

**ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ
УСТОЙЧИВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ
С ОДНОМЕРНОЙ ЗОНОЙ В ЖИДКИХ ВВ**

А. Н. Дремин, С. Д. Савров
(Москва)

Большинство теорий критического диаметра детонации, в соответствии с принципом Харитона, основано на представлениях о прямой связи его величины со временем химической реакции в детонационной зоне. При этом подразумевается модель гладкой детонационной волны.

В свое время было показано [1], что эта модель не обоснована при рассмотрении механизма критического диаметра в тех жидких ВВ, в которых была обнаружена неустойчивость фронта детонации. Экспериментальное изучение предельных условий распространения детонации в этих ВВ позволило разработать для них отдельную теорию критического диаметра [2]. При последующем экспериментальном изучении детонации в жидких ВВ было обнаружено несколько ВВ с гладким передним фронтом нормальной детонации [3] (тетранитрометан (ТНМ), нитроглицерин (НГЦ), динитроглицерин (ДНГЦ)).

Возникает вопрос, подчиняется ли механизм критического диаметра в этих ВВ принципу Харитона?

Первая серия экспериментов была проведена с ТНМ (плотность $1,6 \text{ г/см}^3$, скорость детонации $6,4 \text{ км/сек}$). Начальная температура в этих и во всех остальных опытах $15\text{--}20^\circ \text{C}$. Было установлено, что в стеклянных трубках детонация затухает при диаметре, меньшем 16 мм . Если обложить внутреннюю стенку стеклянной трубки алюминиевой фольгой толщиной $0,05 \text{ мм}$, то детонация устойчиво распространяется и при $\varnothing 7 \text{ мм}$. Такой эффект до сих пор считался характерным для детонации с неустойчивым фронтом, где тонкая малосжимаемая (жесткая) оболочка обеспечивает устойчивое распространение детонации за счет возникновения реакции при соударениях неоднородностей со стенкой [4]. В остальных случаях значительный эффект оболочки отмечается для относительно слабых твердых ВВ [5].

Наряду с очень сильным влиянием жесткой оболочки на предельные условия распространения детонации жидких ВВ с одномерной зоной важно отметить, что ширина этой зоны оказывается гораздо больше толщины оболочки [3]. Все это заставляет предполагать, что влияние оболочки в жидких ВВ с одномерной зоной имеет природу, отличную от ее влияния на детонацию твердых ВВ.

Дальнейшие опыты заключались в наблюдении перехода детонации из жесткой трубки в объем на щелевом фоторегистре с торца заряда (рис. 1). На рис. 2 приведена развертка свечения фронта детонации во времени, на которой зарегистрировано затухание детонации путем сокращения поверхности детонационного фронта с момента выхода ее в

объем. При перепускании детонации из части стеклянной трубки, обложенной фольгой, в остальную часть этой трубки наблюдается аналогичная картина (рис. 3).

Затухание детонации при выходе из жесткой трубки с диаметром, меньшим критического, в объем напоминает картину перехода детонации в объем в жидких ВВ с неустойчивым фронтом детонации [2]. Однако наблюдаемые в последнем случае волны отсутствия реакции существенным образом связаны с неоднородностью зоны детонации и соответствуют последовательной «гибели» неоднородностей на фронте детонационной волны. Кроме того, скорость сокращения поверхности детонационного фронта в ТНМ оказывается сильно зависящей от диаметра заряда и непостоянна при распространении к центру заряда.

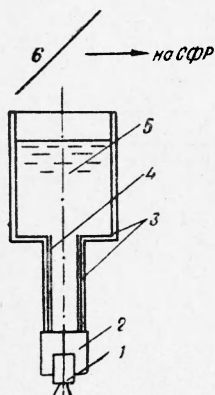


Рис. 1. Схема опыта по переходу детонации из трубки с жесткими стенками в объем.

1 — капсуля; 2 — усилительный заряд; 3 — стеклянный сосуд; 4 — алюминиевая фольга; 5 — жидкое ВВ; 6 — зеркало.

На рис. 4 приведена развертка свечения фронта при выходе детонации в объем из трубки диаметром 20 мм по схеме рис. 1. В этих условиях детонация не затухает при переходе, так что соответствующий диаметр узкой трубки следует считать большим критического. При этом отмечается интересное явление — детонация после перехода распространяется слаборасходящимся столбом, и, несмотря на то, что детонация в этом случае не затухает, большая часть объема ВВ остается невзорванной.

Какова же причина сокращения поверхности детонационного фронта в ТНМ и чем определяется в нем критический диаметр?

Обратимся к рассмотрению условий распространения детонации конденсированного ВВ с одномерной зоной в заряде со слабой оболочкой конечного диаметра. Детонация предварительно распространяется по веществу в жесткой оболочке того же диаметра. После перехода в невозмущенный до этого детонационный комплекс начнет распространяться боковая волна разрежения, которая будет ослаблять передний ударный фронт детонационной волны.

Напомним, что в одномерной зоне реакции детонационной волны в жидких ВВ тепловыделение происходит в условиях, аналогичных вырожденному адиабатическому тепловому взрыву, когда не существует четко выраженного периода индукции и профиль давления в зоне реакции (химпик) близок к треугольному [3]. Ослабление затронутых боковой волной разрежения участков ударного фронта детонационной волны будет приводить к уменьшению в них степени вырождения, что приведет к появлению на этих участках заметного периода индукции. С этого момента дальнейшее ослабление переднего фронта может привести к быстрому нарастанию периода индукции, который сильно зависит от температуры. В определенной области зоны реакции по периферии заряда он может увеличиваться с такой скоростью, что это приведет к качественному эффекту — срыву задержки воспламенения в зоне, когда в условиях нестационарного химпика свежее вещество, поступающее в него, перестанет взрываться, что приведет к затуханию химпика на данном участке и последующему расширению оставшихся за ним продуктов детонации.



Рис. 2. Развертка свечения фронта детонации в ТНМ во времени при диаметре узкой трубки 15 мм.
1 — начало детонации; 2 — момент выхода фронта в объем.

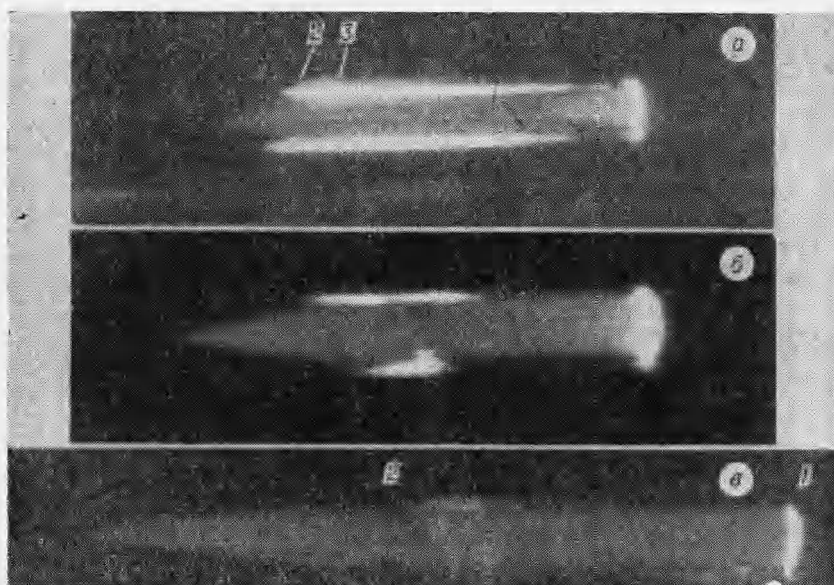


Рис. 3. Развертка свечения в ТНМ при переходе детонации в стеклянной трубке диаметром 7 (а), 10 (б), и 16 мм (в) из части, обложенной фольгой, в остальную.
1 — начало детонации; 2 — момент выхода детонации из оболочки; 3 — вспышка воздуха, не вытесненного жидкостью из зазора между фольгой и стеклом.



Рис. 4. Переход детонации в объем в ТНМ из узкой трубки.
1 — момент выхода детонации в объем.

Поскольку срыв в зоне приводит к затуханию участка поверхности детонационного фронта и последующему падению параметров в прилегающих к нему до этого продуктах детонации за счет их расширения, свечение этих продуктов резко падает и может не регистрироваться на фоторазвертке. В результате линия срыва соответствует прекращению свечения детонационного фронта; ее распространение к центру заряда наблюдается как сокращение поверхности детонационного фронта после перехода детонации в объем.

Для наглядности приведем схему затухания детонации, на которой изображены положение детонационного фронта и прилегающих к нему нестационарных комплексов, ударно-сжатое ВВ — продукты детонации в некоторые последовательные моменты времени (рис. 5).

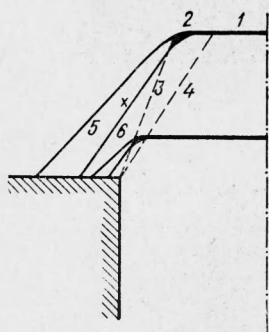


Рис. 5. Схема затухания детонации при выходе из жесткой трубки в объем. 1 — невозмущенная зона химической реакции; 2 — ослабленный участок зоны под действием боковой волны разрежения; 3 — траектория распространения в объеме линии срыва; 4 — траектория фронта боковой волны разрежения в зоне; 5 — ударно-сжатое ВВ за линией срыва; 6 — прилегающие к слою сжатого ВВ продукты детонации. X — место первой вспышки при диаметре, большем критического.

Основное последствие срыва в зоне — перевод воспламенения ударно-сжатого ВВ от условий на уровне химика до условий, соответствующих ударному сжатию в области 5 (см. рис. 5), в которых давление значительно ниже давления в химике и, может быть, даже меньше, чем в плоскости Чепмена — Жуге. Ширина зоны химической реакции в этом переходе никак не участвует.

Скорость распространения линии срыва к центру заряда определяется степенью вырождения в зоне реакции нормальной детонации и скоростью падения параметров в ней под действием боковой волны разрежения. Последняя определяется скоростью звука в ударно-сжатом веществе зоны и градиентом давления в волне разрежения. Для данного ВВ при любом диаметре заряда скорость звука в ударно-сжатом веществе зоны реакции нормальной детонации постоянна. Напротив, градиент давления в волне разрежения зависит от диаметра заряда — чем меньше диаметр, тем больше градиент.

Сложное взаимодействие перечисленных параметров определяет непостоянство скорости движения линии срыва к центру заряда и ее зависимость от диаметра.

В соответствии с изложенным предоставляется возможность объяснить также эффект тонкой жесткой оболочки, определяемый сильным ослаблением боковой волны разрежения в течение начального периода развития реакции в зоне, который в реальной одномерной зоне очень мал, чем и обеспечивается устранение срыва в зоне.

Рассмотрим теперь, чем определяется критический диаметр в ТНМ. Остающиеся за линией срыва продукты детонации (см. рис. 5) действуют, как поршень, так что давление в них на поверхности контактного разрыва в каждом ее участке равно давлению в прилегающем к нему слое ударно-сжатого ВВ. В дальнейшем события развиваются как и при инициировании детонации ударной волной. Известно [6, 7], что в этом случае взрыв начинается на границе с поршнем, где «время жизни» ударно-сжатого ВВ самое большее.

Более сложным является вопрос о том, в каком месте контактной поверхности произойдет первая вспышка и произойдет ли она вообще при заданном диаметре заряда. Для анализа зависимости условий вспышки от диаметра обратимся к работе [7] по ударному иницииро-

ванию. Было установлено, что задержка взрыва ударно-сжатого ВВ определяется не только амплитудой ударной волны, но и ее профилем во времени. При заданной амплитуде ударной волны существует критическое значение скорости падения параметров во времени, которое определяет возможность срыва задержки взрыва при инициировании. Физический смысл срыва в данном случае означает, что задержка взрыва ударно-сжатого ВВ в данном объеме с падающими во времени параметрами будет увеличиваться и при этом все время оставаться большей «времени жизни» этого вещества. Поэтому при ударном инициировании, например, неосевые участки пассивной системы, имеющие большую скорость затухания параметров во времени, испытывают срыв и взрываются не самостоятельно, а под действием распространяющегося возмущения из центра, в котором срыва не произошло [7].

Параметры в ударно-сжатом ВВ (см. рис. 5, 5), за линией срыва будут падать со временем за счет осесимметричного расширения продуктов детонации. Скорость этого падения в заданном участке будет определяться его расстоянием до границы заряда, а также и до его центра. Амплитуду этих параметров сразу за линией срыва можно считать постоянной. Таким образом, если при заданном диаметре по мере распространения линии срыва к центру скорость падения параметров во времени в остающихся за ней участках ударно-сжатого ВВ нигде не достигнет определенной минимальной величины, соответствующей преодолению срыва, поверхность детонационного фронта полностью сократится и детонация затухнет.

На диаметре, большем критического, при распространении линии срыва к центру условия второго срыва для ударно-сжатого ВВ (см. рис. 5) в каком-то месте будут преодолены, где и произойдет первая вспышка. Место этой вспышки при увеличении диаметра выше критического значения будет оттесняться ближе к боковой поверхности, поскольку скорость падения параметров за линией срыва на одинаковом расстоянии от стенки будет зависеть от диаметра заряда в соответствии с осесимметричным расширением продуктов детонации.

Возмущения от взрыва начинают распространяться в остальной объем ударно-сжатого ВВ, ускоряя в них наступление тепловыделения. В некоторых жидких ВВ, например в НМ, реакция развивается столь быстро, что за время, значительно меньшее периода индукции, формируется детонация в ударно-сжатом веществе. В ТНМ в условиях критического диаметра время взрыва одного порядка с периодом индукции и детонация ударно-сжатого ВВ сформироваться не успевает. Поэтому энергия от развивающегося взрыва поступает на фронт ударной волны (см. рис. 5, 5) в виде слабых возмущений, разгоняя его до детонационной скорости. Это возмущение будет также поступать в окрестность около линии срыва, повышая в ней параметры. В результате линия срыва (см. рис. 5, 3) начнет терять скорость. Примыкающие к ней участки, образовавшиеся после вспышки «неидеальной детонации», по мере развития приводят к полному размытию линии раздела поверхности фронта, не испытавшей срыва с поверхностью фронта неидеальной детонации.

Очень сложным представляется детальный анализ поведения ударно-сжатого ВВ, расположенного ближе к боковой поверхности заряда от места первой вспышки под действием возмущений этой вспышки. По-видимому, на некотором расстоянии они могут компенсировать боковую разгрузку и вызвать в этой области тепловыделение. Как станет распространяться во времени этот фронт реакции, который будет соответствовать наружному краю фронта неидеальной детонации,

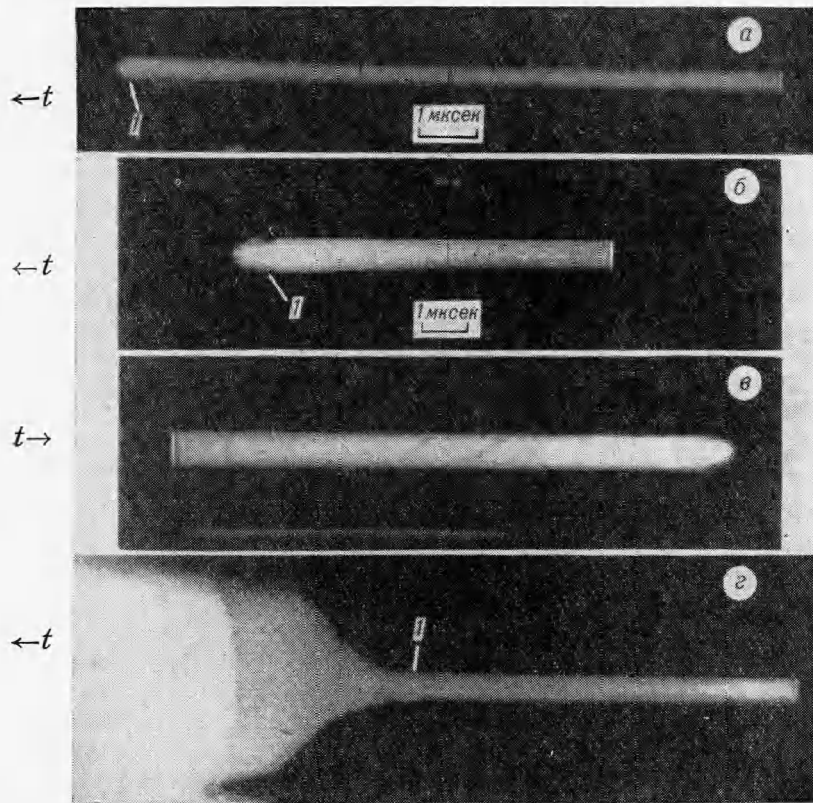


Рис. 6. Развертка свечения фронта в нитроглицерине при переходе детонации из жесткой трубки диаметром 1 (а), 1,7 (б), 2 (в) и 2,4 мм (г) в объем.

t — момент перехода.

предугадать заранее трудно. Из эксперимента (см. рис. 4) следует, что поверхность детонационного фронта слабо увеличивается, так что детонация проходит через объем «столбом». Очевидно, что скорость увеличения поверхности должна зависеть от диаметра.

Таким образом, установлено, что для детонационной волны с одномерной зоной в тетранитрометане критический диаметр не связан непосредственно с шириной зоны химической реакции и соответствует двойному срыву задержки воспламенения — один раз в одномерной зоне детонации на уровне параметров, соответствующих химпику, и второй раз в ударно-сжатом ВВ, образующемся за линией первого срыва за счет осесимметричного расширения оставшихся за ней продуктов детонации. Первый срыв вызван боковой волной разрежения, второй — конечным значением диаметра заряда.

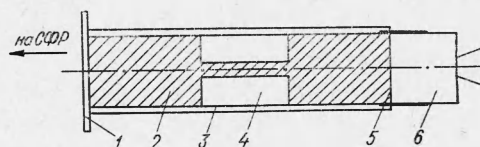
Прежде чем переходить к изложению дальнейших экспериментов, сделаем небольшое отступление. В координатах энергия активации (E) — теплота взрыва (Q), все жидкие ВВ, по-видимому, можно разделить некоторой линией так, что все ВВ с одной стороны от нее будут иметь неустойчивый детонационный фронт, а с другой стороны — устойчивый. Величина отклонения от этой «линии равновесия» будет характеризовать степень неустойчивости или устойчивости. (Следует отметить, что эта классификация имеет качественный характер.) НМ имеет большое E и малое Q и поэтому находится далеко в области неустойчи-

вости. ТНМ имеет меньшее значение величины E и приблизительно то же Q и, как показывает эксперимент, находится далеко в области устойчивости.

На примере этих ВВ, как представителей двух крайних случаев, развиты соображения о природе их критического диаметра: для НМ это сделано подробно в работе [2], для ТНМ — в настоящей работе.

Рис. 7. Схема опыта по переходу в нитроглицерине.

1 — стекло; 2 — нитроглицерин; 3 — стеклянная трубка диаметром 10 мм; 4 — алюминиевый цилиндр с отверстием; 5 — резинка; 6 — капсюль.



Для всех других жидких ВВ, находящихся ближе к «линии равновесия», отдельные детали процесса могут происходить, как в ТНМ, а другие — как в НМ. В качестве примера были выбраны нитроглицерин и динитроглицерин с одномерной зоной детонации. Они близки между собой по химическому строению и отличаются мощностью. Для них также наблюдается сильное влияние тонкой металлической оболочки на возможность распространения детонации в малом диаметре.

На рис. 6 приведена развертка во времени свечения фронта детонации в нитроглицерине при переходе ее из жесткой трубки в объем. Схема опыта соответствует рис. 7. Для увеличения разрешающей способности фоторегистра в этих опытах применялась увеличительная линза, располагаемая перед зарядом ближе ее фокусного расстояния.

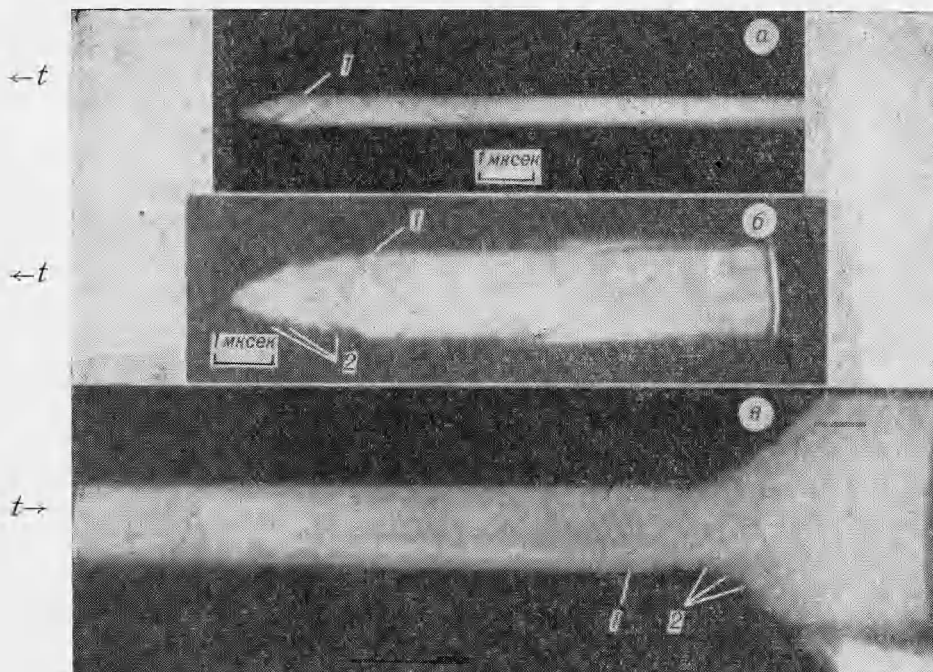


Рис. 8. Развертка перехода в динитроглицерине по схеме рис. 1.

1 — момент перехода; 2 — акты срыва и восстановления зоны химической реакции на краях детонационного фронта.

На рис. 8 приведена развертка свечения фронта детонации в динитроглицерине при переходе ее из жесткой трубки диаметром 4 (а), 7 (б) и 10 мм (в) в объем. Полностью аналогичная картина наблюдается при перепускании детонации в стеклянных трубках из части, обложенной фольгой, в остальную. Наличие на поверхности детонационного фронта поперечных возмущений соответствует срыву в детонационной зоне при взаимодействии ее со взвешенными в ДНГЦ мельчайшими каплями воды, от которых трудно избавиться, но которые не оказывают влияния на устойчивость фронта и на характер перехода детонации из трубки в объем.

Приведенные фоторазвертки свидетельствуют о значительном отличии картины перехода детонации из жесткой в слабую оболочку в этих ВВ от тетранитрометана наличием периодических пульсаций по радиусу заряда линии срыва после перехода (см. рис. 6, 8). Поскольку фронт детонации в этих ВВ устойчив, очевидно, что природа срыва в их зоне остается такой же, как и в ТНМ. В то же время в области за линией срыва условия тепловыделения оказываются в достаточной степени невырожденными, чтобы после вспышки за время, меньшее периода ее индукции, сформировать детонацию по ударно-сжатому веществу (как в НМ).

Распространяясь в сторону линии срыва, эта детонация вызывает тепловыделение в остальном ударно-сжатом ВВ (рис. 9, 2) и ведет за собой внутренний край вновь образованного участка детонационного фронта в несжатом ВВ. Таким образом, возмущение от тепловыделения за линией срыва поступает в ее окрестность в виде волны конечной амплитуды, в результате чего она перестает существовать сразу, в отличие от ТНТ. Вновь образованные участки детонационного фронта (рис. 9, 3) в слабой оболочке диаметром, большим критического, снова испытывают срыв, так что при распространении по ней акты срыва и восстановления будут периодически повторяться, приводя к импульсации поверхности детонационного фронта как и в НМ.

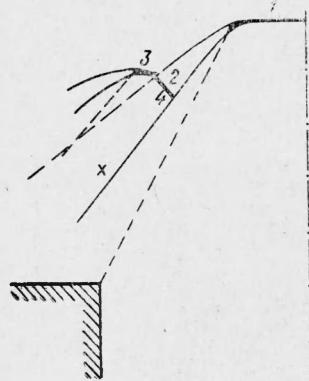


Рис. 9. Схема восстановления краев детонационного фронта после вспышки в невырожденных условиях.

1 — зона химической реакции до срыва; 2 — ударно-сжатое ВВ за линией срыва; 3 — вновь образованный участок детонационного фронта; 4 — фронт детонации ударно-сжатого ВВ.

Возникает вопрос, чем определяется в рассматриваемом случае критический диаметр? Поскольку в отмеченных выше двух схемах критический диаметр определяется возможностью вспышки в ударно-сжатом ВВ, образуемом после затухания зоны химической реакции, аналогичный механизм следовало бы предположить и для нитроглицерина и динитроглицерина.

И действительно, например, для динитроглицерина удается найти такой диаметр жесткой трубки (4 мм), после выхода из которой в объем детонация затухает за счет двойного срыва задержки воспламенения (см. рис. 8). Однако было бы ошибочно принять этот диаметр за критический, поскольку при увеличении диаметра жесткой трубки вспышка за линией срыва происходит и тем не менее детонация затухает. Аналогичная картина наблюдается в нитроглицерине, хотя детали перехода там труднее наблюдать (см. рис. 6).

Таким образом, эксперимент показывает, что вспышка за линией срыва является необходимым, но недостаточным условием для распространения детонации в объеме или в слабой оболочке.

Чем это вызвано?

Еще в экспериментах с ТНМ было отмечено, что детальное рассмотрение влияния возмущений от вспышки за линией срыва на тепловыделение в области, расположенной в сторону боковой поверхности заряда, составляет сложную самостоятельную задачу. Действительно, в этом направлении параметры ударно-сжатого ВВ падают относительно значений в месте вспышки, что, в частности, ухудшает условия для формирования и распространения детонации по ударно-сжатому ВВ. Эти условия тем хуже, чем больше градиент этих параметров, который, в свою очередь, определяется характеристическими размерами ударно-сжатого ВВ в месте первой вспышки. Кроме того, после возникновения детонации от вспышки в несжатом ВВ могут вступить в действие предельные условия распространения для выпуклого детонационного фронта, качественные представления о которых содержатся в работе [8]. Совокупность лимитирующих факторов будет характеризоваться соотношением между шириной зоны и характеристическим размером ударно-сжатого ВВ в месте вспышки за линией срыва. Последний параметр, в отличие от первого, пропорционален диаметру заряда, соответствующего двойному срыву задержки воспламенения.

Проследить однозначную связь указанного выше соотношения с основными характеристиками ВВ, например, в координатах $E - Q$, не удастся, в частности, из-за отсутствия надежных данных об уравнении состояния ударно-сжатого ВВ.

Таким образом, при определенной величине этого соотношения может оказаться, что наружный край восстановленных участков детонационного фронта будет испытывать срыв вблизи места первой вспышки, что и наблюдается в ДНГЦ и НГЦ. Поскольку расстояние места первой вспышки от боковой границы заряда является функцией диаметра, которое уменьшается с его увеличением, оказывается, существует критическое значение этого диаметра, большее диаметра, соответствующего двойному срыву задержки воспламенения, выше которого последовательные акты срыва и вспышки будут приводить к тому, что детонационный фронт, пульсируя, начинает расходиться, а при меньшем — сокращаться до полного затухания детонации. В случае меньшего отношения ширины зоны к диаметру, соответствующему двойному срыву, условия для расхождения волны реакции в сторону боковой стенки более благоприятные; это приводит к тому, что вспышки за линией срыва оказываются достаточно для восстановления поверхности детонационного фронта до размеров, больших диаметра жесткой трубки, и, таким образом, для расхождения детонации в объеме или прохождения в слабой оболочке.

Интересно отметить, что ширина зоны химической реакции детонационной волны, не определяя непосредственно величину критического диаметра, участвует при восстановлении детонационного фронта за линией срыва в качестве независимого параметра, ограничивающего возможности вспышки для расхождения детонации.

ВЫВОДЫ

Критический диаметр конденсированных ВВ с одномерной зоной не имеет прямой связи с ее шириной. Он оказывается значительно большим и определяется условиями вспышки и восстановления детонационного фронта после срыва в зоне детонационной волны задержки воспламенения боковой волной разрежения.

Поскольку срыв в зоне переводит кинетику тепловыделения от рожденных условий, близких к нормальным условиям за линией срыва,

когда появляется период индукции, сильно зависящий от температуры, следует ожидать в этих ВВ крутую зависимость величины критического диаметра от начальной температуры, что и наблюдается в НГЦ [9].

Следует отметить, что встречающееся в литературе [9] сопоставление чувствительности к удару с величиной критического диаметра неосновательно, поскольку величина критического диаметра определяется эффективным значением энергии активации и степенью ударного разогрева за линией срыва, который, в свою очередь, зависит от мощности ВВ. При ударном инициировании разогрев ВВ задается параметрами активного заряда, так что мощность самого ВВ непосредственно не участвует. Таким образом, чувствительность к удару определяется только эффективным значением энергии активации.

Поступила в редакцию
16/IV 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1961, 139, 1.
2. А. Н. Дремин. Докл. АН СССР, 1962, 147, 4.
3. А. Н. Дремин, С. Д. Савров. ФГВ, 1966, 1.
4. A. N. Dremin, O. K. Rozanov, V. S. Trofimov. On the Detonation of Nitromethane Combust and Flame, 1963, 7, 2.
5. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. Н. Шехтер. Физика взрыва. Физматгиз, 1959.
6. Shock Initiation of Detonation in Liquid Explosives Phys. Fluids. A. W. Campbell, W. S. Davis, I. R. Travis, 1961, 4, 498.
7. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, А. Н. Андриевский. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.
8. Я. Б. Зельдович, С. М. Козарко, Н. Н. Симонов. ЖТФ, 1956, XXVI, 8.
9. А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина. ЖФХ, 1960, 34, 3.