

УДК 534.222.22

ВКЛАД К. И. ЩЁЛКИНА В ИССЛЕДОВАНИЕ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ И ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ЕЕ ТЕОРИИ

М. Е. Топчиян

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, topch@hydro.nsc.ru

В связи со 100-летним юбилеем К. И. Щёлкина проведен анализ его работ по теории детонационного спина, в которых он впервые указал на газодинамическую природу явления, предсказал наличие излома переднего фронта детонационной волны и создал предпосылки для дальнейших исследований структуры течения при спиновой детонации.

Ключевые слова: спиновая детонация, оптические исследования, структура «головы» спина, измерение поля давлений.

Исследования Кирилла Ивановича Щёлкина, посвященные детонации газов, и их результаты чрезвычайно обширны. Здесь вопросы инициирования, перехода горения в детонацию, детонации в шероховатых трубах, новые усовершенствованные методики эксперимента, новые подходы к трактовке и описанию явлений. Мы рассмотрим только его вклад в выявление природы спиновой детонации и дальнейшее развитие представлений о ней.

Первая работа Кирилла Ивановича, тогда 23-летнего молодого исследователя, связанная со спиновой детонацией [1], была опубликована в 1934 г. Пытаясь разобраться в противоречиях трактовки явления, возникших между Кемпбеллом и Боном с сотрудниками, Кирилл Иванович сделал небезуспешную попытку вычислить частоту спина на основе теории спирального движения несжимаемой жидкости в круглой трубе. Хотя предположения о свойствах среды, и это понимал сам автор, были довольно грубыми, «... согласие между экспериментальными и рассчитанными результатами говорит в пользу теории этого явления, предложенной Кемпбеллом [2–4], а именно, что наблюдаемая структура детонационной волны на самом деле обусловлена спиральным движением сгоревшего газа. Тем не менее, в целом гидродинамическая трактовка, физическая природа этого явления остается не затронутой. Так, например, неясны реальные причины спирального движения газа. Мы можем только предположить, что возникновение новой формы движения связано с несимметричным распределением давления, плотности и скорости газа, перед тем как достигаются конечные высокие скорости. Это должно иметь место непосредственно перед де-

тонацией» [1]. Тем самым впервые был поставлен вопрос о неоднородности газодинамической картины течения.

Нужно сказать, что предположение Кемпбелла о вращении в целом всей массы газа противоречит закону сохранения момента импульса и результатам экспериментов Бона и сотрудников, показавших, что введение в детонационную трубу продольного ребра высотой 1 мм на спин не влияет [5, 6].

12 лет спустя в работах Н. Мансона [7] было установлено, что вращающаяся за фронтом спиновой детонации протяженная светящаяся зона (шлейф) является резонансной фазовой акустической волной пучности тангенциальных колебаний газа и ее перемещение не требует вращения всей его массы.

Совпадение частот спирального движения, полученных К. И. Щёлкиным и по акустической теории Мансона, являлось следствием формального совпадения уравнений для скорости спирального движения жидкости и потенциала скорости газа в цилиндрических координатах. Кроме того, массовая скорость потока за детонационной волной, использованная К. И. Щёлкиным в расчетах, равнялась скорости звука в сгоревшем газе вследствие выполнения условия Чепмена — Жуге [8]. Таким образом, Кирилл Иванович предвосхитил акустическую теорию шлейфа спиновой детонации, разработанную Мансоном, указав на связь частоты вращения шлейфа с массовой скоростью (скоростью звука) в сгоревшем газе.

В последующие годы Кирилл Иванович занимался скоростью горения в турбулентном потоке, возникновением детонации, детонацией в шероховатых трубах. Эти пионерские работы

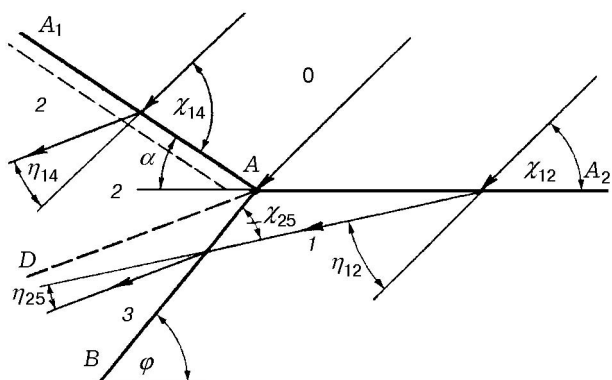


Рис. 1. Схема К. И. Щёлкина

являются важнейшими научными достижениями, не утратившими своей актуальности и сегодня.

К вопросам, связанным со спиновой детонацией, он возвратился только в 1945 г. В небольшой, но очень важной, содержательной работе [9] Кирилл Иванович впервые предложил возможный газодинамический механизм спина (рис. 1), основанный на задержке воспламенения в плоской ударной волне: газовая смесь зажигается «...благодаря особого рода сильному возмущению, распространяющемуся по фронту ударной волны вдоль окружности трубы. Это возмущение представляет собою излом фронта, обладающий более высокой температурой и плотностью, чем плоская ударная волна...».

Логически непротиворечивое газодинамическое обоснование схемы К. И. Щёлкина было дано на девять месяцев позднее Я. Б. Зельдовичем [10]. Суть его сводилась к следующему. При детонации вблизи пределов условия за плоской прямой волной не обеспечивают быстрого инициирования горения газовой смеси. В результате задержки воспламенения давление за плоским фронтом некоторое время поддерживается равным давлению за ударным фронтом, ведущим детонацию (примерно в два раза большим, чем после сгорания). Такая ситуация, как было показано К. И. Щёлкиным, неустойчива и приводит на малой части плоского прямого фронта к образованию излома, движущегося вдоль этого фронта поперек основного осевого движения. В результате сложения движений скорость газа, втекающего в излом, возрастает примерно в 1.4 раза. Вследствие этого за ударной волной температура газа повышается примерно в полтора

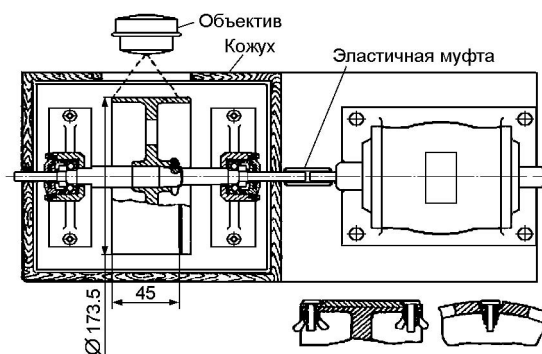


Рис. 2. Фоторегистратор К. И. Щёлкина

раза, что резко уменьшает задержку воспламенения. Поэтому газ за изломом сгорает практически мгновенно, а давление сгоревшего газа устанавливается примерно равным давлению окружающей эту малую область среды, т. е. давлению за ведущей плоской ударной волной.

Наряду с теоретическими изысканиями, Кирилл Иванович совершенствует методику эксперимента. Он применил барабанный фоторегистратор (рис. 2) с внешним креплением пленки [11], что дало возможность использовать светосильные объективы.

Особо нужно отметить впервые примененный им вместе с Х. А. Ракиповой и Я. К. Трошиным [12] метод компенсации движения объекта, благодаря которому стало возможным получать неискаженные снимки движущихся стационарных объектов с эквивалентным временем экспозиции, на два порядка превышающим обычную покадровую съемку.

Улучшение методики эксперимента позволило окончательно убедиться, что спиновая детонация, как указывали М. А. Ривин и А. С. Соколик [13], всегда появляется у пределов детонации, независимо от способа подхода к пределу, и при затухании детонации [14].

Модель течения в области головы спина, разработанная Щёлкиным и Зельдовичем, обладала рядом недостатков, и это понимали сами авторы. Цитирую из работы Зельдовича [10]: «Дальнейшими нерешенными задачами являются строгое обоснование... условия равенства скорости движения и скорости звука в продуктах горения в косоугольной детонационной волне... определение размеров косоугольной волны...». Действительно, каким образом поддерживается постоянный размер излома? Чем определяется поперечная скорость излома?

Объяснение газодинамических причин появления излома оставалось не совсем ясным.

В 1950 г. А. Н. Воинов [15] выдвинул предположение о том, что за ведущей детонационной ударной волной в пристеночном пограничном слое, нагретом вследствие трения и возмущений, порождаемых шероховатостью стенок, до температуры более высокой, чем основной поток, возможно возникновение и распространение детонационной волны. Эта волна, которую он осторожно называет «поперечная волна самовоспламенения», распространяется вдоль стенки трубы поперек основного осевого движения, в результате образуется спиральная траектория. Какой-либо газодинамической модели и соображений о величине поперечной скорости в работе [15] предложено не было.

В конце 1950-х — начале 1960-х годов по совету М. А. Лаврентьева исследования спиновой детонации были начаты в МФТИ, а потом продолжены и в ИГиЛ СО РАН группой исследователей под руководством Б. В. Войцеховского.

Почти всегда новые сведения о природе явления удается получить при улучшении методики эксперимента. Для фотографирования детонации Б. В. Войцеховский применил (по-видимому, впервые) фоторегистратор с прозрачным, тщательно отполированным барабаном из оргстекла и высокооборотным электромотором от пылесоса (рис. 3). Такая конструкция позволила примерно в два ра-

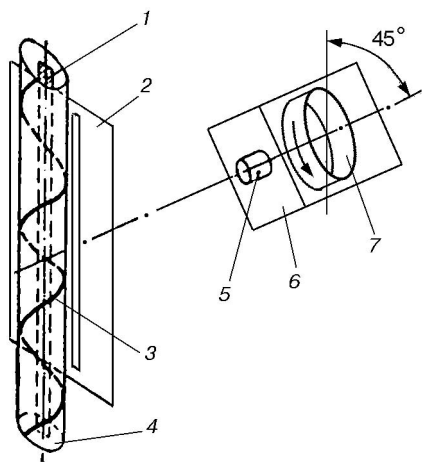


Рис. 3. Постановка метода полной компенсации по Б. В. Войцеховскому:

1 — шторка, 2 — экран со щелью, 3 — трек спина, 4 — детонационная трубка, 5 — объектив, 6 — фоторегистратор, 7 — прозрачный барабан



Рис. 4. Фоторегистрограмма спиновой детонации по Б. В. Войцеховскому

за по сравнению с внешним креплением пленки повысить скорость ее движения и, соответственно, увеличить изображение при сохранении высокой светосилы стандартного объектива («Юпитер-3»). С весны 1956 г. автор статьи, тогда студент 4-го курса МФТИ, проходил постоянную научно-исследовательскую практику под руководством Б. В. Войцеховского и осенью 1956 г. помогал ему в проведении опытов по фоторегистрации спиновой детонации. В процессе обсуждения метода компенсации движения изображения, примененного Х. А. Ракиповой, К. И. Щёлкиным и Я. К. Трошиным [14], Богдан Вячеславович обратил внимание на то, что в их экспериментах не достигнута полная компенсация движения изображения «головы» спина, поскольку было скомпенсировано только продольное, осевое движение. В этом случае изображение искажается, растягиваясь в поперечном направлении. Войцеховский повернул ось фоторегистратора на 45° так, чтобы скорость пленки совпадала со скоростью движения изображения «головы» как по величине, так и по направлению (см. рис. 3). В такой постановке Богдан Вячеславович впервые получил неискаженные четкие снимки самосвечения «головы» спина, при многократном прохождении ею продольной щели [16, 17]. Эти фотографии (рис. 4) послужили основой нового подхода к объяснению явления спиновой детонации.

Как и в модели Щёлкина, причиной всего являются большие задержки воспламенения при распространении волны в околопредельных условиях, что приводит к отставанию фронта пламени от ударной волны. Как показал Кирилл Иванович, такая ситуация неустойчива. Б. В. Войцеховский предположил, что эта неустойчивость развивается в полноценную детонационную волну, движущуюся со скоростью Чепмена — Жуге поперек направления основного движения детонации по слою несгоревшего газа, нагретого ведущей ударной волной. Таким образом, в модели Войцехов-

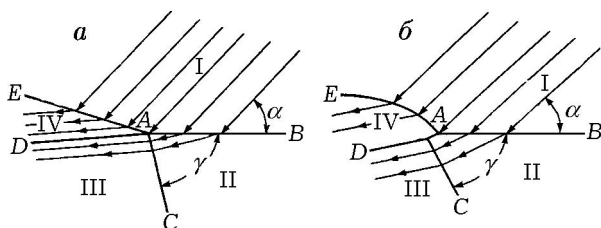


Рис. 5. Две схемы скачков к модели Б. В. Войцеховского

ского ведущая роль в конфигурации отводится не излому переднего фронта AE , а волне AC (рис. 5), которая является самостоятельной детонационной волной. Давление за этой волной примерно в девять раз превышает давление Чепмена — Жуге в плоской детонационной волне. Разлет продуктов детонации поперечной детонационной волны и приводит к возмущению переднего фронта и образованию излома. Газ за изломом, как и в модели Щёлкина, реагирует почти мгновенно. Возмущение переднего фронта по мере удаления от точки A ослабевает, нормальная к фронту компонента скорости набегающего потока (зона I) уменьшается, температура за фронтом падает, вследствие чего задержка воспламенения резко растет. Происходит отделение фронта пламени от ударной волны, и образуется слой сжатого несгоревшего газа, по которому движется поперечная волна (зона II).

В модели Войцеховского газ обтекает расширяющиеся продукты детонации поперечной волны AC (область III), подобно обтеканию клина сверхзвуковым потоком за присоединенной пересечной детонационной волной AE . Если угол поворота потока превышает критический, фронт отделяется от угловой точки «клина», точка A смещается вверх по потоку и образуется отсоединенная детонационная волна, фиксируемая в виде характерного «носика» на картине самосвечения (зона IV).

Модель Войцеховского объясняет причины образования излома, близкое равенство продольной и поперечной скоростей «головы» спина, стабильность шага спирали, образование во многих смесях характерного «носика» на картине самосвечения. В соответствии с этой моделью давление в поперечной детонационной волне спиновой структуры должно превышать максимальное возможное давление в модели Щёлкина — Зельдовича примерно в три раза.

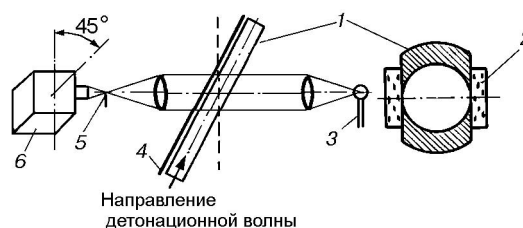


Рис. 6. Съемка спина методом Теплера:

1 — детонационная трубка, 2 — оптическое стекло, 3 — источник света, 4 — экран со щелью, 5 — нож, 6 — фоторегистратор

Справедливости ради, нужно отметить, что к идее поперечной волны Б. В. Войцеховский пришел самостоятельно, о работе А. Н. Воинова он узнал уже в процессе подготовки статьи [16] для опубликования в журнале.

Некоторое время модель Войцеховского подвергалась критике со стороны ряда исследователей по двум причинам. Во-первых, передний ударный фронт на снимках самосвечения не виден и в опытах Войцеховского [18, 19] он фиксировался с использованием в качестве индикатора давления слоя желатина, которым покрывали внутреннюю поверхность трубки. Опубликованные в этих работах снимки, откровенно говоря, были не очень убедительны. Во-вторых, Кирилл Иванович обратил внимание на то, что при наличии одной тройной точки невозможно согласовать течения за поперечной волной и за изломом.

Чтобы надежно обнаружить передний фронт и доказать, что поперечная волна распространяется по слою сжатого передней ударной волной газа, автор настоящей статьи предпринял в 1960–1962 гг. комплексные исследования «головы» спина методом Теплера и малогабаритными пьезодатчиками давления.

Для теплер-визуализации была изготовлена специальная секция детонационной трубки с плоскими стеклами (рис. 6). Отклонение поверхности от цилиндрической составляло менее 0.2 мм. Из-за невозможности использования заслонки ось детонационной трубки была наклонена к оптической оси теневой установки на угол $\approx 27^\circ$, чтобы избежать наложения явлений, происходящих на задней стороне трубки, на контур переднего фронта.

Сравнение теплеровской картины и фотографии самосвечения головы спина (рис. 7) четко показало [20], что, во-первых, перед

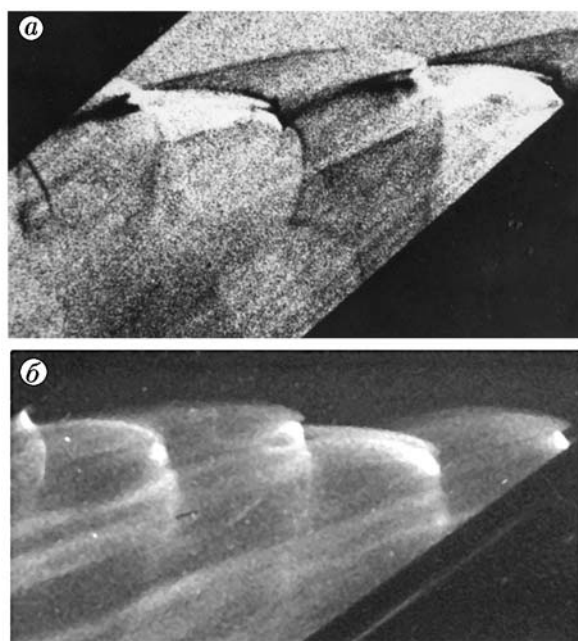


Рис. 7. Теплерограмма (а) и фоторегистрограмма (б) спиновой детонации в той же установке (из рис. 6)

поперечной волной действительно существует фронт предварительного сжатия и поперечная волна распространяется по слою сжатого несгоревшего газа; во-вторых, сопряжение течений за изломом переднего фронта и за поперечной волной происходит с помощью двух тройных точек. Теплеровские снимки дали возможность с хорошей точностью определить угол волны предварительного сжатия с потоком. Величина этого угла и скорость потока послужили исходными данными для расчета тройных конфигураций [20, 21].

Чтобы окончательно убедиться в правильности модели с поперечной волной и двумя тройными точками, для измерения поля давлений были применены малогабаритные датчики давления [20, 22]. Для подавления отражения на границе датчик — подложка датчики были снабжены цинковым акустическим волноводом. Такая общая конструкция (рис. 8) разработана С. Г. Зайцевым [23] для датчика диаметром около 13 мм. Для наших целей, чтобы уменьшить размеры, пришлось разработать специальную технологию изготовления. В итоге воспринимающая поверхность датчика была доведена до 1 мм в диаметре. В проходящей волне разрешение датчика по времени составляло около 0.6 мкс. Входные цепи усилите-

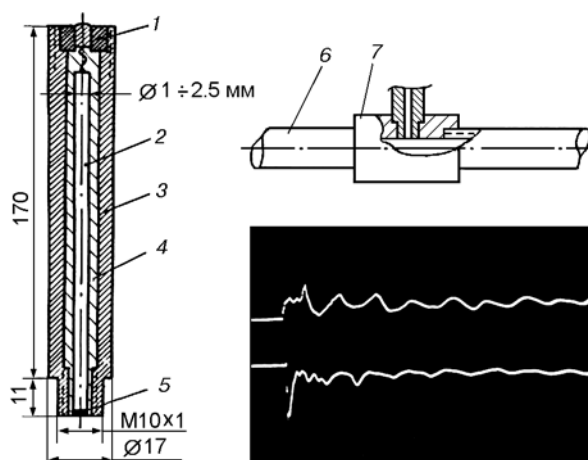


Рис. 8. Датчик давления и пример записи осциллограмм в одном сечении детонационной трубки на противоположных ее сторонах:

1, 7 — втулки из плексигласа, 2 — цинковый стержень, 3 — корпус (латунь), 4 — воск, 5 — пластинка титаната бария, 6 — металлическая труба

ля обеспечивали отсутствие заметного завала прямоугольного импульса за время измерения ($\approx 10^{-1}$ с).

Обычно одновременно использовались два датчика, их располагали в одном сечении напротив друг друга. Уже в первых сериях опытов было установлено, что датчики, размещенные на противоположных разных сторонах одного и того же сечения, «пишут» разные осциллограммы.

Секция инициирования была снабжена спиралью Щёлкина, которая задавала направление и фазу вращения при подходе волны к датчикам. Поворотом секции с датчиками относительно секции инициирования обеспечивалось различное их положение относительно спиновой конфигурации.

Осциллограммы показывают, что перед максимальными подъемами давления фиксируется фронт предварительного сжатия (рис. 9). Колебания давления в шлейфе спиновой детонации меняются непрерывно, и их амплитуда имеет один порядок величины со средним давлением за фронтом волны.

Точная привязка траекторий датчиков к картине самосвечения проводилась путем съемки «головы» спина через щель со специальными метками (рис. 10). Окончательно поле давлений было промерено в экспериментах с повышенной скоростью развертки [24].

Параметры течений за газодинамическими скачками в структуре «головы» спиновой детонации

| Скачок | Давление за скачком по отношению к p_0 | | Температура за скачком, К | Плотность по отношению к ρ_0 | Полная скорость потока за скачком, м/с | Число Маха за скачком | Угол скачка с образующей трубки | | Угол потока с фронтом перед скачком | Угол потока с фронтом за скачком |
|-------------|--|--------------|---------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | расчет | эксперимент | | | | | расчет | эксперимент | | |
| $AA_{1уд}$ | 60.8 | — | 2 660 | — | — | — | — | — | — | — |
| $AA_{1дет}$ | 54.5 | 52 ± 5 | 3 550 | 4.88 | 491 | 0.446 | $48^\circ 47'$ | $60 \pm 10^\circ$ | 87° | $75^\circ 40'$ |
| AA_2 | 19.25 | 19 ± 1 | 1 140 | 4.92 | 1 950 | 2.97 | — | $80 \pm 2^\circ$ | $35.5 \pm 1^\circ$ (эксп.) | $8^\circ 15'$ |
| AB | 54.5 | — | 1 500 | 10.48 | 1 720 | 2.31 | 39° | — | $32^\circ 32'$ | $15^\circ 50'$ |
| BD | 170 | 160 ± 10 | 2 020 | 23.76 | 1 290 | 1.50 | $86^\circ 30'$ | — | $47^\circ 30'$ | $28^\circ 55'$ |
| $BC_{уд}$ | 195 | — | 2 610 | — | — | — | — | — | — | — |
| $BC_{дет}$ | 170 | 155 ± 10 | 3 730 | 14.48 | 663 | 0.616 | $21^\circ 15'$ | $21 \pm 2^\circ$ | 87° | 84° |

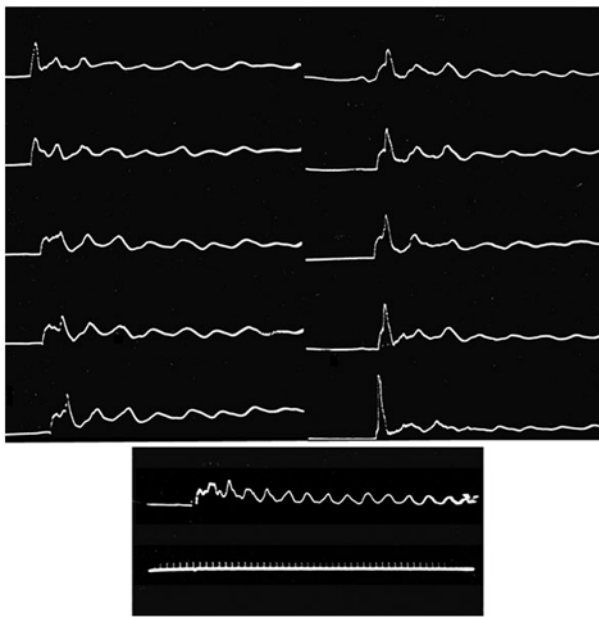


Рис. 9. Примеры осциллограмм и запись давления в шлейфе

Сопоставление «привязанных» осциллограмм с картиной течения полностью подтвердило гипотезу о существовании поперечной волны.

Таким образом, модель Щёлкина, дополненная поперечной волной Воинова — Войцеховского, приобрела стройность и законченность. Все дальнейшие исследования неизменно подтверждали правильность этой концепции. На ее основе построены современные мо-

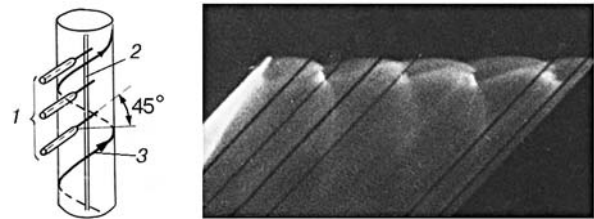


Рис. 10. «Привязка» траекторий датчиков давления:

1 — датчики, 2 — щель, 3 — направление движения «головы» спина

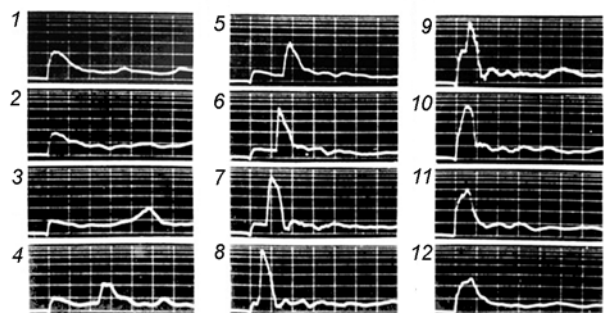
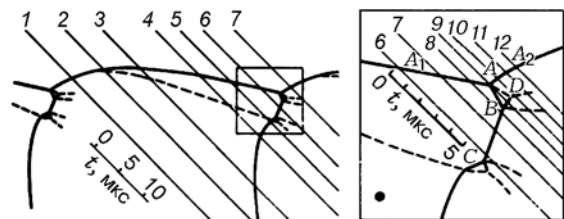


Рис. 11. Записи поля давлений при спиновой детонации

дели ячеистой структуры детонационных волн в газах и решаются задачи взрывобезопасности, в частности расчет энергии инициирования и возможности выхода детонации в открытое пространство.

В таблице приведены результаты расчета (смесь $2\text{CO} + \text{O}_2$, $p_0 = 0.1$ атм) и количественных измерений. Сравнение свидетельствует в пользу системы скачков, усложненной по сравнению с гипотезой К. И. Щелкина. Некоторое занижение экспериментальных данных для скачков BC и BD по сравнению с расчетом объясняется тем, что размер воспринимающей поверхности датчика (черный кружок на рис. 11) захватывал спад давления, пространственное разрешение датчика становилось недостаточным и он фиксировал давление, осредненное по воспринимающей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

- Щелкин К. И. Попытка расчета детонационного спина // ЖЭТФ. — 1934. — Т. 4, № 7. — С. 729–731.
- Campbell C., Woodhead D. W. The ignition of gases by an explosion wave. Part I. Carbon monoxide and hydrogen mixture // J. Chem. Soc. — 1926. — P. 3010–3021.
- Campbell C., Woodhead D. W. Striated photographic records of explosion waves // J. Chem. Soc. — 1927. — P. 1577–1581.
- Campbell C., Finch A. C. Striated photographic records of explosion waves. Part II. An explanation of the strice // J. Chem. Soc. — 1928. — P. 2094–2106.
- Bone W. A., Fraser R. P. Photographic investigation of flame movements in gaseous explosions // Phil. Trans. Roy. Soc. London. — 1931. — V. A 230. — P. 363–366.
- Bone W. A., Fraser R. P., Wheeler W. H. Photographic investigation of flame movements in gaseous explosions. Part VII. The phenomenon of spin in detonation // J. Chem. Soc. — 1935. — V. A 235. — P. 29–35.
- Manson N. Sur la structure des ondes explosives dites «helico'idales» dans les melanges gazeux // Compt. Rend. — 1946. — V. 222. — P. 46–50.
- Jouguet E. Mecanique des explosifs. — Paris, 1914.
- Щелкин К. И. К теории детонационного спина // Докл. АН СССР. — 1945. — Т. 47, № 7. — С. 501–503.
- Зельдович Я. Б. К теории детонационного спина // Докл. АН СССР. — 1946. — Т. 52, № 2. — С. 147–150.
- Щелкин К. И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. — М.: Оборонгиз, 1949.
- Ракипова Х. А., Трошин Я. К., Щелкин К. И. Измерение нормальных скоростей пламени ацетиленокислородных смесей // Журн. техн. физики. — 1947. — Т. 17, № 12. — С. 1397–1408.
- Ривин М. А., Соколик А. С. Взрывные пределы газовых смесей. 3. Пределы в смесях окиси углерода и метана // Журн. физ. химии. — 1936. — № 8. — С. 767–773.
- Ракипова Х. А., Трошин Я. К., Щелкин К. И. Спин у пределов детонации // Журн. техн. физики. — 1947. — Т. 17, № 12. — С. 1409–1410.
- Воинов А. Н. О механизме возникновения детонационного спина // Докл. АН СССР. — 1950. — Т. 73, № 1. — С. 125–128.
- Войцеховский Б. В. О спиновой детонации // Докл. АН СССР. — 1957. — Т. 114, № 4. — С. 717–720.
- Войцеховский Б. В. Исследования структуры фронта спиновой детонации // Тр. МФТИ. — М.: Оборонгиз, 1958. — Вып. 1.
- Войцеховский Б. В., Котов Б. Е. Оптические исследования фронта спиновой детонационной волны // Изв. СО АН СССР. — 1958. — № 4. — С. 74–80.
- Войцеховский Б. В. Детонационный спин и стационарная детонация // Сб. Ученого совета по народнохозяйственному использованию взрыва. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1960. — № 10.
- Топчиян М. Е. Структура одноголовой спиновой детонации: дис. . . . канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск: ИГиЛ, 1962.
- Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. О структуре течений в спиновой детонационной волне // ПМТФ. — 1962. — № 3. — С. 27–30.
- Топчиян М. Е. Экспериментальные исследования спиновой детонации датчиками давлений // ПМТФ. — 1962. — № 4. — С. 94–99.
- Зайцев С. Г. Об измерении быстроменяющихся давлений в газовой среде // ПТЭ. — 1958. — № 6. — С. 25–28.
- Митрофанов В. В., Субботин В. А., Топчиян М. Е. К измерению давлений в спиновой поперечной волне // ПМТФ. — 1963. — № 3. — С. 45–48.

Поступила в редакцию 9/XI 2011 г.