

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРОЙНЫХ УДАРНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ
В ЖИДКОМ ВЗРЫВЧАТОМ ВЕЩЕСТВЕ**

С. Н. Буравова, А. Н. Дремин, В. В. Якушев
(Москва)

Процесс возникновения реакции под действием ударных волн в жидких взрывчатых веществах экспериментально достаточно хорошо изучен [1—5]. В этих работах показано, что реакция возникает на границе раздела жидкостями — инертная преграда спустя время задержки τ после того, как ударная волна вошла в исследуемое вещество. Возникшая реакция догоняет ударный фронт, при этом образуется пересжатая детонация, которая переходит к нормально распространяющемуся режиму. Время задержки возникновения реакции сильно зависит от давления в инициирующей ударной волне. Качественная зависимость τ от давления известна хорошо, однако точную количественную зависимость получить экспериментально очень трудно. На полированной поверхности инертной преграды реакция возникает с большей задержкой, чем на плохо обработанной, при прочих равных условиях проведения эксперимента (таких, как диаметр, длина заряда, начальная температура). Микронеровности ударного фронта создают повышенную температуру в отдельных очагах сжатого вещества, в которых реакция протекает быстрее, чем в близлежащих более холодных местах. От таких реакционных очагов отходят волны сжатия, которые, в свою очередь, способствуют дополнительному разогреву вещества.

В данной работе исследовалось влияние негладкости ударной инициирующей волны на возникновение и распространение реакции. В работе Кемпбелла [1] негладкий ударный фронт создавался искусственно с помощью пузырьков различных газов. Реакция на пузырьке возникает практически мгновенно, однако дальнейшее распространение реакции обусловлено несколькими причинами. Детальный разбор (анализ) каждой причины в работе Кемпбелла не проведен.

Основное внимание в настоящей работе уделялось выявлению условий возникновения и распространения реакции, вызванной отдельной неоднородностью, и взаимодействию этих неоднородностей. Необходимость такой работы диктуется еще одной причиной. Дело в том, что фронт детонационной волны в некоторых жидких веществах не гладкий [6], а само свечение распространяющейся детонации не равномерное [7]. Свечение распространяющейся детонации обычно связано с процессом реакции. Чем вызвана реакция, когда свечение фронта неравномерное, ответить трудно. По аналогии с многофронтной детонацией в газах можно предложить два объяснения. Реакция возникает в местах столкновения косых волн [8] на ударном фронте или идет в

основном за поперечной волной по уже сжатому веществу [9]. В настоящее время техника эксперимента не способна разрешить пространственно-временной масштаб явлений, связанных со структурой детонационного фронта в жидких ВВ.

В данной работе на примере смеси нитрометана с ацетоном (75/25 и 60/40) проводились модельные опыты, имитирующие одну или несколько неоднородностей на ударном фронте. В одном случае неоднородности ударного фронта создавались полоской с высотой h , шириной l и длиной, равной диаметру заряда, помещенной на пластине-преграде, из которой выходит ударная волна и которая является дном сосуда с исследуемой жидкостью. В другом случае в преграде фрезеровалась канавка 2×2 мм, которая заливалась сплавом тротила с гексогеном (ТГ) (рис. 1).

Поскольку жидкое взрывчатое вещество в период задержки ведет себя как инертное, интересно рассмотреть механизм образования неоднородности в инертной жидкости.

Из инертной преграды ударная волна выходит раньше, чем из полоски. По мере распространения ударной волны в полоске она создает в жидкости боковую ударную волну, интенсивность которой значительно меньше интенсивности прямой волны P . Так как h мало, предполагается, что параметры ударной волны в полоске не меняются. В силу большей динамической жесткости материала преграды волна в ней распространяется быстрее, чем в исследуемом веществе. Плоский участок ударной волны, вышедшей из полоски, опережает основную ударную волну, вышедшую из пластины. Расстояние между этими участками является мерой возмущения ударного фронта и определяется формулой:

$$\delta = h \left(1 - \frac{D_1}{D_2} \right),$$

где D_1 — скорость ударной волны в исследуемой жидкости; D_2 — скорость ударной волны в преграде.

Вблизи ступеньки происходит столкновение двух волн — боковой и основной, что приводит к образованию области повышенного давления. Расширение этой области создает поперечное возмущение, распространяющееся по сжатому веществу. Вдали от ступеньки скорость распространения этого возмущения определяется скоростью звука в сжатом веществе. На ударном фронте образуется тройная конфигурация, состоящая из основной прямой ударной волны, косой и поперечной.

Аналогичная картина имеет место, когда вместо металлической полоски используется полоска взрывчатого материала (рис. 1, в). В этом случае область повышенного давления создается продуктами реакции взрывчатого вещества.

В качестве инертной жидкости в экспериментах по схеме рис. 1, а использовалась вода. Возмущение на ударном фронте обнаруживалось с помощью наблюдения рассеянного света аргонового источника. Наблюдение проводилось с торца, а освещение — под углом 45° , поэтому свет, отраженный от ударной волны, не попадал в объектив прибора. Время существования поперечного возмущения в воде — несколько микросекунд. Следует отметить, что свет, отраженный косой волной, очень слаб, и чтобы его наблюдать, необходимо прибегать к специальным мерам (очень широкая щель СФР, специальное проявление пленок).

Эксперименты со смесью НМ/АЦ 75/25, выполненные по схеме, приведенной на рис. 1, а, б, проводились в диапазоне давлений

60—100 тыс. атм (см. таблицу). Для фотографирования использовалась высокочувствительная аэрофотопленка (рис. 2).

Вдали от ступеньки развивается обычный процесс инициирования. Время задержки между моментом входа ударной волны и моментом

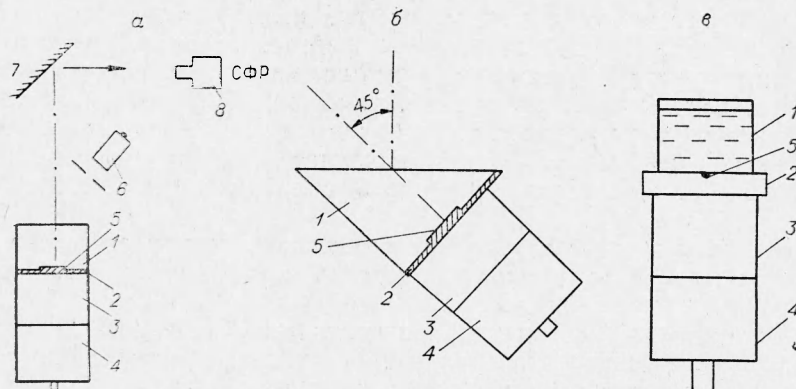


Рис. 1. Схемы опытов.

1 — сосуд с исследуемой жидкостью; 2 — инертная преграда из алюминия (а, б) и плексигласа (в); 3 — таблетка активного заряда из ТНГ; 4 — линза ВВ, создающая плоский детонационный фронт; 5 — металлическая полоска (а, в) или канавка литого ТГ (в); 6 — аргоновый источник света; 7 — зеркало, направляющее лучи в прибор; 8 — скоростной фоторегистр.

появления темной зоны поглощения света от постороннего источника равно 0,75 мксек в конкретной постановке эксперимента (алюминиевая пластина толщиной 3 мм, неполированная). Время существования темной зоны составляет 0,15—0,2 мксек в исследуемом диапазоне давлений

и мало зависит от давления. При очень больших давлениях инициирующей волны ($p \approx 115$ —120 тыс. атм) предсвечение не наблюдается и имеет место только темная область поглощения света.

p , тыс. атм	τ , мксек	V , мм	D , мм	u , мм	τ_1 , мксек	τ_2 , мксек
100	0,75	5,4	5,2	1,86	0,8	0,23
80	1,4	5,0	4,8	1,68	1,72	0,36
72	—	4,8	4,55	1,49	2,16	0,65
60	—	4,6	4,3	1,28	—	—

Примечание. τ_1 — появление нового излома с момента возникновения старого, τ_2 — время задержки появления нового очага ($\delta=0,5$ мм).

ты, в которых наблюдение ведется с торца, не позволяют определить скорость распространения темной зоны и ее взаимосвязь с предсвечением. Время существования предсвечения для давления $p=100$ тыс. атм составляет 0,3—0,4 мксек. Все эксперименты, приведенные на рис. 2, проводились с подсветкой от аргонового источника. Условия эксперимента таковы, что свет, отраженный косой волной, не фиксируется, и наблюдаемое свечение обязано только реакции. Изменение освещенности дна сосуда при выходе ударной волны в жидкость дает возможность при обработке пленок точно определить этот момент времени. Конфигурация инертной преграды обозначена на каждой приведенной фотографии.

Наличие такой зоны зафиксировано для многих жидких ВВ [2], однако природа ее до сих пор остается невыясненной. Она обнаруживается только в опытах с использованием постороннего источника света. Эксперимен-

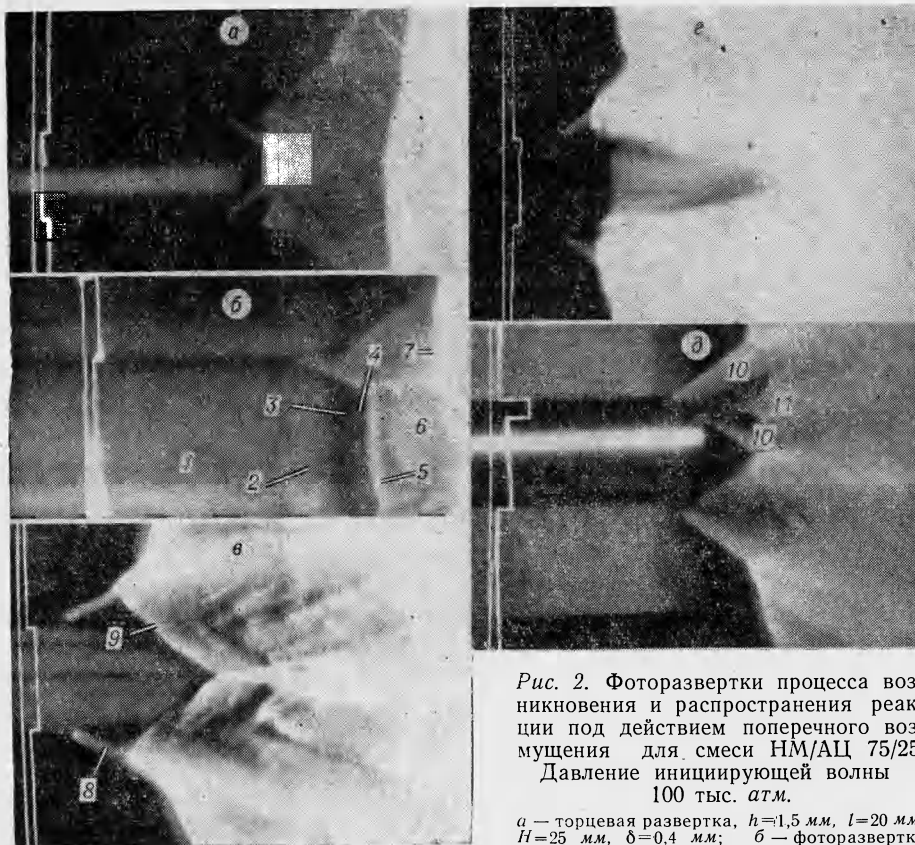


Рис. 2. Фоторазвертки процесса возникновения и распространения реакции под действием поперечного возмущения для смеси НМ/АЦ 75/25. Давление инициирующей волны 100 тыс. атм.

а — торцевая развертка, $h=1,5$ мм, $l=20$ мм; $H=25$ мм, $\delta=0,4$ мм; б — фоторазвертка под углом 45° к оси заряда, $h=2$ мм, $l=\infty$, $H=25$ мм, $\delta=0,5$ мм; в — торцевая развертка, $h=2$ мм, $l=20$ мм, $H=50$ мм, $\delta=0,5$ мм; г — торцевая развертка, $h=2$ мм, $l=20$ мм, $H=6$ мм, $\delta=0,5$ мм; д — торцевая развертка, $l_1=18$ мм, $\delta_1=0,5$ мм, $l_2=2$ мм, $\delta_2=0,5$ мм, $\delta_3=1$ мм, $H=50$ мм.

1 — свет аргонового источника, рассеянный дном сосуда; 2 — момент выхода ударной волны; 3 — темная зона, свидетельствующая о начале реакции; 4 — предсвечение; 5 — момент догона реакции ударной волной; 6 — свечение распространяющейся детонации; 7 — свечение продуктов реакции в воздухе; 8 — траектория реакционного излома, идущего от полоски; 9 — траектория новых реакционных конфигураций; 10 — уширяющийся след от движения конфигурации, реакция у которой идет за собой волной; 11 — вновь образуемая реакция между двумя близко расположенными конфигурациями.

Полоски малой высоты до 0,5 мм, которые создают возмущения, размером меньше 0,15 мм не приводят к возникновению наблюдаемой реакции (рис. 3, а). При дальнейшем увеличении высоты полоски от нее отходят тонкие светлые линии, обязанные реакции, которая вызывается распространяющимся от полоски поперечным возмущением. Эта реакция может располагаться на ударном фронте, если возникает без задержки, или под ним, если величина задержки существенна. Тот факт, что светлые линии на фоторазвертках, распространяющиеся от места возникновения возмущения, упираются в яркую полосу, фиксирующую ударную волну в момент догона ее реакцией, свидетельствует, что реакция возникает практически непосредственно на ударном фронте (с точностью разрешения по времени — 0,1 мксек). Иными словами, тонкие светлые полоски на фоторазвертках (см. рис. 2, а, б) представляют собой траектории реакционных изломов. Если созданная неоднородность $\delta < 0,5$ мм, реакция идет только в изломе, близлежащее сжатое вещество остается непрореагировавшим. Об этом свидетельствуют эксперимен-

ты (см. рис. 2, а, б, в), в которых фотографирование процесса проводилось как с торца (см. рис. 1, а), так и под углом к оси заряда (см. рис. 1, б). В последнем случае удастся заглянуть под траекторию излома. Дополнительного свечения там не обнаружено. Структура такой конфигурации представлена на рис. 3, б.

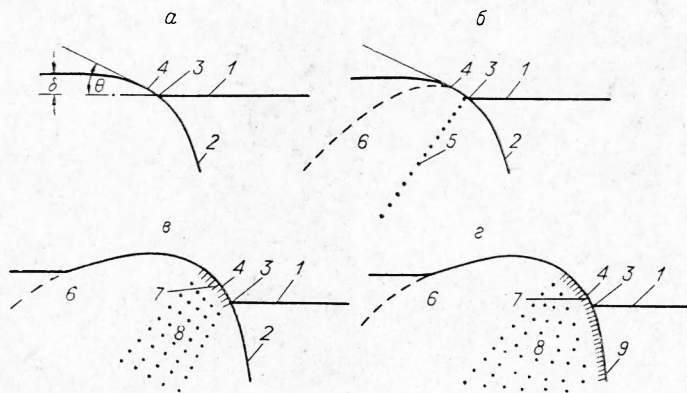


Рис. 3. Возможные типы тройных конфигураций, возникающих при распространении поперечных возмущений (контактные разрывы не приводятся).

1 — основная инициирующая ударная волна; 2 — поперечная волна; 3 — излом ударного фронта; 4 — косая ударная волна; 5 — траектория реакционного излома; 6 — область влияния, обязанная возмущениям, распространяющимся от реакции; 7 — косая волна с реакцией; 8 — продукты реакции; 9 — поперечная реакционная волна.

Следует обратить внимание на тот факт, что распространение реакции, вызываемой изломом, в смеси НМ/АЦ 75/25 порождает еще один реакционный излом, движущийся в противоположном направлении. Так, на рис. 2, б, в новые реакционные изломы возникли спустя 0,8—0,9 мксек с момента возникновения старых.

С увеличением высоты полоски, когда $\delta > 0,5$ мм, характер свечения меняется — вместо тонкой линии след на фоторазвертке представляет собой уширяющуюся полосу; $\delta = 0,5$ мм — переходная величина, при которой может иногда образовываться дополнительное свечение над траекторией реакционного излома. Уширение области, занятой реакцией, связано с тем, что вблизи ступеньки осуществляются благоприятные условия для распространения уже возникшей реакции. С одной стороны, излом все время вызывает реакцию, с другой стороны, металлическая полоска препятствует быстрой разгрузке области повышенного давления, образовавшейся в результате столкновения двух волн и поддерживаемой продуктами реакции, идущей в изломе, поэтому вся область вблизи полоски занята продуктами реакции. В тот момент, когда ударная волна выходит из полоски в жидкость, излом отойдет от нее на расстояние d

$$d = V \frac{h}{D_2} = V \frac{\delta}{D_2 - D_1},$$

где V — скорость перемещения излома по фронту ударной волны. В этот момент ширина светлой полоски на фоторазвертке будет равна d , деленному на коэффициент уменьшения. От угла полоски распространяется волна отсутствия реакции. При давлении $p = 100$ тыс. атм скорость ее распространения меньше скорости движения излома V , поэтому ширина следа на фоторазвертке увеличивается во времени.

На рис. 2, *г* приведена фоторазвертка опыта с тонким слоем исследуемой жидкости, высота которой равна 6 мм. Когда реагирующее вещество подходит к границе раздела поверхность — воздух, образуется очень яркое свечение, обязанное выходу в воздух продуктов реакции. По разновременности выхода продуктов реакции в воздух можно судить об угле наклона фронта реакции к основной ударной волне. Опыты показали, что этот угол мал $\theta = 5-7^\circ$.

Мгновенное расположение ударных фронтов и фронта реакции в распространяющейся тройной конфигурации приведено на рис. 3, *в*.

Под траекторией излома дополнительной реакции не обнаруживается до тех пор, пока полоска не создает возмущение размером $\delta \geq 1,2$ мм. Эксперименты с такими возмущениями обнаруживают предсвещение, сопровождающее движение излома как при фотографировании с торца, так и под углом. Естественно связать это свечение с реакцией за поперечной волной (рис. 3, *г*).

Интересно отметить, что в случае крупных возмущений также образуется новая реакционная конфигурация, распространяющаяся в противоположном направлении от движения первоначальной, но время ее появления τ_1 значительно увеличивается; так, для $\delta = 1$ мм $\tau_1 = 2,5$ мксек (см. рис. 2, *д*). Между двумя близко расположенными реакционными конфигурациями возникает реакция; образование ее обязано только близости двух конфигураций. Если аналогичные конфигурации разнести на большее расстояние ($l \geq 10$ мм), то реакция не возникает (см. рис. 2, *в*). Очевидно, когда области влияния перекрываются, давление в сжатом веществе повышается. В области повышенного давления может возникнуть реакция по механизму теплового взрыва, возмущение от которого быстро догоняет ударный фронт и искривляет его. При этом образуются два расходящихся излома, движущихся в противоположных направлениях. Так как в области влияния давление существенно отличается от давления в окружающем сжатом веществе только вблизи реагирующего вещества, а при удалении от траектории излома быстро падает, реакция не возникает в случае, приведенном на рис. 2, *в*. Следует отметить, что на полосках шириной 20 мм реакция не возникает самостоятельно по крайней мере 3,5 мксек, пока сходящиеся реакционные конфигурации не закроют ее от объектива фоторегистра.

Основной характер распространяющегося поперечного возмущения в реакционном веществе сохраняется и при меньших давлениях (рис. 4, *а, б, в*). Давление в 75 тыс. атм является предельным для инициирования, однако все четыре типа распространяющихся конфигураций имеют место и в этом случае.

Интересно отметить особенности конфигурации с реакцией за поперечной волной: во-первых, обязательно наличие реакции за косой волной; во-вторых, при распространении такой конфигурации к краю заряда (т. е. в область пониженных давлений) реакция прежде всего исчезает за поперечной волной, за косой волной реакция распространяется дальше (см. рис. 4, *а*). Эти особенности объясняются тем, что температура за косой волной всегда выше, чем за поперечной. Реакция затухает в поперечной волне не одновременно по всему фронту; вначале она исчезает вблизи излома ударного фронта. Этот факт остается невыясненным.

Поскольку в экспериментах на смеси НМ/АЦ 75/25 время существования реакционной конфигурации ограничено временем задержки возникновения реакции непосредственно на границе раздела, были проведены опыты на более разбавленной смеси НМ/АЦ 60/40 по схеме, приведенной на рис. 1, *в*. Амплитуды входящих ударных волн лежали в диапазоне 80—90 тыс. атм. Фоторазвертки этих экспериментов приве-

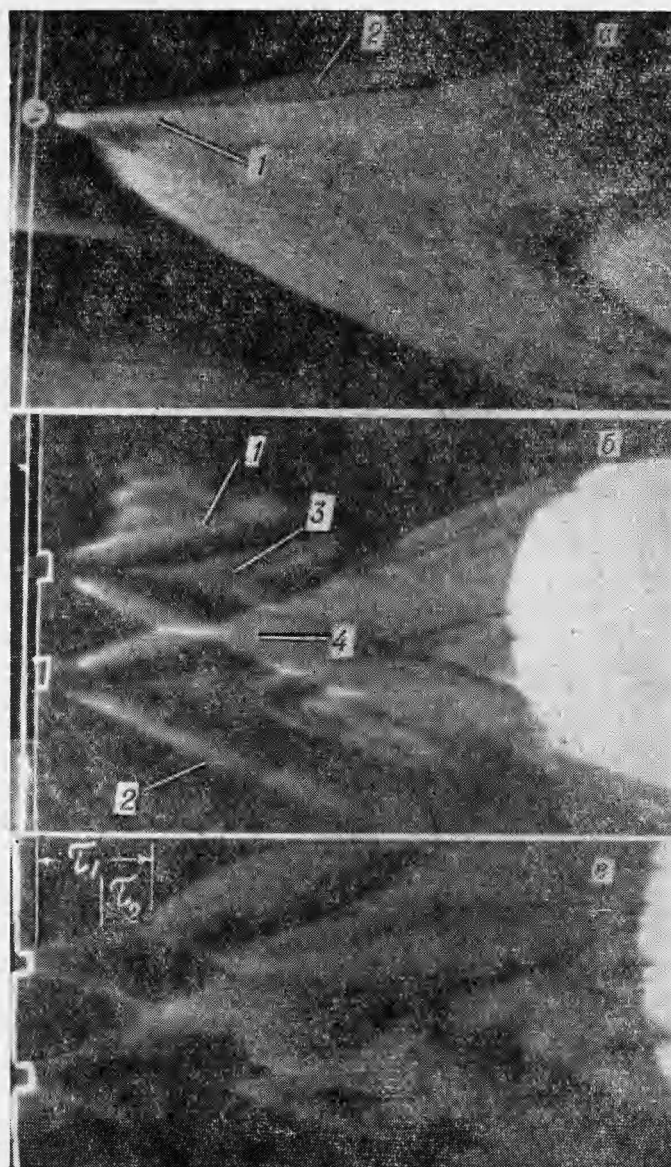


Рис. 4. Фоторазвертки процесса возникновения и распространения реакции под действием поперечного возмущения.

а — фоторазвертка под углом 45° , $p=90$ тыс. атм; *б* — торцевая фоторазвертка, $p=80$ тыс. атм, $\delta_1=\delta_2=\delta_3=\delta_4=0.7$ мм; *в* — торцевая развертка, $p=72$ тыс. атм, $\delta_1=\delta_2=\delta_3=\delta_4=0.4$ мм.
 1 — след от реакции, распространяющейся за косой волной; 2 — предсвещение, связываемое с реакцией за поперечной волной; 3 — реакция, возникшая между двумя расходящимися конфигурациями; 4 — область, занятая реакцией после столкновения двух конфигураций.

дены на рис. 5, из которых видно, что все четыре типа рассмотренных ранее конфигураций (см. рис. 3) могут существовать и в этом случае.

Кроме того, на данной смеси удалось наблюдать интересное явление возникновения ряда новых неоднородностей, которые распространяются

последовательно одна за другой в сторону породившего их излома (рис. 5, б). На этом же снимке видно, что между двумя основными конфигурациями образуются две новые, расходящиеся в обе стороны, причем время от момента входа ударной волны в вещество до их возникновения на порядок больше времени, требующегося для образования конфигураций на косой волне. Как в том, так и в другом случае конфигурации возникают за счет теплового взрыва в ударно сжатом веществе. Резкое различие во временах их образования связано с тем, что большее время определяется давлением входящей ударной волны, а меньшее — условиями вблизи реакционной косой волны. Тот факт, что конфигурации, прилегающие к косой волне, двигаются в одном направлении, свидетельствует о том, что создающее их возмущение настолько слабое, что может вызвать распространение реакционного излома только в сторону возрастающих параметров, т. е. по направлению к основному излому. Были приведены опыты по столкновению двух реакционных изломов. В зависимости от типа конфигураций и давлений в прямой волне наблюдаются различные случаи их взаимодействия. В более богатой смеси НМ/АЦ 75/25 (см. рис. 2, в, д и 4, б, в) столкновение реакционных изломов способствует улучшению условий как для дальнейшего распространения реакции, так и для более быстрого протекания. Однако для смеси НМ/АЦ 60/40 иногда имеют место случаи, когда реакция в изломах прекращается после их взаимодействия (см. рис. 5, г).



Рис. 5. Торцевые фоторазвертки процесса возникновения и распространения реакции под действием поперечного возмущения для смеси НМ/АЦ 60/40. Давление инициирующей волны 80—90 кбар. а, б, в — $l=55$ мм; г — $l=20$ мм; д — $l=20$ мм. 1 — свечение вспомогательного заряда из литого ТГ; 2 — траектория реакционного излома; 3 — траектория конфигурации с реакционной поперечной волной; 4 — новые конфигурации за косой волной; 5 — нормальный процесс инициирования; 6 — столкновение реакционных изломов; 7 — вновь образуемая реакция между двумя реакционными конфигурациями.

По-видимому, все типы искусственно созданных конфигураций, исследованные в данной работе, и характер их взаимодействия имеют место и на фронте нормальной детонации. В настоящее время нет достаточных оснований для утверждения, какой тип конфигураций определяет детонационное разложение вещества.

Авторы благодарят Д. М. Маруженко и Е. Е. Чемагина за помощь при проведении экспериментов.

*Поступила в редакцию
15/VIII 1966*

ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Campbell, W. S. Davis, I. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, **4**, 4.
2. I. R. Travis, A. W. Campbell, W. S. Davis, J. B. Ramsay. Shock Initiation of Explosives III. Colloques internation du centre national de la recherche scientifique. Paris, 1962.
3. M. A. Cook. The science of High Explosives Reinhold Publishing Corporation, № 5, 1958.
4. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, А. Н. Андриевский. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.
5. C. L. Mader. Phys. Fluids, 1963, **6**, 3, 375.
6. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин и др. ПМТФ, 1963, 4.
7. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1961, **139**, 1.
8. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1965.
9. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.