

УДК 534.222.2

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

В. Е. ГОРДЕЕВ, Ю. С. МАТВЕЕВ, Я. К. ТРОШИН

О СТРУКТУРЕ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

(Представлено академиком Н. М. Эмануэлем 13 III 1973)

Детонационный спин в свое время был уязвимым местом теории детонации, созданной Зельдовичем⁽¹⁾. Потребовалась специальная теория^(2, 3, 4), чтобы это явление получило, наконец, первое верное объяснение, состоявшее в том, что в спиновой детонации главную роль играет тройная ударная (маховская) конфигурация. При этом детонационным фронтом считался только фронт маховской волны. В дальнейшем^(5, 6) было установлено, что спин всегда появляется у пределов распространения детонации, а затем^(7, 8) оказалось, что он представляет собой предельный случай пульсирующей (многофронтной) детонации, в механизме распространения которой тройные ударные конфигурации играют решающую роль. Сама же пульсирующая детонация есть следствие неустойчивости фронта воспламенения⁽⁹⁾.

Но несмотря на большой прогресс в изучении детонации^(10, 11) дальнейшее исследования детонационного спина, безусловно, необходимы, так как, во-первых, еще не все детали его структуры вполне надежно установлены, а во-вторых, и это самое главное, их происхождение не всегда понятно. Поэтому были поставлены опыты со спиновой детонацией в гремучем газе.

Стеклянные трубки с внутренним диаметром 16 мм наполнялись гремучим газом до начального давления 45 мм рт. ст. Спиновая детонация возбуждалась одновременно у двух концов трубки импульсным электрическим разрядом. Для регистрации столкновений двух спинов был выбран следо-вой метод.

На рис. 1а представлена фотография, сделанная со следового отпечатка, полученного при столкновении спина, пришедшего справа, с падающей ударной волной встречного спина. Широкий наклонный след справа в натуре составляет 4 мм. На рис. 1б часть той же картины увеличена в 4 раза. На рис. 2 представлена схема этих фотографий, где A — тройная точка правого спина, AA_2 — падающая ударная волна, AA_1 — маховская волна, B — вторая тройная точка правого спина, BC — след так называемой поперечной волны.

Разумеется, истинное положение фронтов не совпадает с их положением на отпечатке столкновения, так как все они имеют скорости, которые отличаются друг от друга на разные величины. Тем не менее, отпечатки обнаруживают несомненное присутствие таких мелких деталей структуры спина, которые до сих пор не поддавались вполне надежной регистрации. Это относится в первую очередь к фронтам AB и BD , длина которых составляет всего 0,1 длины фронта BC , поэтому до сих пор их существование могло считаться скорее выведенным теоретически, нежели установленным в опытах. Тройные точки A и B прочерчивают четкий след — узкую дорожку, окаймляющую широкий след спина спереди. Две других тройных точки C и M оставляют такую же, но значительно менее четкую дорожку, ограничивающую этот след сзади. К сожалению, в гремучем газе она всегда выражена намного слабее передней, и структуру спина в окрестностях точек C и M на отпечатках подробно рассмотреть невозможно. Напротив, вся передняя область головы спина видна довольно отчетливо.

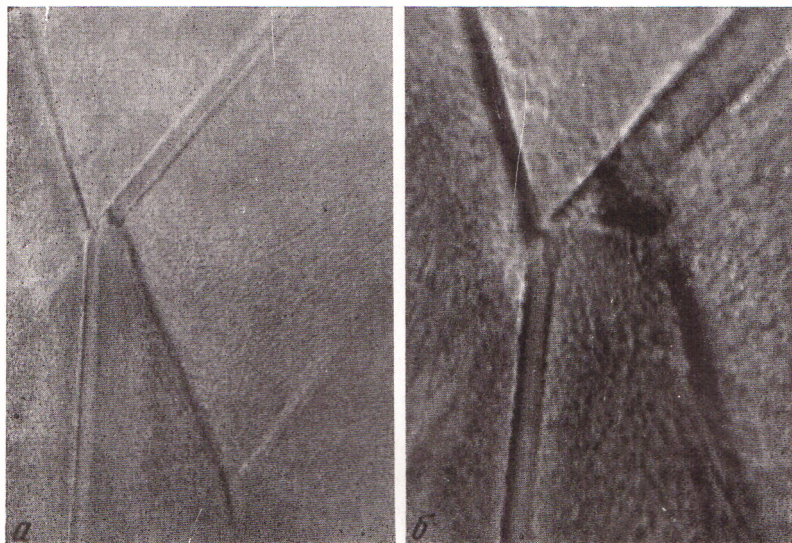


Рис. 1

Линия AB соответствует фронту отраженной волны, которая испытывает излом в точке B , от нее отходит фронт поперечной волны BC и вторая маховская волна BD , пересекающая переднюю дорожку. След тангенциального разрыва за волной AA_1 на отпечатке не виден, он находится на траектории точки A . Тангенциальный разрыв за волной B_d , по-видимому, находится на траектории точки B и потому также неразличим.

В целом картина соответствует схеме ядра спиновой детонации, которая подробно описана в ⁽¹¹⁾. Она приведена на рис. 3 (обозначения те же, что

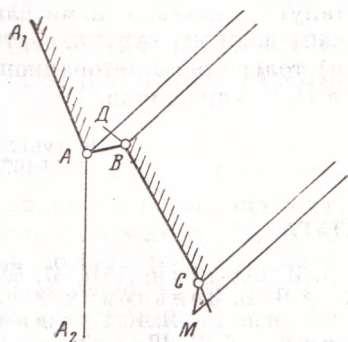


Рис. 2

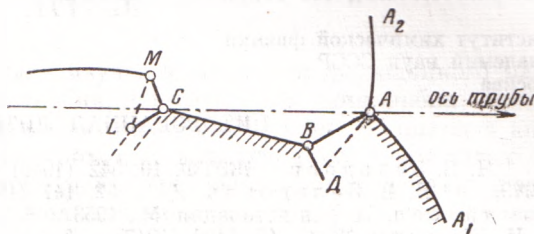


Рис. 3

и на рис. 2). Эта схема отличается от первой модели спина ^(2, 3) с вращающимся изломом ударной волны, значительно большей сложностью. Именно этим обстоятельством и объясняется некоторое сомнение в ее адекватности, послужившее стимулом для постановки описанных опытов, результаты которых, однако, дали наглядное подтверждение сложной схемы.

Но такое подтверждение еще не содержит объяснения природы этой сложности. Какая физическая причина вызывает излом отраженной волны? До тех пор, пока на этот вопрос не будет дано исчерпывающего ответа, спин останется нерешенной проблемой. Ссылки на то, что схема, изображенная на рис. 3, подтверждается экспериментально и обусловлена законами сохранения, в этом смысле ничего не объясняют.

Между тем излом отраженной волны — явление уже не новое. Оно впервые наблюдалось в работе ⁽¹²⁾ при нерегулярном отражении ударной волны от наклонной поверхности в углекислом газе. При этом, как и в ядре детонационного спина, вместо одной образуются сразу две маховские волны. В этой же работе указана и конкретная физическая причина появления излома. Схема отражения, заимствованная из работы ⁽¹²⁾, представлена на рис. 4. Не вызывает сомнений, что положение фронтов на этой схеме совпадает с их положением на рис. 3.

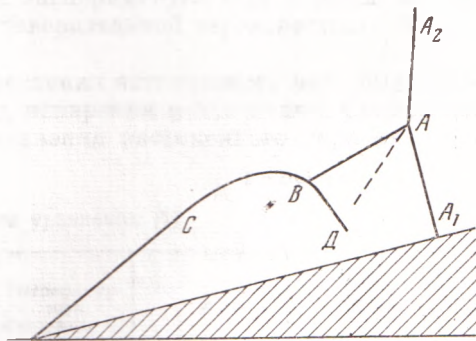


Рис. 4

Таким образом, результаты работы ⁽¹²⁾ не только оправдывают сложность схемы, разработанной авторами монографии ⁽¹¹⁾, но и раскрывает ее подлинный смысл: поперечная детонационная волна есть не что иное, как отраженная волна, претерпевшая излом в точке B при двойном маховском отражении. Как показано в ⁽¹²⁾, в углекислом газе этот дополнительный излом возникает вследствие уменьшения эффективного отношения теплоемкостей газа при возбуждении колебаний и диссоциации молекул в силь-

ной ударной волне. Причина излома отраженной волны в ядре спина очевидно та же — реакция в газе. Измерения показали, что параметры газа в отраженной волне после ее излома резко повышаются. Этим можно объяснить, почему скачок BC становится детонационным.

Излом отраженной волны появляется только в тех случаях, когда скорость падающей волны достаточно велика. При этом угол между падающей и отраженной волной сильно возрастает. Если падающая волна слабая, то излом отраженной волны не возникает. Следовательно, при замедлении спина параметры газа за поперечной волной станут недостаточными для поддержания в ней детонации, и в этом случае должен существовать (по крайней мере в течение некоторого времени) только один детонационный скачок AA_1 , что соответствует первой схеме (2 , 3) ядра спина.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
22 II 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ, 10, 542 (1940). ² К. И. Щелкин, ДАН, 47, 501 (1945). ³ Я. Б. Зельдович, ДАН, 52, 147 (1946). ⁴ Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев, Теория детонации, М., 1958. ⁵ Х. А. Ракипова, Я. К. Трошин, К. И. Щелкин, ЖТФ, 17, 1409 (1947). ⁶ Я. К. Трошин, К. И. Щелкин, Изв. АН СССР, отд. техн. наук, № 8, 142 (1957). ⁷ Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин, ДАН, 125, 110 (1959). ⁸ Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин, ЖТФ, 30, 450 (1960). ⁹ К. И. Щелкин, ЖЭТФ, 36, 600 (1959). ¹⁰ К. И. Щелкин, Я. К. Трошин, Газодинамика горения, М., 1963. ¹¹ Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчий, Структура фронта детонации в газах, Новосибирск, 1963. ¹² Л. Г. Гвоздева, О. А. Предводителева, ДАН, 163, 1088 (1965).