

А. Н. Дремин, О. К. Розанов

(Москва)

ОБ АНАЛОГИИ ДЕТОНАЦИИ ГАЗООБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Жидкие взрывчатые вещества в отличие от порошкообразных по своей однородности (гомогенности) близки к газам, чем, по-видимому, и определяется большое сходство в поведении детонационной волны в этих средах. В порошкообразных ВВ наблюдается значительное уменьшение скорости детонации при уменьшении диаметра заряда, достигающее половины идеального значения [1]. В жидких ВВ и в газах изменение скорости детонации от диаметра заряда даже вблизи предела ее распространения незначительна [2, 3].

Только в жидких ВВ и газах наблюдается явление затухания детонационной волны при переходе ее из узкой цилиндрической трубы в объем. Изучение этого явления [4—7] показало, что для данного ВВ величиной, определяющей возможность перехода детонационной волны из цилиндрической трубки в объем, является диаметр трубки. Диаметр цилиндрической трубки, при котором детонационная волна еще способна перейти в объем, назван критическим ($d_{кр}$) [6]. Он не зависит от материала оболочки цилиндрической трубки, и для данных условий (начального давления и температуры) является параметром вещества [4, 5]. Естественно, что каждому ВВ соответствует свой $d_{кр}$. Для жидких ВВ $d_{кр}$ зависит не только от реакционно-кинетических, но и их физических свойств [8, 9]. Сильная зависимость $d_{кр}$ от энергетических свойств ВВ особенно хорошо видна из следующего факта. При разбавлении любого ВВ (жидкого или газообразного) инертной добавкой количество энергии, выделяющееся в единице объема, уменьшается, а $d_{кр}$ при этом резко возрастает (рис. 1).

Одинаковое поведение детонационной волны в газах и жидких ВВ наблюдается также и при переходе ее из цилиндрической трубки в расширяющийся конус. Для данного диаметра трубки, меньше критического, существует угол раствора конуса α (угол между образующей конуса и осью цилиндра), выше которого детонационная волна при переходе из трубы в конус затухает. Эксперименты, проведенные в газах [3] и в жидких ВВ, показывают, что величина угла α также зависит от диаметра цилиндрической трубки и растет с ростом последнего.

Указанное сходство в распространении детонационной волны в газах и жидких ВВ можно объяснить с позиции единого механизма детонационного превращения в этих средах.

Рассмотрим, какие имеются основания для такого утверждения.

В ряде работ [10—13] показано, что при определенных условиях детонационная волна неустойчива. Первоначально этот вопрос рассмотрел К. И. Щелкин [10], который объяснил физическую природу неустойчивости плоской детонационной волны и дал критерий ее неустойчивости. Расчет критерия показывает, что практически во всех известных газовых смесях детонационная волна неустойчива. Определение критерия для жидких ВВ вследствие отсутствия необходимых данных затруднено. В настоящее время удалось рассчитать критерий только для одного жидкого ВВ — нитрометана, где детонационная волна также неустойчива. К. И. Щелкин предположил, что в веществе, сжатом ударной волной в период задержки τ_0 реакция не идет, а по его истечении проходит мгновенно. Таким образом, плоскость воспламенения и плоскость Чепмена — Жуге в данной модели совпадают. К. И. Щелкин показал, что возмущение плоскости воспламенения в виде изменения τ_0 (вследствие микронеоднородности состава смеси, флуктуаций плотности и т. д.) не затухает, а благодаря сильной зависимости скорости реакции от температуры увеличивается, достигая ударного фронта детонационной волны и искривляет его, создавая тем самым на переднем фронте косые ударные волны. Одним из прямых экспериментальных доказательств этого факта являются опыты по изучению отражения луча света постороннего источника от фронта ударных и детонационных волн. Показано, что в случае ударных волн [14—16] наблюдается регулярное отражение, в случае детонационных волн [15—16] наблюдается еще и рассеяние.

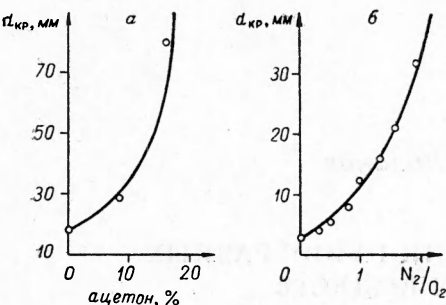


Рис. 1. Зависимость $d_{кр}$ от энергетических свойств ВВ.

а) концентрация азота в ацетилено-кислородной смеси [6]; б) концентрация ацетона в смеси с нитрометаном [5].

Наличие косых ударных волн на ударном фронте детонационной волны, естественно, приводит к образованию тройных ударных конфигураций (неоднородностей ударного фронта), которые будут перемещаться поперек фронта детонации. Давление и температура за косыми ударными волнами выше, чем за гладким ударным фронтом детонационной волны, и поэтому условия инициирования реакции за ними более благоприятны. Еще лучше условия инициирования реакций создаются в местах взаимодействия (соударения) тройных конфигураций. К настоящему времени для жидких ВВ недостаточно экспериментальных данных, чтобы однозначно ответить на вопрос при взаимодействии каких волн, составляющих тройную конфигурацию, создаются наиболее благоприятные условия для протекания реакции. Однако не вызывает сомнения, что задержка воспламенения в этих местах много меньше, чем за гладкой ударной волной [17, 18].

Наличие косых ударных волн на ударном фронте детонационной волны, естественно, приводит к образованию тройных ударных конфигураций (неоднородностей ударного фронта), которые будут перемещаться поперек фронта детонации. Давление и температура за косыми ударными волнами выше, чем за гладким ударным фронтом детонационной волны, и поэтому условия инициирования реакции за ними более благоприятны. Еще лучше условия инициирования реакций создаются в местах взаимодействия (соударения) тройных конфигураций. К настоящему времени для жидких ВВ недостаточно экспериментальных данных, чтобы однозначно ответить на вопрос при взаимодействии каких волн, составляющих тройную конфигурацию, создаются наиболее благоприятные условия для протекания реакции. Однако не вызывает сомнения, что задержка воспламенения в этих местах много меньше, чем за гладкой ударной волной [17, 18].

Реальным подтверждением этих выводов являются опыты по наблюдению свечения фронта детонационной волны через щель прибора СФР в торец заряда, которое удается фиксировать благодаря прозрачности газов и некоторых жидких ВВ. Обычно получающиеся при этом записи в жидких ВВ приводятся в работах [5, 19]. Эти записи, представляющие собой непрерывную временную регистрацию состояний фронта детонационной волны, имеют полосатую сетчатую структуру (см. рис. 3 и 4). Расстояние между полосами дает в среднем расстояние между неоднородностями по фронту (размер неоднородностей Δ).

Согласно [10], размер неоднородностей должен определяться временем реакции τ_0 в модели детонационной волны с гладким ударным фронтом. Действительно, пока возмущение от плоскости воспламенения достигает ударного фронта и образует косую ударную волну, само возмущение успевает разрастись поперек фронта на определенную величину. Поэтому, чем больше расстояние между ударным фронтом и плоскостью воспламенения, тем больше размер неоднородностей [20]. Если τ_0 мало, то и размер неоднородностей может быть настолько мал, что их не удастся разрешить при помощи известной аппаратуры для фоторегистрации детонационных процессов. Фиксируемое на пленке свечение детонационного фронта остается постоянным, равномерным (см. рис. 4, а). Очевидно, чем больше разрешающая способность прибора, тем более мелкие неоднородности он может сфотографировать.

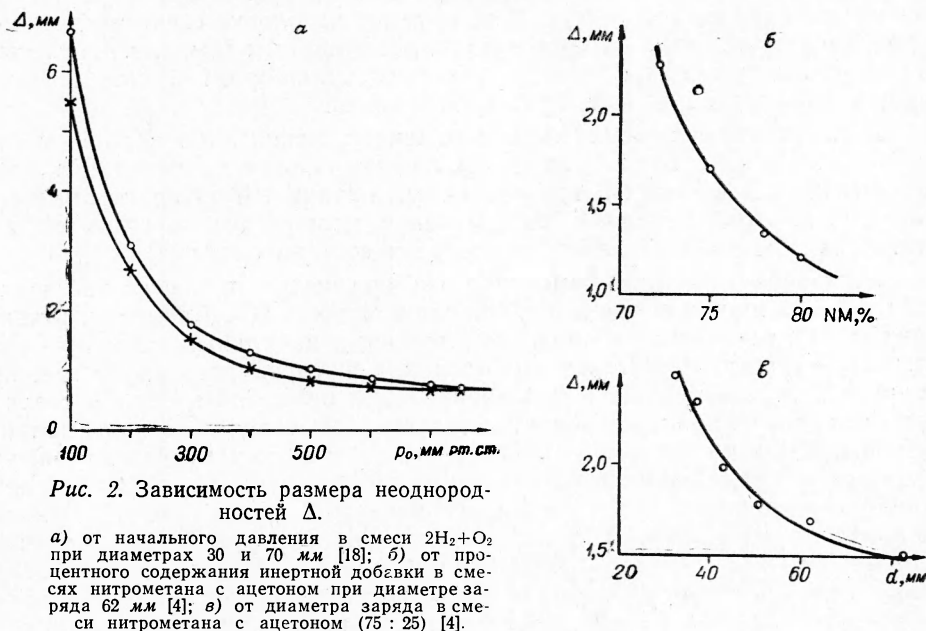
В газах время реакции можно изменять, меняя либо состав смеси, либо диаметр содержащей газ трубы, либо начальное давление [21]. Экспериментов с жидкими ВВ под различным начальным давлением известно мало. Поэтому в жидких ВВ изменение размера неоднородностей достигается обычно изменением диаметра и состава смеси [4].

В газовой детонации изменение размера неоднородностей наблюдается в более широких пределах, нежели в жидких ВВ. Давления, развивающиеся в газовой детонации при умеренных начальных давлениях настолько малы, что стеклянная оболочка, в которой детонирует газ, не разрушается. Потери выделяющейся в зоне реакции энергии в стенку трубы сравнительно малы. Они начинают сказываться только при ширине зоны реакции сравнимой с диаметром, поэтому неоднородности могут принимать любые размеры от равных диаметру трубы (при односторонней детонации, когда на фронте существует один излом) до мельчайших, не разрешимых с помощью обычной аппаратуры [21, 22]. В случае жидких ВВ под действием детонационных давлений (порядка 10^5 атм) сжимается практически любая оболочка; на это, так же как и на трение о стенку, затрачивается часть энергии детонационной волны. Потери эти настолько велики, что детонация прекращается задолго до достижения неоднородностями максимальных размеров.

На рис. 2 представлены графики зависимостей размера неоднородностей Δ . Нижний предел определяется разрешением используемой методики. Зависимость Δ от процентного содержания для жидкого ВВ наиболее крутая (рис. 2, б). Этот факт объясняется, по-видимому, тем, что в этом случае время реакции изменяется наиболее резко, так как детонационный режим в данной оболочке близок к критическому. При разбавлении ВВ инертной добавкой уменьшается скорость детонации [5], давление на ударном фронте детонационной волны падает. Это приводит к уменьшению температуры ударного сжатия ВВ и, следовательно, к увеличению τ_0 . Дальнейшее увеличение процентного содержания инертной добавки в смеси (свыше 30% на рис. 2, б) приводит к тому, что неоднородности на фронте детонационной волны при данном диаметре заряда укрупняются по мере прохождения волны по заряду, и детонация прекращается.

Еще более крутая зависимость Δ от состава получается при разбавлении нитроглицерина метиловым спиртом. В стальной трубе диаметром 82 мм, неоднородности отчетливо видны при соотношении исследуемой смеси 37 : 63. Но уже при соотношении 35 : 65 детонация нестационарна и затухает путем укрупнения неоднородностей. Экстраполяция приведенной на рис. 2, б зависимости к 100% дает размер неоднородностей Δ в чистом нитрометане порядка 0,3 мм.

В работе [23] показано, что если внутреннюю поверхность стеклянной трубки такого диаметра, при котором детонация в чистом нитрометане обычно не распространяется, покрыть тонкой (толщиной $\approx 0,05$ мм) металлической фольгой, детонация распространяется при значительно меньших диаметрах. Влияние очень тонкой фольги на детонацию свидетельствует о том, что очаги инициирования реакции, возникающие на фронте детонационной волны, играют основную роль в ее распространении. В чистом нитрометане эти очаги очень мелкие. Оценим их размер



на основе приведенного факта. Металлическая фольга, используемая в работе [23], имеет меньшую сжимаемость по сравнению со стеклом и поэтому у металлической стенки очаги инициирования развиваются легче. Под действием развивающегося при этом давления фольга начнет двигаться как целое после прохождения по ней ударной волны и возвращения волны разрежения. Это время порядка $2\delta/D_m$, где δ — толщина фольги, а D_m — скорость ударной волны в металле. Время развития очага $\leq \frac{\Delta}{2v}$, где v — скорость перемещения неоднородностей по фронту.

Для того, чтобы фольга была эффективной, необходимо выполнение условия $\frac{2\delta}{D_m} > \frac{\Delta}{2v}$. Оценка Δ из этого условия дает значение $\sim 0,2$ мм, что хорошо согласуется с вышеупомянутым значением.

В газах стационарная детонационная волна возможна при любом размере неоднородностей. Спиновая детонация является пределом стационарной газовой детонации, и после нее вообще невозможно самостоятельное распространение детонационной волны. В жидких ВВ аналогичное явление до сих пор не удавалось наблюдать. По-видимому, в абсолютно жесткой или приближающейся к ней оболочке жидкое ВВ можно было бы настолько разбавить инертной добавкой, что размер неоднородностей стал бы сравним с диаметром оболочки, т. е. можно было бы ожидать спиновую детонацию. В такой оболочке зависимость Δ от диаметра определялась бы только тепловыми потерями, а так как они малы, то Δ

определялась бы только реакционно-кинетическими свойствами смеси. В действительности для жидких ВВ любая оболочка не является абсолютно жесткой, поэтому Δ можно получить только при больших диаметрах, так как с ростом диаметра заряда относительная доля энергии детонационной волны, идущей на деформацию оболочки, уменьшается. Эксперимент показывает (см. рис. 2, *в*), что Δ стремится к постоянному значению задолго до достижения диаметром трубы значения $d_{кр}$ (из рис. 1, *б* следует, что для смеси нитрометана с ацетоном (75 : 25) $d_{кр} \approx 230$ мм).

Если детонационное превращение вещества обусловлено столкновением неоднородностей на ударном фронте детонационной волны, то распространение детонации должно определяться условиями, благоприятными или неблагоприятными для таких столкновений. Так, если по какой-либо причине одной из неоднородностей не с чем взаимодействовать, то реакция в этом месте ударного фронта не возникает. Это приведет к последовательной гибели центров инициирования и образованию области (волны) отсутствия реакции, распространяющейся со скоростью перемещения неоднородностей по ударному фронту детонационной волны [4, 5]. После гибели неоднородностей остается гладкая ударная волна, которая поддерживается продуктами детонации как поршнем. Она сжимает ВВ и инициирует в нем реакцию по прошествии времени τ_1 (задержки воспламенения), соответствующей температуре и давлению за этой волной.

Волны отсутствия реакции можно вызвать искусственно [4], но они возникают и самопроизвольно, когда внутренний диаметр оболочки приближается к предельному, т. е. к такому диаметру, при котором детонация в данной оболочке не идет. В этом случае, если волны отсутствия реакции перекрывают все поперечное сечение заряда, детонация прекращается. Если же они захватывают только часть поперечного сечения, то детонация проходит, не изменяя своей скорости [24]. Этим и объясняется незначительное уменьшение скорости детонации в газах и жидкостях от диаметра заряда, так как прежде чем потери в стенку начнут заметно сказываться, в строй вступает указанный механизм прекращения детонации.

Образование волны отсутствия реакции наблюдается всегда при переходе детонационной волны из узкой трубы в объем. При распространении детонационной волны в прочной оболочке (например, стальной) краевые неоднородности взаимодействуют со стенкой и образуют очаги инициирования реакции; при выходе ее в объем (в частном случае в широкую трубу) краевым неоднородностям на срезе трубы взаимодействовать не с чем, что и приведет к возникновению волны отсутствия реакции. Оказывается, что при диаметре узкой трубы меньше критического, реакция за гладкой ударной волной, оставшейся после гибели неоднородностей, не успевает развиться, ибо раньше эта волна уничтожается волнами разгрузки, идущими с периферии и от оси заряда [9]. Этим и объясняется происхождение критического диаметра при переходе детонационной волны из трубы в объем в газах и жидких ВВ [8, 9], где неоднородности имеют газодинамический характер, т. е. «вырабатываются» самой детонационной волной. Отсюда же вытекает зависимость $d_{кр}$ от энергетических свойств ВВ (см. рис. 1), так как их разбавление инертной добавкой приводит к быстрому росту как τ_0 , так и τ_1 .

На рис. 3 и 4 приводятся торцевые фоторазвертки процесса перехода детонационной волны из узкой цилиндрической трубы в широкую. На рис. 4, *а* показан процесс перехода детонационной волны из узкой трубы (диаметром больше $d_{кр}$) в широкую. В этом случае размер неоднород-

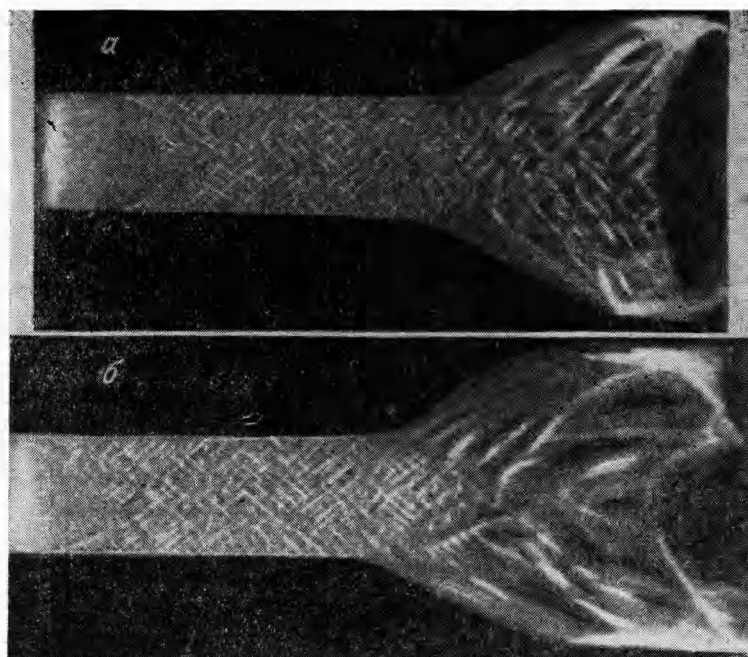


Рис. 3. Процесс перехода детонационной волны в смеси $C_2H_2+O_2$ из трубы с $d_1=50$ мм в трубу с $d_2=120$ мм.

а) детонация переходит в объем (начальное давление $p_0=26$ мм рт. ст.);
б) детонация затухает и переходит в горение ($p_0=20$ мм рт. ст.).

(Фото В. В. Митрофанова [24]).

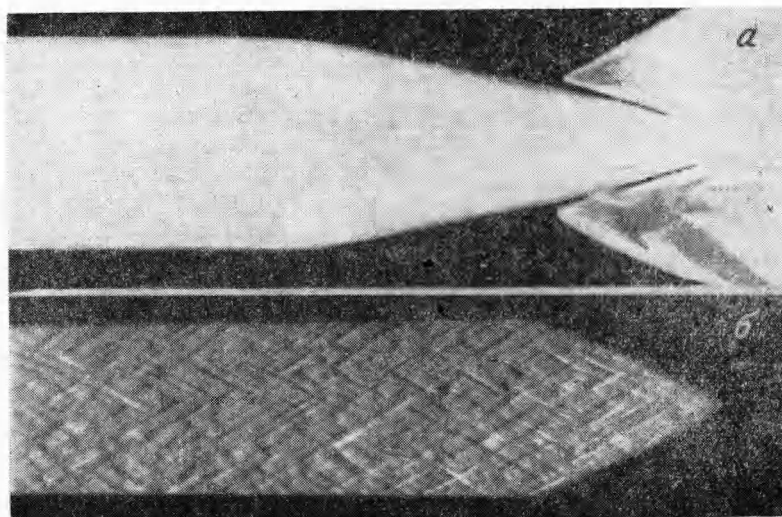


Рис. 4. Процесс перехода детонационной волны в смесях нитрометана с ацетоном.

а) детонация переходит в объем (84 : 16, $d_1=88$ мм, $d_2=180$ мм); б) детонация затухает ($d_2=110$ мм)

ностей сравнительно мал (см. рис. 2, б), поэтому их не удастся разрешить, и фиксируемое на пленке свечение детонационной волны постоянно. Рис. 4, б — смесь нитрометана с ацетоном (74 : 26), $d_1 = 44,5$ мм, что намного меньше значения $d_{кр}$ для этой смеси.

Как видно из приводимых фотографий, волны отсутствия реакции возникают сразу же при действии детонационной волны на срез узкой трубы. Когда диаметр узкой трубы меньше $d_{кр}$, детонация прекращается (рис. 3, б и 4, б). В случае газов она переходит в горение. В противном случае, после гибели части периферийных неоднородностей, она возникает вновь и распространяется на весь объем.

Скорость затухания детонационной волны (скорость волны отсутствия реакции) должна совпадать со скоростью неоднородностей по фронту детонационной волны. Некоторое несовпадение наклона отдельных полос, характеризующего скорость неоднородностей по фронту, со скоростью затухания детонационной волны объясняется хаотическим процессом перемещения неоднородностей. Отдельные неоднородности могут пересекать щель фоторегистра под некоторым углом, при этом кажущаяся скорость неоднородностей превосходит скорость волны отсутствия реакции.

Процесс перехода детонационной волны из трубы в объем происходит аналогичным образом в чистом нитрометане, расплавленном тротиле, смесях нитроглицерина с метиловым спиртом, азотной кислоты с дихлорэтаном и в тетранитрометане.

При переходе детонационной волны из трубы в конус меняются условия соударения краевых неоднородностей со стенкой. Точная картина взаимодействия пока не ясна. Опыты, проведенные в жидких ВВ и в газах, показывают, что сначала размер неоднородностей, находящихся вблизи стенок конуса, увеличивается. Затем, когда, по-видимому, вся детонационная волна искривляется — становится не плоской, как в трубе, а выпуклой — размер неоднородностей становится постоянным. Если угол раствора конуса сделать достаточно большим, то детонация в конусе затухает, как при переходе из трубы в объем. Экспериментально для жидких ВВ найдено, что максимальный угол раствора конуса $\alpha_{\max}$, при котором детонация распространяется в конусе, определяется следующим образом:

$$\arcsin \alpha_{\max} = \frac{r}{d_{кр}},$$

где r — радиус цилиндрической трубки, переходящей затем в конус; $d_{кр}$ — критический диаметр исследуемого ВВ. Из этой формулы следует, что при $\alpha > 30^\circ$ будет осуществляться режим, подобный переходу детонационной волны из трубы в объем. Данные по распространению газовой детонации в конусах [3] также дают хорошее согласие с указанной формулой.

Все изложенные выше экспериментальные факты и их объяснение с единой позиции свидетельствуют о глубокой аналогии в механизме детонации жидких и газообразных ВВ. По-видимому, все однородные ВВ — газы, жидкости и монокристаллы — детонируют по единому механизму.

В монокристаллах ВВ неоднородности на детонационном фронте до сего времени не наблюдались. Очевидно, при детонации монокристаллов ВВ давление и температура очень высокие, так что соответствующие этим условиям неоднородности в свечении детонационного фронта столь мелкие, что их трудно разрешить современными фотографически-

ми методами. Однако волны отсутствия реакции были обнаружены в монокристаллах тэна [25].

Известно, что монокристаллы содержат значительное количество дефектов кристаллической структуры, чем и обуславливается их пониженная прочность. Казалось бы, можно ожидать, что при разрушении кристаллов реакция будет возникать на этих дефектах, как на местах, где могут образовываться так называемые «горячие точки». Однако при распространении детонационной волны вещество монокристалла нагружается во фронте столь быстро, что дефекты не успевают срабатывать. Это происходит потому, что дефекты могут перемещаться в кристалле (а именно перемещение дефектов определяет реальную прочность кристаллов) со скоростями заведомо меньше скорости звука, в то время как скорость нагружения (скорость детонации) сверхзвуковая. В этих условиях проявляется идеальная прочность кристалла [26, 27], т. е. прочность кристалла с идеальной решеткой. Поэтому можно считать, что вещество монокристалла претерпевает объемное сжатие, как жидкость, так как предел прочности монокристаллов ВВ много меньше давления во фронте детонационной волны.

Авторы благодарят В. В. Митрофанова за любезно предоставленные им фотографии опытов.

Поступила в редакцию
2/II 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Н. Стесик, Л. Н. Акимов. ЖФХ, 1959, 33, 8.
2. А. Ф. Беляев, В. М. Карасев, А. Н. Азбукина.— Сб. «Физика взрыва», 1952, 5.
3. С. М. Когарко. Изв. АН СССР, ОХН, 1956, 4, 419.
4. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1963, 1.
5. A. N. Dremín, O. K. Rozanov, V. S. Trofimov. Comb. and Flame, 1963, 7, 2, 153.
6. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Симонов. ЖФТ, 1956, 26, 8, 1744.
7. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963, стр. 101.
8. А. Н. Дремин. Докл. АН СССР, 1962, 147, 4, 870.
9. А. Н. Дремин, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1964, 1, 126.
10. К. И. Шелкин. ЖЭТФ, 1959, 36, 2, 600.
11. Р. М. Зайдель. Докл. АН СССР, 1961, 136, 5, 167.
12. В. В. Пухначев. ПМТФ, 1963; Докл. АН СССР, 1963, 149, 4.
13. J. J. Egreñbeck. Phys. Fluids, 1962, 5, 604.
14. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер, М. В. Синицын, К. Б. Юшко. Докл. АН СССР, 1961, 138, 6.
15. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1963, 4, 101.
16. M. L. N. Sastri, L. M. Schwartz, B. E. Myers, D. S. Hornig. IX Symp. on Comb., New York—London, Acad. Press, 1963, 470.
17. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. ПМТФ, 1960, 1, 21.
18. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. Изд-во АН СССР, 1963.
19. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1961, 139, 1, 137.
20. Б. П. Волин, Я. К. Трошин, Г. И. Филатов, К. И. Шелкин. ПМТФ, 1960, 2, 78.
21. Я. К. Трошин, К. И. Шелкин. Изв. АН СССР, ОТН, 1951, 8, 142.
22. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. ЖТФ, 1960, 30, 4, 450.
23. A. W. Campbell, T. E. Holland, M. E. Malin, T. P. Cotter. Nature, 1956, 178, 38.
24. А. Н. Демин, Г. А. Ададунов, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1960, 133, 6, 1372; см. также. Докл. АН СССР, 1964, 159, 5.
25. T. E. Holland, A. W. Campbell, M. E. Malin. J. Appl. Phys., 1957, 28, 1217.
26. Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин, С. В. Першин, В. Н. Родионов, Ю. Н. Рябинин. ПМТФ, 1962, 4, 81.
27. J. Wackerle. J. Appl. Phys., 1962, 33, 922.