм, по второй теории давления могут достигать величины порядка 170—180 атм.

Исследования, проведенные в работах [1—5], уже показали правильность второй гипотезы, так как полученная в эксперименте структура скачков хорошо совпадает с предсказанной теорией. Однако представляют интерес непосредственное измерение величин давлений, развивающихся при спине, так как эти эксперименты могут дать дополнительные сведения в пользу одной из двух гипотез. Кроме того, такие измерения могли бы дать сведения о характере изменения давлений и в области за скачками, где обнаруживается шлейф. Возможности таких измерений открываются в связи с созданием малоинерционных высокочувствительных датчиков давления из пьезокерамики титаната бария. Основные исследования работы таких датчиков и разработка их устройства были проведены в работе [13].

В то же время для использования этих датчиков при изучении спина существуют определенные трудности, связанные с необходимостью иметь малые размеры воспринимающей поверхности.

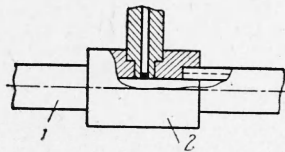
В данной работе описываются результаты исследования спиновой детонации при помощи пьезодатчиков давления.

Устройство датчика давлений в основном совпадает со схемой, приведенной в работе [13]. Датчик представляет собой пластинку из титаната бария диаметром 1 мм и толщиной 0.5 мм, припаянную сплавом Вуда к длинному цинковому стержню такого же диаметра. Стержень с датчиком помещался на оси защитной латунной трубки, внутренним диаметром 6 мм. Оставшееся пространство заливалось пчелиным воском (фиг. 1). Измерения производились в проходящей волне. Датчик устанавливался в детонационную трубку так, чтобы его поверхность не образовывала выступов с внутренней поверхностью трубки. Особое внимание было обращено на борьбу с акустическими наводками, возникающими в детонационной трубке при прохождении детонации. Так как скорость звука в металле значительно превышает скорость детонации в газе, то возмущения, вызываемые взрывом, распространяясь по трубке, приходят раньше детонационной волны и искажают запись последней. Для подавления таких наводок детонационная трубка была разделена на 2—3 секции, соединенные резиновыми шлангами, а сам датчик устанавливался в патрубок из плексигласа, являвшийся частью детонационной трубки (фиг. 2). Как показали измерения, акустические наводки в такой системе совершенно незаметны на фоне регистрируемого сигнала.

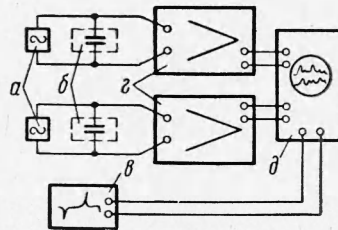


Фиг. 1. Устройство датчика давлений (d° от 1 до 2.5 мм): 1 — корпус (латунь), 2 — цинковый стержень, 3 — воск, 4 — втулка из плексигласа, 5 — пластинка титаната бария

Собственная емкость датчика составляла величину порядка 100 пф, входное сопротивление усилителя около 10 мгом. Для того чтобы обеспечить отсутствие завала горизонтальной части сигнала, необходимо было обеспечить большую постоянную времени цепи датчик — входное сопротивление усилителя. Для этого параллельно датчику подключалась дополнительная емкость до 10 000 пф. В этих условиях сигнал длительностью до 10^{-2} сек записывается заведомо без частотных искажений. Возникающее при подключении дополнительной емкости понижение уровня сигнала легко компенсировалось увеличением усиления.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Размещение датчика в детонационной трубке: 1 — металлическая трубка; 2 — втулка из плексигласа

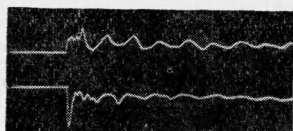
Фиг. 3. Схема эксперимента: а — датчики, б — дополнительные емкости, в — схема задержки пуска, г — усилители, д — осциллограф

При проведении опытов с двумя параллельно соединенными датчиками было установлено, что подключение второго датчика, не участвующего в записи явления, приводит к заметному подавлению колебаний пишущего датчика на собственной частоте. При большой величине дополнительной емкости такое подключение практически не влияет на величину полезного сигнала. Такое устройство, по-видимому, работает как режекторный контур, отсасывающий колебания собственной частоты, определяемой толщиной пластинки и скоростью звука в ней.

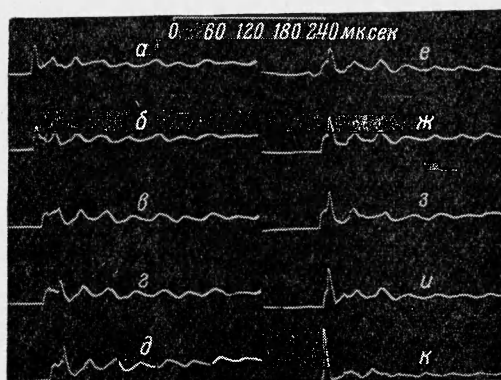
Устройство датчика, размещение его в детонационной трубке и схема эксперимента представлены на фиг. 1—3.

Для измерения всего поля давлений при спине необходимо было обеспечить запись давлений при прохождении датчика разными участками фронта.

Для этого в начальный отрезок трубы устанавливался кусок спирали, навитой из проволоки толщиной около полутора миллиметров с шагом, равным трем внутренним диаметрам детонационной трубки. Этим обеспечивалось заданное направление вращения спина, а благодаря постоянству шага спиновой детонации, и некоторая определенная область фронта, запись которой производилась. Меняя угол поворота отрезка трубы со спиралью относительно датчиков, можно было изменять и положение фронта спиновой детонации в момент прохождения датчика. Съемка профиля давлений производилась сразу двумя датчиками, размещенными на противоположных сторонах трубки в одном поперечном сечении, по двухканальной схеме. Фронт проходил датчики двумя диаметрально противоположными точками. На фиг. 4 показан пример записи давления двумя такими датчиками.



Фиг. 4



Фиг. 5

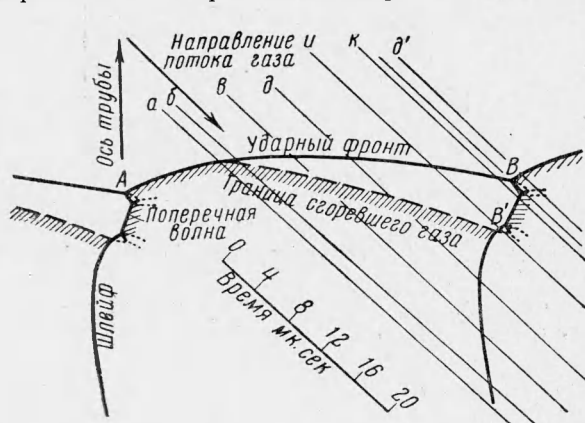
Фиг. 4. Осциллограммы давления при спиновой детонации, снятые двумя датчиками расположенными на противоположных сторонах трубки

Фиг. 5. Осциллограммы спина при разных углах поворота фронта относительно датчиков. Величины максимальных давлений в атм при начальном давлении 260 мм рт. ст.:

$a - 14.69, b - 10.81, в - 10.47, г - 13.93, д - 15.82, и - 17.67, к - 50.33$

Последовательная съемка спина при разных углах поворота первой секции детонационной трубки дала ряд осциллограмм, часть из которых приведена на фиг. 5. Внимательное рассмотрение осциллограмм обнаруживает постепенный переход от одного вида к другому.

Предварительные исследования показали, что вид осциллограмм соответствует картине течения, предложенной в работах [1-5], поэтому была произведена привязка



Фиг. 6. Схема скачков при спиновой детонации, приведенная в работе [5], с траекториями датчиков, соответствующими осциллограммам на фиг. 5

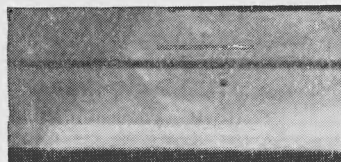
профиля давлений к схеме течения, приведенной в этих работах. Нанесение траектории датчика производилось совмещением в одном масштабе времени каких-либо двух характерных точек осциллограммы с двумя такими точками на картине течения. Например, для осциллограммы на фиг. 5, k такими точками являлись передний фронт и поперечная волна. Осциллограммы второго датчика размещались сдвинутыми на половину периода. Результаты этого сопоставления показали хорошее совпадение картины расположения фронтов с максимумами осциллограмм. На фиг. 6 приведена схема расположения фронтов с линиями траекторий датчиков, соответствующими приведенным на фиг. 5 осциллограммам.

Для проверки правильности полученного сопоставления были проведены эксперименты записи давления с одновременной фоторегистратцией самосвечения методом полной компенсации (см. работы [1-5]). На фоторегистрограмме в этом случае остается след траектории датчика на картину самосвечения (фиг. 7). Эти опыты показали пра-

вильность приведенного выше сопоставления осциллограмм с картиной расположения фронтов. Фоторегистрация показала также, что размер датчика достаточно мал, чтобы разрешить структуру скачков. На приведенном фотоснимке ширина темной линии соответствует диаметру внешней оболочки датчика, который в 6—7 раз превышает диаметр пластинки титаната бария.

Все эксперименты проводились со смесью $2\text{CO} + \text{O}$, иногда с добавлением до 1.5% водорода. Начальные давления выбирались так, чтобы при данном диаметре детонационной трубки был устойчивый одноголовый спин. Инициирование производилось навеской гексогена или азида свинца, подрываемой высоковольтной искрой. Диаметр детонационной трубки в разных сериях опытов имел величину 16, 23, 26 и 49 мм.

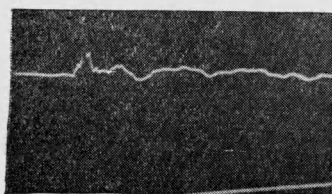
Фиг. 7. Снимок самосвечения спина. Темная линия — траектория датчика. Толщина линии в 6—7 раз больше размера воспринимающей пластинки датчика



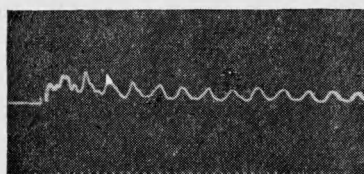
Для получения наилучшего разрешения структуры скачков необходимо было выбрать возможно больший диаметр трубки, однако в наших условиях не удавалось получить достаточно устойчивый одноголовый спин при диаметре трубы 49 мм. Основные результаты были получены на трубках диаметром 23 и 26 мм.

Рассмотрим подробнее фотографии, представленные на фиг. 5, вместе со схемой скачков фиг. 6. Линии *a*, *b*... и т. д. указывают траектории датчиков на картину скачков, соответствующие осциллограммам на фиг. 5. Штрихом обозначены траектории второго датчика, полученные переносом на половину периода. При переходе от осциллограммы «*a*» к осциллограмме «*k*» видно следующее.

Пик давления, соответствующий переднему ударному фронту *AB* фиг. 6, постоянно уменьшается по величине. Следующий за этим пиком второй подъем давления, наоборот, растет, одновременно передвигаясь вперед по осциллограмме. На схеме скачков это соответствует перемещению траектории датчика по фронту от точки *A* к точке *B*. При таком перемещении понижается давление на переднем скачке и, с приближением к поперечной волне, растет давление в шлейфе, которое и фиксируется датчиком в виде второго подъема. Осциллограмма *k* фиксирует прохождение датчика поперечной волной. Можно видеть, что на этой осциллограмме перед мощным броском, соответствующим поперечной волне, фиксируется примерно в 10 раз меньший подъем давления, являющийся фронтом предварительного сжатия. Аналогичный снимок осциллограммы при большей скорости развертки представлен на фиг. 8.



Фиг. 8. Осциллограмма давления при спине. Датчик проходит через поперечную волну



Фиг. 9. Осциллограмма давления в шлейфе. Длительность развертки 400 мксек. Метки времени через 10 мксек

В работе [5] приведены результаты теоретического расчета картины течения при спине, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными, полученными оптическими методами. Измерение давлений при помощи пьезодатчиков позволило установить относительные величины давлений в разных областях течения и оценить их абсолютные значения.

В табл. 1 приведены результаты сравнения теоретически рассчитанных отношений давлений и измеренных датчиком для разных областей течения. Здесь же приводятся для сравнения результаты расчетов, приведенные в работах [6-8].

Тарировка датчиков производилась по среднему уровню давления в продуктах детонации в областях за скачками. Так как вся детонационная волна в целом движется подчиняясь условию Чепмена — Жуге, принималось, что средний уровень давления за областью скачков равен давлению за фронтом «нормальной» детонации. Это давление было рассчитано с точностью до 3% и составляло величину в 17 раз больше начального давления смеси.

Таблица 1

Сравнение относительных значений давлений в скачках (фиг. 6): p_{AB} — давление на переднем фронте, $p_{BB'}$ — давление в поперечной волне, p — среднее давление в области за скачками. (В расчете P принято как давление в точке Чемпена — Жуге)

Траектория датчика	Скачок	Отношение давлений		
		эксперимент	рассчитанное по [1-5]	рассчитанное по [6-8]
a	$\frac{P_{AB}}{P}$	2.96	2.41	—
e	$\frac{P_{AB}}{P}$	2.11	1.86	—
д'	$\frac{P_{AB}}{P}$	3.45	3.30	2.10
и	$\frac{P_{AB}}{P}$	1.66	1.29	—
к	$\frac{P_{AB}}{P}$	1.07	1.09	1.18
к	$\frac{P_{BB'}}{P}$	10.14	10.47	1.95
к	$\frac{P_{BB'}}{P_{AB}}$	9.46	9.56	1.65

Таблица 2

Абсолютные величины давлений в разных областях течения за скачками. Давление начальной смеси p_0 принято равным единице

Траектория датчика	Скачок	Эксперимент	Рассчитанное по [1-5]	Рассчитанное по [6-8]
д'	AB	58.8	56.2	35.8
д	AB	27.2	27.5	—
к	AB	18.21	18.7	20.2
к	BB'	172	178	33.3

Таблица 3

Сравнение экспериментально наблюдаемых частот шлейфа с рассчитанными по акустической теории (D — диаметр трубки в мм, d — диаметр вставки в мм, ν_1 — вычисленная частота в кгц, ν_2 — экспериментальная частота в кгц)

	Из регистрограмм				Из осциллограмм		
	14.5	14.5	22.0	22.0	16.0	23.0	23.0
D	14.5	14.5	22.0	22.0	16.0	23.0	23.0
d	0	6.0	0	13.0	0	0	4
ν_1	38.3	29.3	25.0	17.0	30.7	23.9	20.7
ν_2	38.2	29.6	25.6	17.1	30.1	23.9	21.5

Такой подход дал возможность установить с точностью примерно до 15% величины давлений в разных областях течения. Результаты измерения величины давлений приведены в табл. 2. В этой же таблице для сравнения приведены величины давлений для аналогичных областей, рассчитанные авторами работ [6-8].

Как видно из сравнения, результаты эксперимента хорошо совпадают с выводами работ [1-5] и не могут быть объяснены схемой течения, приведенной в работах [6-8].

Известен акустический подход к объяснению явлений, происходящих при спине [14-16]. Расчеты этой теории дают величины частот спина, хорошо совпадающие с экспериментом [9, 16]. Исследование спина пьезодатчиками давления дало возможность еще раз проверить результаты этих работ. Как показали измерения частот шлейфа по осциллограммам, эксперимент дает хорошее совпадение с акустической теорией. В табл. 3 приведены результаты сравнения теоретически рассчитанных и экспериментальных величин частот спина, приведенные в работе [16], дополненные измерениями по осциллограммам давления. В пользу акустического характера явлений позади области скачков говорит и то, что давление в шлейфе изменяется непрерывно. В обычных условиях при наблюдаемых величинах давлений и скорости шлейфа должен развиваться скачок. Как показывают осциллограммы, этого не происходит (фиг. 9). Таким образом, подтверждается гипотеза, что шлейф является пучностью акустических колебаний [14-16]. Однако необходимо отметить, что нельзя объяснить все аспекты спиновой детонации акустической теорией, так как при спине имеются области, которые заведомо не могут подчиняться акустическим законам — области скачков. Тем более акустический подход не может дать ответа на вопрос о структуре скачков в области, примыкающей к переднему фронту, где шлейф-пучность теряет непрерывный характер изменения давления и становится скачком.

На наш взгляд, механизм спина состоит в тесном взаимодействии системы скачков в области переднего фронта с собственными тангенциальными акустическими колебаниями, возникающими за фронтом в области сгоревшего газа. Возможность такого взаимодействия заключена в том,

что большая часть газа за системой скачков сжигается в пересжатых детонационных волнах, поэтому скорость потока относительно фронта в областях, прилежащих к этим скачкам, дозвуковая. Следовательно, возмущения, идущие из области сгоревшего газа, могут проникать в зону химической реакции. Иначе говоря, неоднородность течения при спине приводит к тому, что, несмотря на то, что детонационная волна движется в целом, подчиняясь условию Чепмена — Жуге, существуют области течения, в которых скорость газа относительно фронта меньше местной скорости звука. Это показано в работе [3] и подтверждается проведенными здесь измерениями давления.

Таким образом, явление спиновой детонации обусловливается следующими причинами: задержка воспламенения после прохождения первичного ударного фронта приводит к образованию области нагретого газа между поверхностью ударной волны и зоной горения [17]. При возникновении в силу случайных причин воспламенения в этой области образуется новый комплекс — поперечная ударная волна (как это указывалось в работах [1-4]). Поперечная волна служит мощным источником возмущений для области сгоревшего газа. Эти возмущения вступают в резонанс с собственными акустическими частотами газа за фронтом, развивающаяся при этом мощная акустическая волна, являющаяся, пучностью тангенциальных акустических колебаний, образует шлейф, вытянутый на длину трубы более 40 калибров. В течение всего процесса распространения спина сохраняется тесное взаимодействие поперечной волны со шлейфом, которое приводит к стабилизации ее скорости. Этим объясняется замечательное постоянство шага спина.

Автор благодарит Б. В. Войцеховского и Р. И. Солоухина за внимание к работе и полезные советы.

Поступила 5 III 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. О спиновой детонации. ДАН СССР, 1957, т. 114, № 4.
2. Войцеховский Б. В. Исследования структуры фронта спиновой детонации. Тр. МФТИ, Оборонгиз, 1958, т. 1.
3. Войцеховский Б. В., Котов Б. Е. Оптические исследования фронта спиновой детонационной волны. Изв. СО АН СССР, 1958, № 4.
4. Войцеховский Б. В., Котов Б. Е., Митрофанов В. В., Топчий М. Е., Оптические исследования поперечных детонационных волн. Изв. СО АН СССР, 1958, № 9.
5. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчий М. Е. О структуре течения в спиновой детонационной волне. ПМТФ, 1962, № 3.
6. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Пульсирующая и спиновая детонация газовых смесей в трубах. ДАН СССР, 1959, т. 125.
7. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Механизм детонационного сгорания. ПМТФ, 1960, № 1.
8. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Структура газовой детонации в трубах. ЖТФ, 1960, т. XXX, вып. 4.
9. Russell E. Duff. Investigation of Spining Detonation and Detonation Stability. The Physics of Fluids, 1961, No 11.
10. Щелкин К. И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. Воениздат, 1947.
11. Зельдович Я. Б., Компанеев А. С. Теория детонации. ГИТТЛ, 1955.
12. Воинов А. Н. О механизме возникновения детонационного спина. ДАН СССР, 1950, т. 73, № 1.
13. Зайцев С. Г. Об измерении быстроменяющихся давлений в газовой среде. ПТЭ, 1958, № 6.
14. Manson N. Propagation des detonations et des deflagrations dans les melanges gazeux. L'office National d'Etudes et des Recherches Aeronautiques, Paris, 1947.
15. Fay J. A. A mechanical theory of Spining detonation. J. Chemical Physics, 1952, vol. 20, N 6.
16. Солоухин Р. И., Топчий М. Е. Исследование шлейфа спиновой детонации. ДАН СССР, 1959, т. 127, вып. 4.
17. Солоухин Р. И. Применение ударных волн для изучения воспламенения газа. ПМТФ, 1960, № 2.