

К ИЗМЕРЕНИЮ ДАВЛЕНИЯ В СПИНОВОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ВОЛНЕ

В. В. Митрофанов, В. А. Субботин, М. Е. Топчиян

(Новосибирск)

Как известно [1], детонация газовых смесей в трубах вблизи пределов протекает по спиновому механизму. Структура спиновой волны была выяснена в работах [2-6]. Во фронте образуется поперечная волна, вращающаяся по окружности вдоль стенки трубки. Расчеты показывают [6], что в поперечной волне максимальное давление в 170-180 раз больше начального давления смеси, т. е. в 10 раз выше, чем в точке Чепмена — Жуге для детонационной волны в целом.

В работе [7] были представлены результаты измерений поля давления в спиновой волне малогабаритными пьезодатчиками, которые дали хорошее согласие измеренных величин с расчетными. Однако из-за отсутствия тарировки датчиков по абсолютным величинам давлений и чрезмерного сжатия осциллограмм по оси времени эти измерения не могли считаться достаточно надежными. В дальнейшем опыты были повторены нами более тщательно, и полученные результаты излагаются в настоящем сообщении.

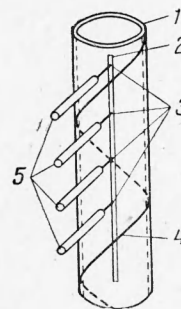
Спиновая детонация осуществлялась в гладкостенной латунной трубке диаметром 27 мм и длиной 140 см с навинченным конечным отрезком (20 см) из оргстекла. Смесь $2\text{CO} + \text{O}_2 + 3\% \text{H}_2$ при начальном давлении 0.1 атм инициировалась навеской азида свинца около 0.1 г. Направление вращения спина задавалось витком проволоочной спирали, помещенной внутрь трубки вблизи места инициирования.

Измерения проводились в конечном участке одновременно четырьмя пьезодатчиками давления. Расположение их на трубке показано на фиг. 1.

Датчики имели следующую конструкцию. В цилиндрическую латунную трубку внешним диаметром 6 и внутренним 4 мм помещался по оси цинковый стержень диаметром 1 или 2 мм с напаянной на конце сплавом Вуда поляризованной пластинкой титаната бария того же диаметра и толщиной 0.8 мм. Пространство между ними заполнялось пчелиным воском. Стержень соединялся с центральной жилой коаксиального кабеля, а корпус датчика (латунная трубка) — с оплеткой кабеля и посредством медной проволоочки диаметром 0.07 мм, погруженной в воск, с наружной посеребренной поверхностью, воспринимающей пьезопластинки (пайка производилась также сплавом Вуда). В описываемых здесь опытах два датчика имели диаметр чувствительного элемента 1 мм, два других — 2 мм. Эти же датчики использовались ранее в работе [8] и близкие по конструкции — в работе [7].

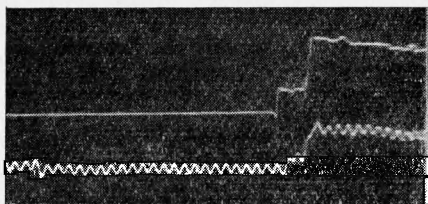
Электрические сигналы с датчиков подавались через катодные повторители на два двулучевых осциллографа ОК-17М. Постоянная времени входа составляла около $7 \cdot 10^{-4}$ сек. Время развертки около 60 мксек.

Для улучшения качества осциллограмм необходимо было добиться возможно более полного устранения паразитных колебаний, возникающих как внутри самого датчика, так и передаваемых от стенки детонационной трубки. Собственные колебания датчиков описанной конструк-



Фиг. 1. Расположение датчиков на детонационной трубке: 1 — трубка из плексигласа, 2 — щель в непрозрачной заслонке, 3 — метки, 4 — направление движения поперечной волны, 5 — датчики

ции при тщательном изготовлении удается сделать малыми. Передача колебаний от стенок трубки значительно уменьшалась, когда на корпус датчика надевалась резиновая трубка с толщиной стенки 1 мм и лишь после этого датчик вставлялся в отверстие. Поверхность чувствительного элемента датчика совпадала с внутренней поверхностью детонационной трубки, все отклонения внутренней поверхности от цилиндрической в месте выхода датчика замазывались изнутри воском, так что датчик не вносил посторонних возмущений в течение газа за фронтом детонации. Для устранения упругой волны в стенках от взрыва азид свинца на расстоянии 20 см от места инициирования латунная трубка имела резиновое соединение.



Фиг. 2. Осциллограмма давления в прямой и отраженной ударной волне в воздухе (тарировка)



Фиг. 3. Фоторегистрограмма спиновой волны. Темные линии — траектории датчиков в системе координат, связанной с поперечной волной

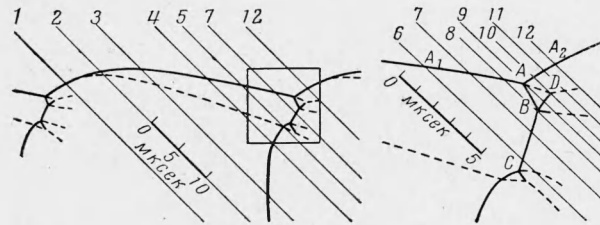
Датчики тарировались в рабочем положении ударной волной в воздухе, получаемой взрывом азид свинца, причем фиксировалась как прямая волна, так и отраженная от жесткой преграды, установленной на расстоянии около 5 мм от датчика. Типичная тарировочная осциллограмма приведена на фиг. 2. Скорость падающей волны измерялась на базе 70 мм, непосредственно перед тарируемым датчиком. Перепад давления в падающей и отраженной волнах рассчитывался по известным формулам при $\gamma = 1.4$. Скорость падающей волны не превышала 815 м/сек, что соответствовало избыточному давлению 5.4 атм в падающей волне и 25 атм в отраженной.

Для установления траекторий движения датчиков относительно спиновой волны в опытах производилась также фоторегистрация через продольную щель картины самосвечения на движущуюся пленку. Скорость пленки совпадала по величине и направлению со скоростью изображения поперечной волны в момент пересечения щели (метод полной компенсации, использовавшийся в работах [2-8]). Взаимное расположение щели и датчиков показано на фиг. 1. Пересечения щели мысленными спиральными линиями, проходящими по внутренней поверхности детонационной трубки через чувствительные элементы датчиков и параллельными линии движения «головы» спина, были отмечены непрозрачными метками. Так как в системе координат, движущейся вдоль любой такой спирали со скоростью «головы», структура течения стационарна, то на фоторегистрограммах вычерчиваемые метками темные линии являются траекториями датчиков относительно детонационной волны.

Одна из фоторегистрограмм приведена на фиг. 3. Видно чередование четких и нечетких полупериодов, причем четкие соответствуют прохождению поперечной волны мимо щели по ближней стенке трубки, смазан-

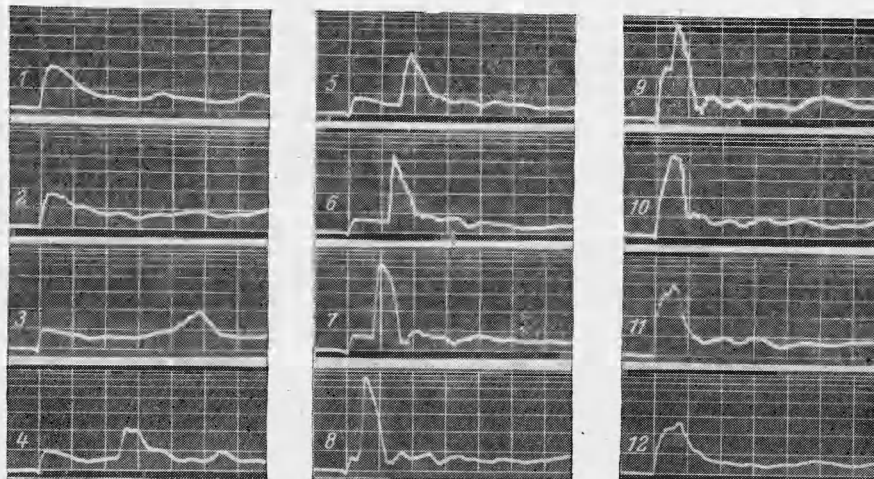
ные — по противоположной. Каждый период совпадает с разверткой на плоскость цилиндрической поверхности трубки, на которой нанесено мгновенное положение светящихся фронтов [2-5].

Схема фронтов вблизи стенки, образующих спиновую волну, вычерчена на фиг. 4а. Поперечная волна в выделенном прямоугольнике изображена справа в более крупном масштабе. Нанесены траектории датчи-



Фиг. 4а. Схема скачков вблизи стенки с траекториями датчиков давления (соответствуют осциллограммам на фиг. 4б). Сплошные жирные линии — ударные и детонационные скачки, пунктирные — контактные разрывы

ков, прошедших через наиболее интересные области течения. Соответствующие осциллограммы приведены на фиг. 4б. Здесь подобраны осциллограммы, полученные одним датчиком, который давал наилучшее качество записи и наиболее тщательно тарировался (диаметр чувствительного элемента 1 мм). Тарировочная кривая этого датчика была приведена в работе



Фиг. 4б. Осциллограммы давления. Одно деление по вертикали соответствует $25 p_0$, по горизонтали — 5 мксек

[8]. После окончания всех опытов тарировка была повторена, причем точки легли на ту же кривую с разбросом по давлению не более 7%.

Осциллограммы 6, 7 и 8 соответствуют прохождению датчика через поперечный фронт. Вблизи точки В зарегистрировано давление в поперечном фронте $160 p_0$. При движении по направлению от точки В к С давление за поперечным фронтом постепенно спадает приблизительно до $110 p_0$.

Для подтверждения схемы скачков, предлагавшейся в работе [6], особенно важна осциллограмма 9. Здесь датчик прошел через область за скачком AB (фиг. 4а) с давлением $62 p_0$ и зафиксировал скачок BD с давлением около $165 p_0$. Существование фронта BD вытекает из теоретического построения схемы течения, но другими средствами (теплер, снимки самосвечения) его обнаружить не удавалось. Непрерывный подъем давления от 45 до $62 p_0$ на этой осциллограмме вызван тем, что датчик прошел непосредственно через тройную точку A и на часть его площади действовало некоторое время давление перед скачком AB (около $19 p_0$). Между фронтом AA_2 и контактным разрывом AD течение дозвуковое, поэтому датчики, проходящие выше точки D , отмечают плавное изменение давления.

Приводим для сравнения сопоставление измеренных величин давления p/p_0 за скачками с рассчитанными в окрестностях тройных точек A и B :

Скачок	A_1A	AA_2	AB	BD	BC	
$\frac{p}{p_0} = \left\{ \right.$	19.2	54.5	54.5	170	170	расчет
$\left. \right\}$	19 ± 1	52 ± 5	60 ± 5	160 ± 10	155 ± 10	эксперимент

Расчет производился для смеси $2CO + O_2$ при $p_0 = 0.1 \text{ атм}$ и $T_0 = 293^\circ \text{ К}$. Влияние водорода ввиду его малой концентрации в рабочей смеси не учитывалось. Состав газа за BC и AA_2 считался химически равновесным (рассматривались реакции $2CO + O_2 \rightleftharpoons CO_2$ и $O_2 \rightleftharpoons 2O$), за остальными скачками — не реагирующим.

Исходными данными для расчета тройных конфигураций были скорость невозмущенного потока в системе координат, связанной с поперечной волной, $u_0 = 2370 \text{ м/сек}$ ($D = 1700 \text{ м/сек}$) и угол между его направлением и фронтом A_1A $\varphi_0 = 34.5^\circ$, определявшиеся экспериментально [6].

За указанными скачками, а также всюду вдоль переднего фронта $AA_2 \dots A_1A$ рассчитанные давления с точностью не хуже 10% совпадают с измеренными.

Отметим, что за поперечным фронтом BC датчики не обнаружили слоя ударно сжатого газа, предшествующего зоне реакции, в котором давление должно быть по расчету $195 p_0$. Максимально измеренное давление даже несколько ниже рассчитанного в предположении мгновенной реакции.

Все из приведенных осциллограмм в описываемых здесь опытах повторялись неоднократно, поэтому схему течения в спиновой волне, предложенную в работах [2-6], можно считать окончательно подтвержденной.

Авторы признательны Б. В. Войцеховскому за внимание к работе.

Поступила 1 II 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Ракипова Х. А., Трошин Я. К., Щёлкин К. И. Спин у пределов детонации. Ж. техн. физ., 1947, т. 17, № 12.
2. Войцеховский Б. В. О спиновой детонации. ДАН СССР, 1957, т. 114, № 4.
3. Войцеховский Б. В. Исследования структуры фронта спиновой детонации. Тр. МФТИ, 1958, т. 1.
4. Войцеховский Б. В., Котов Б. Е., Оптические исследования фронта спиновой детонационной волны. Изв. СО АН СССР, 1958, № 4.
5. Войцеховский Б. В. Спиновая и стационарная детонация. Уч. Совет по народнохоз. использованию взрыва. Новосибирск, 1960, № 10.
6. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчийн М. Е. О структуре течения в спиновой детонационной волне. ПМТФ, 1962, № 3.
7. Топчийн М. Е. Экспериментальные исследования спиновой детонации датчиками давлений. ПМТФ, 1962, № 4.
8. Митрофанов В. В. Структура детонационной волны в плоском канале. ПМТФ, 1962, № 4.