

В. Е. ГОРДЕЕВ

СПИН БЕЗ ПОПЕРЕЧНОГО ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА

(Представлено академиком Н. М. Эмануэлем 11 XI 1973)

В основу первой количественной теории детонационного спина в газовых взрывчатых смесях была положена вращающаяся трехударная конфигурация, в которой наиболее интенсивная химическая реакция происходит лишь за фронтом маховской волны ⁽¹⁾. Эта модель была затем значительно усложнена введением еще одного детонационного скачка — так называемой поперечной волны и трех тройных точек с маховским отражением ударных и детонационных скачков ⁽²⁾. Поперечной детонационной волне приписывается значение основного фактора, препятствующего затуханию нормального спина. Широкий (в одну четверть диаметра) спиральный след на закопченных стенках детонационной трубы — наиболее характерный признак нормального спина. Его оставляет именно поперечная детонационная волна.

Другая, очень редкая разновидность спиновой детонации — спин без поперечного детонационного фронта — до настоящего времени подробно не исследовалась. Согласно кратким сведениям, которые содержатся в монографии ⁽²⁾, такой спин появляется лишь случайно, при затухании нормального спина, и распространяется медленнее, чем нормальный спин. Исследование этого редкого явления имеет принципиальное значение, так как схема ядра такого спина должна соответствовать той модели ⁽¹⁾, которая в свое время открыла первую возможность проведения количественных оценок параметров газа в спиновой детонации.

Два вопроса представляют наибольший интерес: во-первых, способна ли спиновая детонация с одним детонационным скачком распространяться, не затухая и, во-вторых, в чем именно состоят причины возникновения и распространения детонации такого типа.

Опыты, в которых проводились поиски режима спиновой детонации без поперечной волны, были поставлены следующим образом. Стеклянные трубы диаметром 16 мм наполнялись гремучим газом при различных начальных давлениях. Инициирование взрыва производилось электрическим разрядом ($C=0,7 \mu\Phi$, $L=3 \mu\Phi$, $V=20$ кв) через искровой промежуток длиной 10 см, расположенный вдоль оси трубы. Инициирование импульсным разрядом дополнительно усиливалось двумя способами: либо вложением в трубку перед искровым промежутком проволочной спирали с шагом 4—5 см, либо изгибанием трубы в том месте, где заканчивался искровой промежуток. Процесс распространения взрыва регистрировался следовым методом и скоростной фотокамерой ФК-1М.

Спин без поперечного детонационного фронта был обнаружен при начальном давлении гремучего газа 20 мм рт. ст. Он появлялся при этом давлении безотказно и мог распространяться по трубе на расстояние до 75 см, тогда как возникновение нормального спина при этих условиях оказалось невозможным. В трубке диаметром 16 мм нормальный спин возникал только при начальном давлении 45—50 мм рт. ст. На закопченных стенках трубы спин без поперечного детонационного скачка оставляет спиральный след, ширина которого приблизительно в 10 раз меньше, чем у нормального спина. След состоит из 2 полос: одна имеет четкую внешнюю границу, другая — более размытую. В отличие от нор-

малого спина, шаг этого спирального следа имеет несколько большую длину (6 вместо 5 см).

Скорость распространения спина без поперечного детонационного фронта не сохраняет постоянного значения, а плавно уменьшается от 2,2 км/сек в самом начале распространения до 1,8 км/сек на расстоянии 5–6 полных витков спирали и даже до 1,3 км/сек на расстоянии 10–12 витков.

Как правило, спин затухает уже через 5–6 витков, но в отдельных случаях он распространяется вдвое дальше. Затухание происходит довольно резко, почти без изменения шага последнего витка. Четкость следовых отпечатков уменьшается по мере распространения спина.

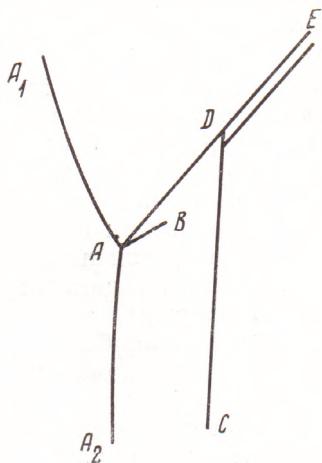


Рис. 2. Схема следов столкновения на рис. 1

и вниз (ADE на рис. 2), — это часть спирального следа спина без поперечной детонационной волны. Она представляет собою траектории тройной точки A (верхняя линия) и кромки B (нижняя линия) слабо заметной отраженной (поперечной) волны AB в трехударной конфигурации спина. Линия AA_2 представляет собой след столкновения фронтов так называемых падающих волн обоих спинов, а линия AA_1 — след столкновения падающей ударной волны нормального спина, пришедшего слева, с маховским детонационным скачком исследуемого спина. Обращает на себя внимание широкая (в натуре 2 мм) темная полоса AA_2CD , косо ограниченная сверху следом движения тройной точки. Эта зона задержки воспламенения газа за падающей ударной волной. Правая граница зоны задержки (линия CD) есть след столкновения волны сжатия, возникающей при отражении двух ударных волн, с фронтом горения за падающей ударной волной, отставшим от ударного фронта.

Зона задержки воспламенения контрастно выделяется на более светлом фоне пространства за маховским детонационным скачком, где задержка воспламенения исчезающе мала. На рис. 1 показан участок столкновения, содержащий лишь ядро спина. На всей же поверхности отпечатка хорошо видно, как по мере удаления от точки A вниз по окружности трубы полоса $AACD$ постепенно становится все более и более узкой. Наконец, через три четверти длины окружности трубы она полностью исчезает и за фронтом маховской волны уже не различается. Волнообразные полосы, веером выходящие кверху из окрестности тройной точки A , представляют собой следы каких-то неизвестных пока возмущений за маховской волной, образующихся при столкновении.

Следовой отпечаток столкновения обнаруживает отсутствие горения непосредственно за отраженной (поперечной) ударной волной. Ее фронт на всем своем небольшом протяжении располагается в той зоне, где горение еще не начиналось. Никаких следов второй тройной точки и попереч-

На рис. 1 представлен фотоснимок, сделанный с одного из следовых отпечатков, полученных в опытах по столкновению друг с другом двух нормальных спинов в трубе диаметром 16 мм при начальном давлении гремучего газа 45 мм рт. ст. Несколько раз один из сталкивающихся спинов спонтанно выреждался в спин без поперечного детонационного скачка. При этом шаг такого спина несколько удлинялся (5,5 см). Картина столкновения содержит интересную информацию о спине без поперечного детонационного фронта, которую трудно получить иными способами. На рис. 2 дана схема следов, изображенных на рис. 1.

Наклонная двойная полоса, которая проходит из правого верхнего угла снимка влево и вниз (ADE на рис. 2), — это часть спирального следа спина без поперечной детонационной волны. Она представляет собою траектории тройной точки A (верхняя линия) и кромки B (нижняя линия) слабо заметной отраженной (поперечной) волны AB в трехударной конфигурации спина. Линия AA_2 представляет собой след столкновения фронтов так называемых падающих волн обоих спинов, а линия AA_1 — след столкновения падающей ударной волны нормального спина, пришедшего слева, с маховским детонационным скачком исследуемого спина. Обращает на себя внимание широкая (в натуре 2 мм) темная полоса AA_2CD , косо ограниченная сверху следом движения тройной точки. Эта зона задержки воспламенения газа за падающей ударной волной. Правая граница зоны задержки (линия CD) есть след столкновения волны сжатия, возникающей при отражении двух ударных волн, с фронтом горения за падающей ударной волной, отставшим от ударного фронта.

Зона задержки воспламенения контрастно выделяется на более светлом фоне пространства за маховским детонационным скачком, где задержка воспламенения исчезающе мала. На рис. 1 показан участок столкновения, содержащий лишь ядро спина. На всей же поверхности отпечатка хорошо видно, как по мере удаления от точки A вниз по окружности трубы полоса $AACD$ постепенно становится все более и более узкой. Наконец, через три четверти длины окружности трубы она полностью исчезает и за фронтом маховской волны уже не различается. Волнообразные полосы, веером выходящие кверху из окрестности тройной точки A , представляют собой следы каких-то неизвестных пока возмущений за маховской волной, образующихся при столкновении.

Следовой отпечаток столкновения обнаруживает отсутствие горения непосредственно за отраженной (поперечной) ударной волной. Ее фронт на всем своем небольшом протяжении располагается в той зоне, где горение еще не начиналось. Никаких следов второй тройной точки и попереч-

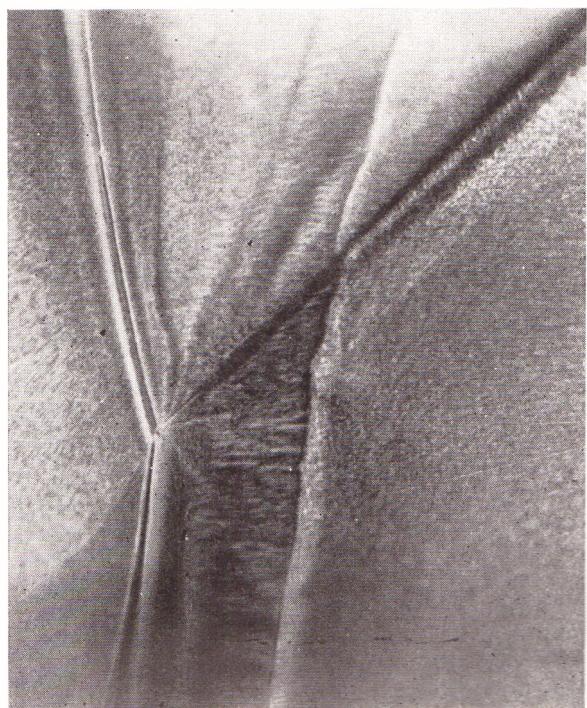


Рис. 1. Следовой отпечаток столкновения нормального спина со спином без поперечного детонационного фронта

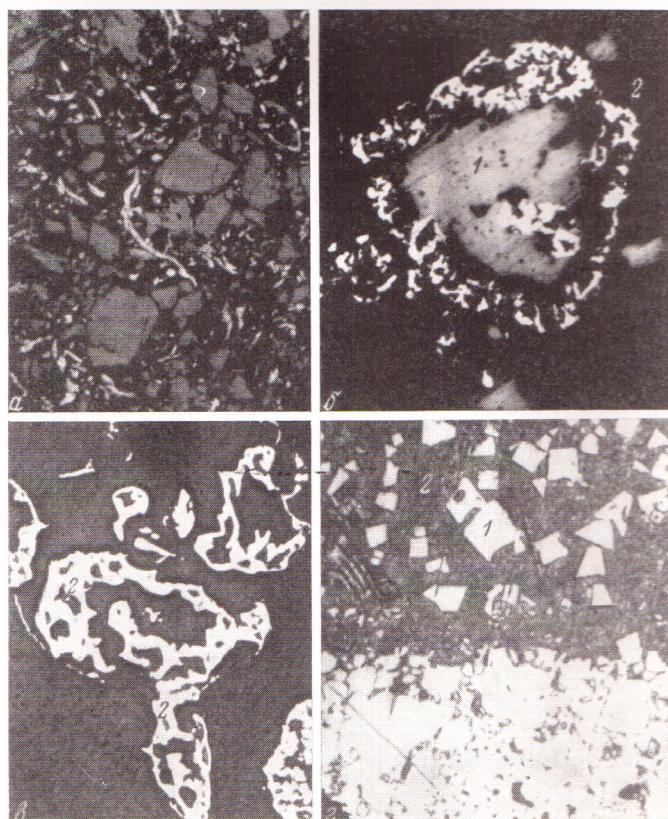


Рис. 2. Продукты взаимодействия Cu_2S , FeS и PbS с водородом. *а* — сульфид меди, $450\times$; *б* — сульфид железа, $900\times$; *в* — сульфид железа, $1100\times$, $70\times$; *г* — сульфид свинца, $240\times$. *1* — сульфид, *2* — металл

ной детонационной волны на отпечатке не существует. Отпечаток столкновения двух нормальных спинов обычно обнаруживает и то и другое (см. (3)).

Проведенные опыты свидетельствуют, таким образом, о невозможности распространения спина с одним детонационным скачком с постоянной скоростью. Это косвенно подтверждает предположение о стабилизирующей роли поперечного детонационного фронта в нормальной спиновой детонации (2).

Другой, более важный вывод о природе спиновой детонации следует из того факта, что спин без поперечной детонационной волны безотказно осуществляется при столь низких начальных давлениях газа, что нормальный спин в нем не возникает. Наоборот, условия, в которых может распространяться нормальный спин, не исключают возможности его вырождения в спин без поперечной волны. Двойное маховское отражение, которым обусловлено появление поперечной детонационной волны (3), возникает, как известно (4), лишь в достаточно сильных ударных волнах. В условиях детонационного процесса для образования столь сильных волн (и для их поддержания) необходимо достаточно быстрое выделение энергии в химической реакции. Но понижение начального давления газа должно замедлить реакцию. Это, в свою очередь, приведет к такому ослаблению ударных и детонационных скачков, при котором двойное маховское отражение станет неосуществимым. Поэтому при понижении начального давления нормальный спин перестает образовываться, а спин без поперечной детонационной волны неизбежно замедляется и затухает совсем. Случайное замедление реакции в спине с поперечной детонационной волной приводит к разрушению этой конфигурации и к ее переходу в спин без поперечной волны.

Следовательно, если нормальный спин представляет собою последнюю возможность существования детонации, то вполне допустимо считать спин без поперечной волны последней возможностью существования спина.

Автор благодарен Ю. С. Матвееву за помощь при проведении работы.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
22 X 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. И. Щелкин, ДАН, т. 47, 501 (1945). ² Б. В. Войцеховский и др., Структура фронта детонации в газах, Новосибирск, 1963. ³ В. Е. Гордеев и др., ДАН, т. 212, 124 (1973). ⁴ Л. Г. Гвоздева и др., Изв. АН СССР, Мех. жидкости и газа, № 1, 12 (1968).