

**ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА
В ЖИДКИХ ВВ**

А. Н. Дремин, С. Д. Савров
(Москва)

С установлением одномерной структуры зоны детонационной волны в некоторых газовых смесях [1, 2] и в некоторых жидких ВВ [3] было обнаружено, что с увеличением тепловыделения размер неоднородностей быстро уменьшается и становится неразрешимым обычными методами. При этом нельзя установить, остается ли фронт неустойчивым с малым размером неоднородностей или он становится устойчивым.

В ряде теоретических работ, посвященных определению пределов неустойчивости фронта детонации в газах [4—6], показано, что практически во всех газовых смесях фронт детонации должен быть устойчивым. Следует, однако, отметить, что эти выводы носят качественный характер. Кроме того, для расчетов требуется значение уравнения состояния исходного ВВ, уравнения состояния продуктов взрыва и формальной кинетики. Зачастую таких данных для условий детонации нет даже для газов (например, для газовых смесей при высоких начальных давлениях и температурах). Для жидких ВВ такие данные полностью отсутствуют. Поэтому экспериментальное обнаружение неустойчивости детонационного фронта в конкретных ВВ из-за меньшей трудоемкости и однозначности ответа является предпочтительным.

В жидких ВВ в отличие от газов имеется возможность выявления неоднородной структуры детонационного фронта при помощи метода отражения света. Эта возможность появляется в связи с наличием большого скачка плотности ВВ на фронте детонационной волны, приводящего к заметной величине коэффициента отражения. Необходимым условием применения этой методики является также предположение о наличии резкого ударного перехода в каждом участке фронта детонационной волны, независимо от его формы.

В настоящей работе проведено исследование неустойчивости фронта детонации в индивидуальных жидких ВВ. Идея опытов заключается в построении изображения яркого объекта (источника света с диафрагмой) в поверхности фронта детонационной волны.

В случае устойчивости поверхность фронта будет гладкой, что дает возможность построения в ней четкого зеркального изображения; в случае неустойчивости изображение будет размыто. При постановке опытов становится важным вопрос об угловых размерах источника. При построении изображения источника в зеркальной поверхности (например, ударной волны в жидкости) яркость изображения не зависит от угловых размеров источника и является максимально возможной при заданном коэффициенте преломления во фронте ударной волны. Однако даже в этом случае за короткое время эксперимента характерное

для детонации изображение удается зарегистрировать, применяя только мощные взрывные источники света [7].

Наличие негладкого ударного фронта, соответствующего неустойчивому фронту детонации жидких ВВ, должно привести к нерегулярному отражению света, которое приведет к размытию изображения и уменьшит его интенсивность.

Степень нерегулярности отражения света удобно характеризовать углом раствора диаграммы отражения, в котором отражается падающий параллельный пучок. Очевидно, что при угловых размерах источника, больших угла диаграммы, интенсивность отраженного света будет близка к максимально возможной для данной поверхности и имеющейся яркости источника.

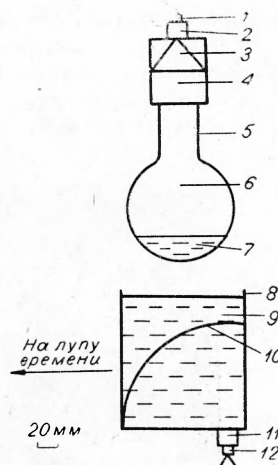
При уменьшении угловых размеров источника, чего можно добиться, например, его удалением, яркость «изображения» будет быстро убывать. Отсюда, в частности, следует, что использование в опытах пучков света, близких к параллельным, неэффективно.

В настоящих опытах использовался источник с угловыми размерами, близкими к углу диаграммы отражения, что позволяло регистрировать изображение, и в то же время по размытию его краев исследовать неустойчивость фронта детонации.

Величина размытия краев Δ определенным образом связана с углом диаграммы β и с расстоянием от источника до поверхности R . Угол диаграммы, в свою очередь, определяется основными углами наклонов α участков неоднородностей к плоскости фронта детонации ($\beta = 4\alpha$). Для плоской детонационной волны эта связь выражается в виде $\Delta = 2\alpha \cdot R$ [8], для сферы и цилиндра — $\Delta = 2\alpha \frac{R \cdot 2}{R + 2}$, где r — радиус кривизны поверхности. Таким образом, по величине размытия можно выявить основные углы наклона неоднородностей фронта детонации. Отсюда также следует, что при приближении источника к поверхности детонации величина размытия краев изображения уменьшается и стремится к нулю, т. е. изображение источника даже в негладкой поверхности детонации стремится к зеркальному. Отметим, что эти выкладки справедливы для небольших углов диаграммы отражения.

Следует учитывать также необходимость использования в опытах источников света с возможно более широким раствором пучка света, так как только в этом случае размытие краев изображения будет определяться углом диаграммы отражения поверхности детонационного фронта.

Рис. 1. Схема опытов со сферической детонационной волной. 1, 12 — капсули, 2, 11 — усиительные заряды; 3 — взрывная линза; 4 — таблетка из гексогена; 5 — стеклянная колба; 6 — аргон; 7 — вода; 8 — коробка из стекла; 9 — ВВ; 10 — фронт детонации.



Все опыты были проведены в условиях распространения детонации вдали от критических размеров, чтобы исключить влияние стенок на неустойчивость фронта. Первая серия опытов была проведена по наблюдению изображения источника света в сферической детонационной волне в нитрометане (НМ) (рис. 1). Вода в колбе выполняла роль уве-

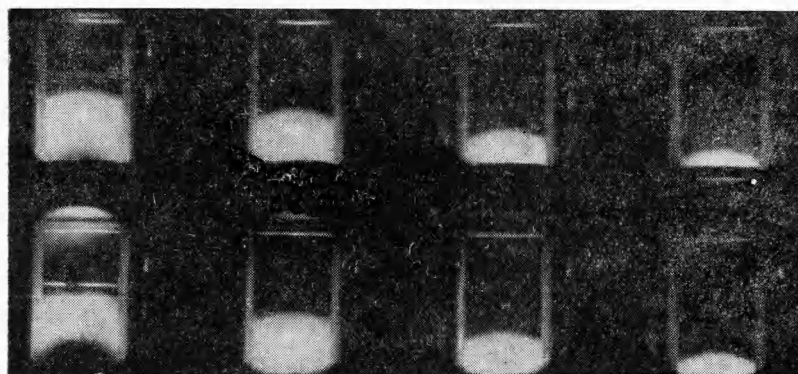


Рис. 2. Изображение фигурного источника света в поверхности сферической дотонации в нитрометане. Время между снимками 4 $\mu\text{сек}$.

личительной линзы. Поверхность сферы освещалась источником полностью, что было проверено в специальных опытах с искусственной матовой сферой.

В экспериментах с НМ было обнаружено, что источник изображается в сфере в виде небольшого круглого пятна, что свидетельствовало об узости диаграммы отражения. Для того, чтобы доказать, что узкая диаграмма отражения имеет конечный угол раствора, т. е., что поверхность детонации в НМ не является зеркальной, были проделаны следующие опыты.

Вблизи источника располагалась фигурная диафрагма из фольги в виде крестика или ромба. В этом случае изображение по-прежнему имело вид размытого круглого пятна (рис. 2). В контрольных опытах с заведомо зеркальной сферической ударной волной в воде фигурная диафрагма изображается отчетливо (рис. 3). Это подтверждает вывод работы [9] о наличии нерегулярного отражения света от поверхности фронта детонации в нитрометане.

Поскольку покадровая съемка дает небольшой размер изображения объекта, для количественного выявления угла диаграммы отражения была применена схема опытов (рис. 4) с регистрацией отражения на щели СФР, что дает большее увеличение. В этой схеме использовалась

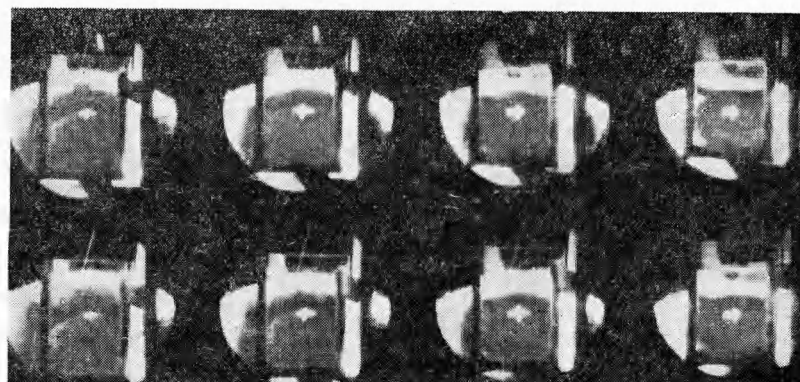


Рис. 3. Изображение фигурного источника в поверхности сферической ударной волны.

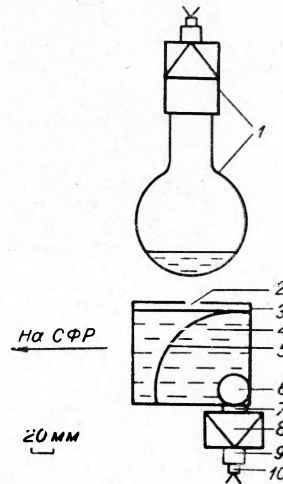
детонационная волна цилиндрической формы, которая создавалась одновременным подрывом столбика ВВ, инициирующего детонацию в нитрометане. Цилиндрическая форма, как и сферическая, позволяет непрерывно регистрировать отражение света от разных углов поверхности детонации и этим надежней выявлять характер диаграммы отражения.

В качестве диафрагмы использовалась щель, вырезанная в фольге. Изображение этой диафрагмы регистрируется узким и размытым, так же как и в опытах со сферой. Другим доказательством нерегулярности отражения может служить наблюдение уменьшения интенсивности отраженного света с уменьшением угловых размеров источника. На рис. 5 приведена фоторазвертка опыта с двумя диафрагмами 2 и 12 мм. Меньшая диафрагма на поверхности детонационного фронта не изображается, так как ее угловой размер оказался меньше угла диаграммы отражения и вследствие этого интенсивность резко упала.

Поверх нитрометана была налита вода; при

Рис. 4. Схема опытов с цилиндрической детонационной волной.

1 — источник света; 2 — диафрагма; 3 — коробка из стекла; 4 — ВВ; 5 — фронт детонации; 6 — столбик из ВВ; 7 — прокладка из плекса; 8 — линза; 9 — усильтельный заряд; 10 — капсуль.



выходе детонационной волны в ней возникала зеркальная ударная волна, в которой обе диафрагмы изображаются четко. Оценка угла диаграммы по величине размытия краев изображения дала для него значение $0,2 \text{ рад}$. Отсюда основные углы неоднородностей на поверхности детонационного фронта в нитрометане составляют $0,05 \text{ рад}$. Отметим, что эти основные углы нельзя идентифицировать с углами, участвующими при столкновении неоднородностей, пока не известна их детальная форма.

Следующая серия опытов была проведена по схеме (см. рис. 6), позволяющей исследовать отражение света от плоских детонационных волн и удобной при изучении нестационарных процессов, например, при пересжатии, при инициировании и т. д. При этом она менее пригодна для количественной оценки угла диаграммы, чем предыдущие. Иницирование детонации в нормальном режиме производилось тротилом с $\rho_0 = 1,4 \text{ г/см}^3$, $D = 6,2 \text{ км/сек}$.

На рис. 7 приведена фоторазвертка опыта с нитратом глицидного спирта ($\rho_0 = 1,32 \text{ г/см}^3$, $D = 6,7 \text{ км/сек}$), свидетельствующая о неустойчивости в нем фронта нормальной детонации. Аналогичная картина наблюдается в нитрометане.

Следующие опыты были проведены по наблюдению отражения света от детонационных волн в режиме пересжатия. Было обнаружено, что при инициировании детонации в нитрометане зарядом из гексогена

большой плотности $\left(\frac{(\rho_0 D)_{\text{ГЭКС}}}{(\rho_0 D)_{\text{НМ}}} = 2,2 \right)$ отражение света становится зер-

кальным. По мере разлета активного заряда детонационная волна выходит из режима пересжатия, и детонационный фронт становится шероховатым. В опытах со смесью нитрометана с небольшим количеством ацетона при тех же параметрах активной системы зеркального фронта детонации получить не удается.

В опытах со стехиометрической смесью азотной кислоты с дихлорэтаном (КД), наоборот, фронт становится гладким при сравнительно небольшом пересжати зарядом из ТГ ($\frac{(\rho_0 D)_{\text{ТГ}}}{(\rho_0 D)_{\text{КД}}} = 1,5$) (см. рис. 8). Для того, чтобы за время детонации исследуемого вещества пересжатие успело исчезнуть, активный заряд брался длиной 20—30 мм. В рабо-

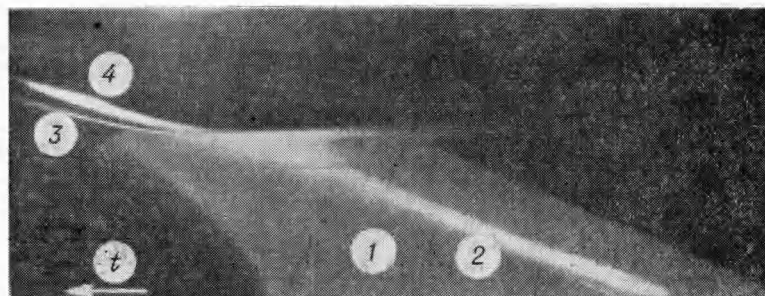


Рис. 5. Развертка во времени изображения источника света с двумя диафрагмами от цилиндрической волны.

1 — свечение детонации; 2 — изображение широкой диафрагмы в поверхности детонационного фронта; 3, 4 — изображение обеих диафрагм в поверхности ударной волны в воде.

те [8] в аналогичных опытах активный заряд применялся много больших размеров (диаметр 120 мм, длина 220 мм). При этом было обнаружено зеркальное отражение от детонационного фронта на всей длине исследуемого образца и на этом основании сделан ошибочный вывод об устойчивости фронта нормальной детонации в стехиометрической смеси азотной кислоты с дихлорэтаном. В действительности в этих опытах из-за больших размеров инициирующего заряда возникшая пересжатая детонация на высоте исследуемого образца (20 мм) не успевала перейти в нормальный режим. Следует отметить, что при пересжатой детонационной волне одновременно с зеркальным отражением наблюдается рассеяние света (см. рис. 8). По-видимому, это рассеивается свет, прошедший через ударный фронт детонационной волны.

В последующих опытах по наблюдению отражения света от нормальной детонации было обнаружено, что в тетранитрометане ($\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$, $D = 6,4 \text{ км/сек}$) и его смеси с бензолом (85 : 15), имеющей большее тепловыделение из-за положительности кислородного баланса в тетранитрометане ($D = 7,0 \text{ км/сек}$), на фронте детонации наблюдается зеркальное изображение диафрагмы, что свидетельствует об его устойчивости (см. рис. 9). Сильное разбавление тетранитрометана бензолом в отношении 40 : 60 ($D = 5,35 \text{ км/сек}$) приводит к нерегулярному отражению света, что свидетельствует о неустойчивости фронта.

Устойчивость фронта нормальной детонации была обнаружена также в динитрате и тринитратах глицерина. Известно [10] в то же время, что при разбавлении этих ВВ инертным растворителем фронт становится неустойчивым, так что неоднородности на нем удается регистрировать непосредственно фоторегистром. При наблюдении отражения света от устойчивого фронта детонации было отмечено, что если исследуемое ВВ было мутным из-за недостаточной очистки, то одновременно с зеркальным отражением от фронта наблюдается и рассеяние света в зоне детонации. Если же употреблялось полностью прозрачное ВВ — рассеяние в зоне исчезало. Наблюдаемое явление, в сопоставлении с опытами по пересжатию, свидетельствует о том, что в обоих случаях в

зоне детонации имеются нестационарные процессы, приводящие к рассеянию света.

В первом случае эти процессы вызваны одновременным возникновением реакции за счет неоднородности поступающего в зону вещества. В случае пересжатия, по-видимому, наблюдается неустойчивость зоны детонации, не приводящая, однако, в условиях пересжатия к неустойчивости переднего ударного фронта.

Наблюдаемая устойчивость фронта нормальной детонации в некоторых жидких ВВ, а также устойчивость фронта при пересжатии требуют своего объяснения.

При рассмотрении вопроса о влиянии пересжатия на устойчивость фронта детонации можно пользоваться качественным критерием Щелкина, по которому устойчивость может быть достигнута при достаточно большой степени пересжатия. В работе [11] достижение этих условий иллюстрируется простыми соображениями: с увеличением

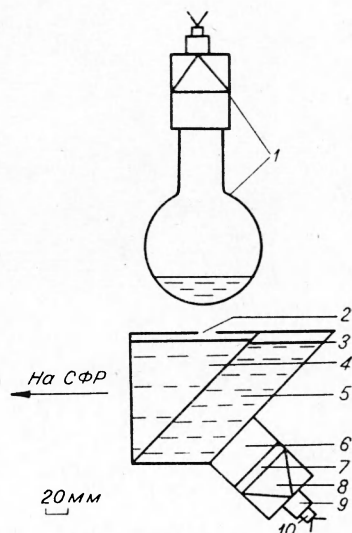


Рис. 6. Схема опытов с плоской детонационной волной.

1 — источник света; 2 — диафрагма; 3 — сосуд из плекса; 4 — вода; 5 — ВВ; 6 — инициирующий заряд; 7 — плексовая пластина; 8 — взрывная линза; 9 — цилиндрический заряд; 10 — капсуля.

пересжатия детонационная волна по своим свойствам приближается к ударной, так как выделяющаяся химическая энергия составляет все меньшую долю от полной внутренней энергии вещества за фронтом; ударная же волна без химической реакции устойчива. При пересжатии конденсированных ВВ в настоящих опытах превышения скорости детонации составляют не более 10%, так что, по-видимому, в этом случае приведенное объяснение не применимо.

При рассмотрении предела неустойчивости фронта нормальной детонации с помощью критерия Щелкина, несмотря на невозможность расчетов, можно сделать косвенное заключение о том, что, поскольку практически во всех случаях газовой детонации фронт должен быть неустойчивым [12], аналогичный вывод следовало бы сделать и для жидких ВВ. Действительно, в обоих случаях энергии активации, по-видимому, близки по значениям, а предположение о наличии значительно больших температур ударно сжатых ВВ в конденсированной среде маловероятно. Другой причиной, приводящей к устойчивости фронта детонации, могут быть релаксационные явления в ударном фронте детонационной волны. В том случае, если времена реакции станут настолько малы, что период индукции будет определяться временем возбуждения колебательных степеней свободы в молекулах, время реакции перестает зависеть от температуры, что должно приводить, согласно Щелкину, к устойчивости фронта детонации.

Для индивидуальных жидких ВВ точных данных о временах реакции в детонационной волне нет. Имеется только упоминание о том, что время реакции в нитрометане не больше 0,1 мсек [13]. О временах релаксации в ударно сжатом конденсированном веществе также нет надежных сведений, однако можно сделать косвенное заключение о том, что

эти времена для нитрометана, по крайней мере, на порядок меньше времени реакции, т. е. 10^{-8} сек, так как в нитрометане наблюдается неустойчивый фронт детонации. Таким образом, можно предполагать, что устойчивость фронта детонации по этому механизму может возникнуть при временах реакции в зоне, не превышающих 10^{-8} сек.

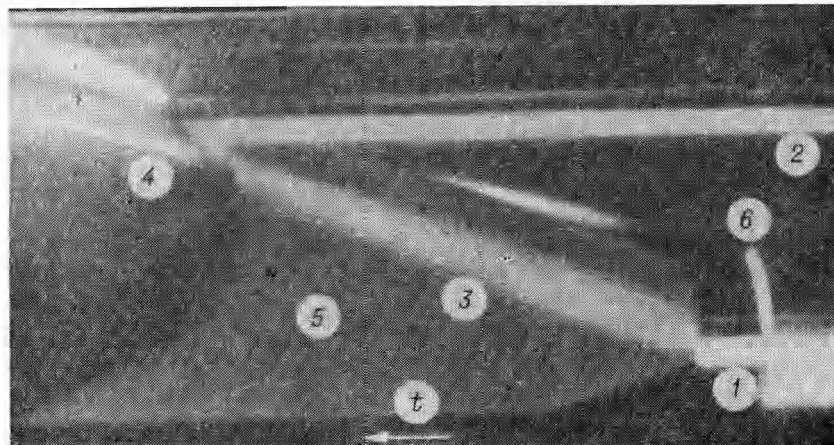


Рис. 7. Развертка во времени опыта с нитратом глицидного спирта.

1, 2 — изображение источника в поверхности раздела стекло — ВВ и стекло — вода; 3 — изображение источника в поверхности детонационного фронта; 4 — изображение источника в ударной волне в воде; 5 — свечение фронта детонации; 6 — вспышка воздушного зазора между инициирующим зарядом и коробкой.

Установление пределов неустойчивости помимо критерия Шелкина можно провести на основе рассмотрения протекания реакции за детонационным фронтом с позиции теплового взрыва.

За ударным фронтом вещество практически мгновенно попадает в условия высокой температуры T_0 , при которой и начинает развиваться реакция.

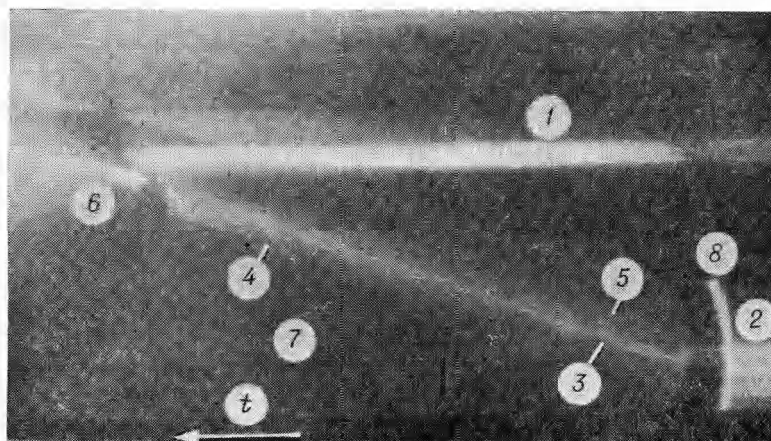


Рис. 8. Развертка во времени опыта со смесью дихлорэтана с азотной кислотой.

1, 2 — изображение источника в поверхности раздела стекло — ВВ и стекло — вода; 3 — зеркальное изображение источника в поверхности пересечной детонационной волны; 4 — незеркальное изображение источника в поверхности пересечной детонационной волны; 5 — рассеяние света в зоне детонации; 6 — изображение источника в ударной волне в воде; 7 — свечение фронта детонации; 8 — вспышка воздушного зазора.

Условно будем считать за период индукции время τ , в течение которого прореагирует некоторая малая часть исходного вещества. Остальное время полного его разложения будем считать за время развития реакции Δt . Характер развития теплового взрыва нормальный, если

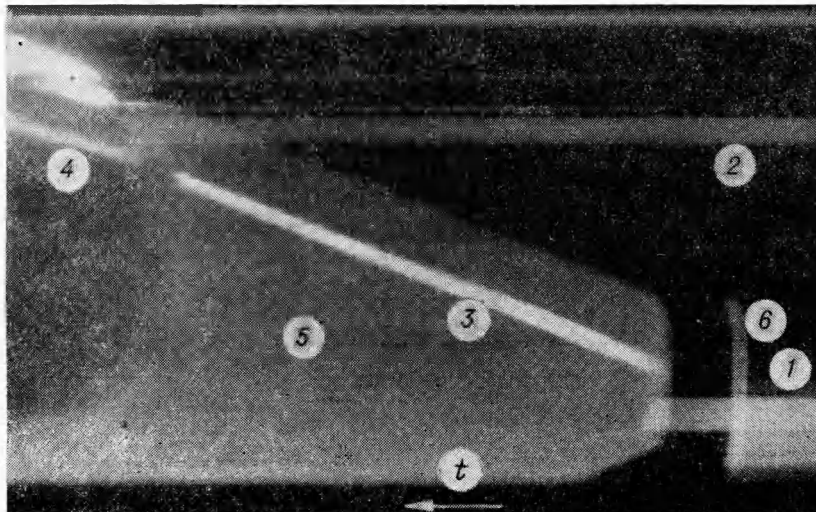


Рис. 9. Развертка во времени опыта со смесью тетранитрометана с бензолом в отношении 85 : 15. (Обозначения см. на рис. 7.)

отношение $\frac{\Delta t}{\tau} \ll 1$, в противном случае возникает так называемый вырожденный тепловой взрыв. Согласно теории [14], характер теплового взрыва определяется двумя параметрами: $\beta = \frac{RT_0}{E}$, $\gamma = \frac{c}{Q} \frac{RT_0^2}{E}$, где E — энергия активации, c — теплоемкость, $\text{кал/г} \cdot \text{град}$, Q — тепловыделение на единицу массы.

Нормальный тепловой взрыв имеет место в случае, когда одновременно $\beta \ll 1$ и $\gamma \ll 1$. Чем в большей степени не соблюдаются эти неравенства, тем больше вырождается тепловой взрыв.

При выводе критерия Шелкин [4] предполагал, что реакция в детонационной волне протекает по нормальному тепловому взрыву. Если же не делать этого ограничения и допустить возможность протекания реакции в детонационной волне по законам вырожденного теплового взрыва, то очевидно, что применимые для прямоугольного профиля волны рассуждения относительно роста случайных возмущений в плоскости воспламенения детонационной волны в этом случае становятся необоснованными. Действительно, если реакция в детонационной волне протекает по законам вырожденного теплового взрыва, фронт сгорания уже нельзя рассматривать как поверхность разрыва, искривляющуюся за счет адиабатических распадков на случайных изменениях периода индукции; случайные изменения периода индукции не приведут к существенному изменению расстояния от фронта до продуктов детонации, т. е. в этом случае гладкий устойчивый фронт детонационной волны — более вероятное явление.

Из приведенных рассуждений не следует, что при любой степени вырождения теплового взрыва фронт детонационной волны будет устойчивым. По-видимому, существуют пока неизвестные критические значе-

ния параметров β и γ , выше которых фронт детонационной волны устойчив.

Критические значения этих параметров не известны, однако приведенные соображения позволяют дать качественное объяснение во всех конкретных экспериментах. Например, пересжатие детонационной волны, в нормальном режиме с неустойчивым фронтом, приводит к увеличению скорости детонации и соответствующему росту температуры T_0 на ударном фронте детонационной волны. Вследствие этого растут параметры β и γ . Если значения этих параметров превысят критические, фронт детонационной волны будет гладким. Вырождение теплового взрыва здесь достигается в основном за счет резкого сокращения периода индукции.

Аналогично объясняется устойчивость фронта нормальной детонации в относительно мощных ВВ (с той же энергией активации, что и у слабых ВВ с неустойчивым фронтом), например, динитрате и тринитрате глицерина. В этом случае даже в нормальном режиме скорость детонации оказывается достаточно высока для такого разогрева ударно сжатого ВВ в зоне, который достигается для более слабого ВВ только пересжатием.

Однако, в принципе, и в мощных ВВ фронт детонации может быть неустойчивым при большей энергии активации.

Устойчивость фронта может быть достигнута также уменьшением энергии активации, которая является очень чувствительным параметром степени вырождения [15]. По-видимому, этому случаю соответствует устойчивость фронта в тетранитрометане, энергия активации которого мала. Поскольку энергия активации ВВ определяется в его парах, возможно, что в условиях ударно сжатого ВВ энергия активации может существенно измениться, при этом можно предположить, что и в этих условиях энергия активации тетранитрометана меньше, чем, например, у нитрометана.

Разбавление ВВ небольшим количеством инертной добавки мало изменяет его кинетические свойства, но приводит к падению скорости детонации за счет уменьшения тепловыделения и к соответствующему падению температуры T_0 ударно сжатого ВВ, которая входит в параметр γ в квадрате. Очевидно, таким образом можно получить значения параметров β и γ меньше критических, так что фронт детонационной волны будет неустойчивым. Приближение к нормальному тепловому взрыву достигается здесь в основном за счет резкого увеличения периода индукции.

Приведенные выше соображения об устойчивости фронта в результате протекания реакции по законам вырожденного теплового взрыва предполагают профиль давления в зоне реакции без четко выраженного периода индукции (близким к треугольному).

В связи с этим представляет интерес экспериментальная запись профиля давления в «классической» одномерной детонации. На рис. 10 приведена осциллограмма профиля массовой скорости за детонационным фронтом в тетранитрометане, полученная электромагнитным методом. Эта осциллограмма подтверждает приведенные соображения о вырожденном характере протекания реакции в одномерной детонации. В то же время она находится в противоречии с существенным предположением, сделанным при выводе критерия неустойчивости [4--6], о наличии прямоугольного профиля давления в зоне реакции одномерной детонации.

Устойчивый фронт детонации в газовых смесях наблюдался при пересжатии водородо-воздушной смеси [16], а также при детонации пред-

варительно сжатой и подогретой до высокой температуры ударной волной водородо-кислородной смеси, разбавленной аргоном [17]. В последнем случае пьезодатчиком был зарегистрирован профиль давления в

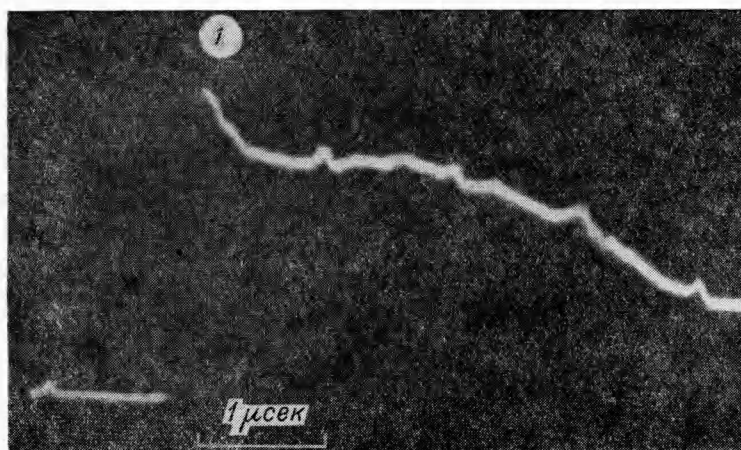


Рис. 10. Оциллограмма профиля массовой скорости в тетранитрометане.

1 — зона детонации.

зоне, в котором отсутствовал период индукции. Возможно, что наблюдаемая в определенных условиях устойчивость фронта газовой детонации также соответствует вырожденным условиям протекания реакции.

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование устойчивости фронта детонации ряда жидких ВВ: нитрометана, нитрата глицидного спирта, смеси азотной кислоты с дихлорэтаном, тетранитрометана, динитрата и тринитрата глицерина.

2. В тетранитрометане, динитрате и тринитрате глицерина обнаружена устойчивость фронта нормальной детонации. Прямым экспериментальным измерением профиля массовой скорости в зоне реакции в тетранитрометане установлено отсутствие четко выраженного периода индукции.

3. В некоторых ВВ в нормальном режиме с неустойчивым фронтом обнаружен гладкий фронт при пересжатии (нитрометан, смесь дихлорэтана с азотной кислотой).

4. Высказаны соображения о причинах устойчивости фронта детонации на основе рассмотрения реакции за фронтом детонации с позиции характера развития теплового взрыва.

Поступила в редакцию
16/IX 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1959, 125.
2. Б. В. Войцеховский, Б. Е. Котов, В. В. Митрофанов, М. Е. Толциян. Изв. Сиб. отд. АН СССР, 1958, 9, 14.

3. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1961, 139, 1.
4. К. И. Шелкин. ЖЭТФ, 1959, 3, 2.
5. Р. М. Зайдель. Докл. АН СССР, 1961, 136, 5.
6. С. К. Асланов. Докл. АН СССР, 1965, 163, 3.
7. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер, М. В. Сеницын, К. Б. Юшко. Докл. АН СССР, 1961, 138, 6.
8. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер, Г. В. Кришкевич, К. Б. Юшко. Докл. АН СССР, 1964, 158, 5.
9. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1963, 4.
10. О. К. Розанов. Канд. дисс. М., ИХФ АН СССР, 1965.
11. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
12. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
13. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, И. Г. Коба. ФГВ, 1965, 3.
14. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопроводность в химической кинетике. М., Изд-во АН СССР, 1947.
15. В. Н. Кондратьев. Кинетика химических газовых реакций. М., Изд-во АН СССР, 1960.
16. Seventh Symposium (international) on Combustion, 1959, F. I. Martin and White.
17. Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1964, 4.