

**УДАРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
В НИТРОГЛИЦЕРИНЕ**

A. N. Дремин,
O. K. Розанов, C. D. Савров, B. B. Якушев
(Москва)

В настоящее время мало исследован вопрос об условиях возбуждения детонации в нитроглицерине (НГЦ). Известно, что нитроглицерин, способный взрываться от удара молотком, не взрывается иногда при простреле пулей [1] и под действием ударной волны, созданной зарядом ВВ [2]. На процессы, происходящие при инициировании НГЦ, могут оказывать влияние несколько факторов: времена и характер ударного нагружения, размеры и материал оболочки и т. д.

Наиболее достоверные сведения о процессах выделения химической энергии в веществе при ударном нагружении можно получить при исследовании возбуждения детонации ударной волной. В этом случае оказывается возможным получение однородного сжатия и разогрева вещества за характерные для детонации малые времена, а также исключить влияние оболочки. Это позволит также оценить, в какой степени чувствительность нитроглицерина к удару, определяемая при испытаниях на копре, может характеризовать предельные условия возбуждения детонации ударной волной, а также критический диаметр ее распространения.

Процесс возбуждения детонации жидкого ВВ ударной волной наиболее исследован в нитрометане [3, 4]. Установлено, что он имеет многостадийный характер, определяющийся возникновением теплового взрыва в ударно сжатом и нагретом веществе через период индукции. Взрыв происходит за относительно короткое время и вызывает детонацию остального ударно сжатого вещества, которое не успевает самостоятельно взорваться. Эта детонационная волна, которой соответствует «предсвечение», при наблюдении процесса с торца заряда с большой скоростью догоняет фронт инициирующей ударной волны и переходит в нормальную детонацию. При наличии в нитрометане посторонних включений определенного размера, картина качественно меняется — сверхскоростные явления отсутствуют и чувствительность ВВ возрастает.

Нитроглицерин в значительной мере отличается от нитрометана по своим кинетическим и динамическим характеристикам. Особенностью детонации НГЦ является существование двух режимов распространения детонации — с большой и малой скоростью, чего не наблюдается в нитрометане. Кроме того, вследствие большой вязкости он может сдерживать мельчайшие капли воды и воздушные включения, которые могут резко изменить картину инициирования.

В связи с этим заранее не очевидно, является ли многостадийный процесс инициирования характерным для НГЦ.

ИНИЦИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ОБЪЕМЕ

Постановка предпринятых экспериментов ясна из схемы, представленной на рис. 1. Диаметр отверстия в блоке 8, в которое заливался НГЦ, равнялся 60 мм. В экспериментах использовался НГЦ, десенсибилизированный метиловым спиртом, который удалялся двухкратным экстрагированием водой. Готовый продукт сушился в течение нескольких

дней над хлористым кальцием. Свечение процесса фотографировалось с торца заряда при помощи скоростного фоторегистра. Скорость развертки равнялась 3 $\text{мм}/\text{мксек}$. Инициирующий активный заряд обеспечивал создание в инертной преграде, а затем в исследуемом веществе ударной волны с плоским фронтом и нужной амплитудой, которую можно было изменять, подбирая состав и плотность активного ВВ. Диаметр активного заряда был равен 100 мм, длина \approx 1,5 диаметра. С помощью методики, описанной далее, в каждом опыте измерялась скорость ударной волны в инертной преграде, что в последствии дало возможность рассчитать амплитуды давлений ударных волн в НГЦ.

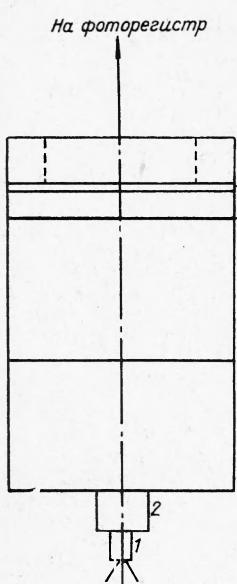


Рис. 1. Схема опытов.
 1 — капсюль; 2 — промежуточный детонатор; 3 — взрывная «линза» для формирования плоского фронта; 4 — активное ВВ; 5 — воздушный зазор; 6, 7 — пlexiglasовые пластины, разделенные воздушным зазором; 8 — блок с нитроглицерином.

Эксперименты показали, что при амплитуде инициирующей ударной волны $\sim 120 \cdot 10^3 \text{ atm}$ в слое НГЦ толщиной 25 мм с некоторой задержкой возникает детонация, тогда как при $\sim 110 \cdot 10^3 \text{ atm}$ инициирования не происходит. Нужно заметить, что значение определенного таким образом порогового давления зависит от профиля инициирующей ударной волны и, следовательно, имеет смысл, строго говоря, только для данной длины и диаметра активного заряда.

Найденный порог инициирования детонации в НГЦ оказался более высоким, чем в таком умеренно чувствительном к удару ВВ, как нитрометан, имеющим, кроме того, большой критический диаметр ($\sim 18 \text{ mm}$ из [5]). Отсюда следует, что величина критического диаметра в НГЦ (2—3 mm по данным работы [6]) отнюдь не характеризует его чувствительность к удару.

Тщательным подбором давления инициирующей ударной волны вблизи порога инициирования удалось получить задержку инициирования $\sim 3 \text{ мксек}$. Соответствующая фоторазвертка (рис. 2) свидетельствует о том, что детонация в НГЦ с нормальной скоростью возбуждается, как в нитрометане, с наличием детонации ударно сжатого вещества («предсвечение»). Отсюда следует, что размер посторонних включений в используемом в этих опытах НГЦ, если такие в нем содержатся, оказался меньше критических значений.

Интересно отметить, что детонация ударно сжатого НГЦ должна иметь очень высокое давление продуктов взрыва (при амплитуде инициирующей ударной волны $\sim 120 \cdot 10^3 \text{ atm}$ оно будет $\sim 500 \cdot 10^3 \text{ atm}$), т. е. большее, чем давление в нормальной детонации всех известных ВВ. Высокие значения параметров этой детонации, по-видимому, можно

использовать для решения некоторых специальных задач. Увеличения времени действия этой волны можно добиться увеличением задержки взрыва посредством подбора параметров активного заряда.

То, что вероятные посторонние включения не искажают многостадийного характера инициирования НГЦ, не исключает возможность локального тепловыделения в создаваемых ими очагах. Для проверки существования этих микроочагов были поставлены опыты с более широкой, чем в предыдущих, щелью фоторегистра с целью выявления относительно слабого свечения.

Схема опыта аналогична предыдущим, однако для увеличения времени ударного нагружения НГЦ высота блока с веществом составляла 90 мм. Амплитуда входящей в НГЦ ударной волны была выбрана ниже порога инициирования и составляла $\sim 100 \cdot 10^3$ атм. Фоторазвертка опыта приведена на рис. 3. НГЦ не взрывается при прохождении ударной волны через весь его объем, в то же время наблюдается система светящихся полос, соответствующих, по-видимому, горению НГЦ в очагах в слое ударно сжатого вещества. С целью исследования влияния этих процессов на поведение ударной волны ниже порога инициирования были предприняты опыты с отражением света от поверхности преграды из плексигласа, покрытой тонким зеркальным слоем алюминия. Схема опыта приведена на рис. 4. В этом случае сборка заряда с НГЦ была подобна представленной на рис. 1, но плексигласовый блок прикрывался стеклянной крышкой. На рис. 5 приведены развертки свечения при амплитуде ударной волны выше порога инициирования.

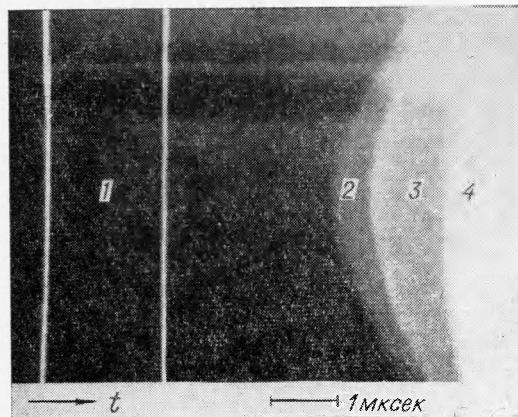


Рис. 2. Фоторазвертка свечения при возникновении детонации.

1 — вспышки воздушных зазоров; 2 — «предсвечение»; 3 — свечение фронта нормальной детонации; 4 — свечение продуктов взрыва в воздухе.

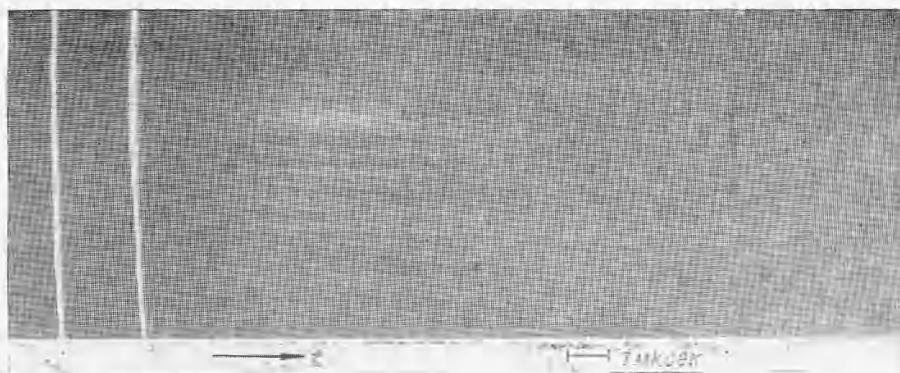


Рис. 3. Фоторазвертка свечения ударно сжатого нитроглицерина ниже порога инициирования.

С момента входа ударной волны слой ударно сжатого вещества остается некоторое время прозрачным, затем отражение от дна исчезает и через некоторое время возникает предсвечение. Это явление, аналогичное наблюдению Кэмпбелла в нитрометане «темной» зоны [3], соответствует, по-видимому, заметному времени формирования детонации ударно сжатого НГЦ под действием теплового взрыва на границе преграды. На рис. 6 представлена фоторазвертка опыта с ударной волной, имеющей давление $100 \cdot 10^3$ atm. В этом случае ударно сжатый НГЦ остается прозрачным в течение прохождения ударной волны через весь объем до верхней стеклянной крышки. Это свидетельствует об относительно небольшом количестве «горячих точек» в ударной волне, и дает основания предположить незначительность влияния их тепловыделения на энергию

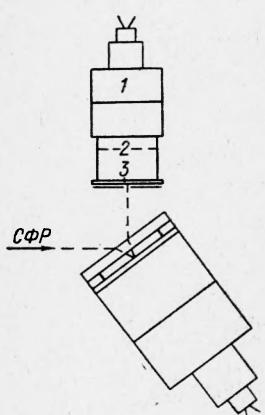


Рис. 4. Схема опытов с отражением света.
1 — заряд ВВ; 2 — фронт ударной волны в аргоне; 3 — диафрагма.

ударной волны. В этом же опыте фоторазвертка во времени изображения щели диафрагмы источника света в поверхности ударной волны позволяет непосредственно убедиться в том, что ударная волна затухает по мере распространения, аналогично затуханию ударных волн в инертных средах.

Эти факты дают возможность провести измерение ударной сжимаемости НГЦ ниже порога инициирования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ

Ударная адиабата необходима для точного расчета давлений ударных волн, распространяющихся в ВВ. Кроме того, ударная адиабата имеет и большое самостоятельное значение. Она позволяет построить уравнение состояния недетонирующего ВВ, рассчитать температуру ударного разогрева и тем самым оценить условия протекания химической реакции в детонационной волне. Имеющиеся в литературе расчетные значения температур разогрева при ударном сжатии НГЦ значительно различаются между собой [7, 8].

Ударная адиабата НГЦ определялась при помощи метода отражения. Этот метод неоднократно использовался как для получения ударных адиабат инертных, так и взрывчатых веществ и подробно изложен в работе [9]. Суть метода заключается в том, что ударные волны известной амплитуды из инертного материала с известной ударной адиабатой переходят в исследуемое вещество. При этом для определения точки ударной адиабаты в исследуемом веществе достаточно измерить только скорость ударной волны.

Схема измерения скорости ударной волны подобна схеме, приведенной на рис. 1. Блок, в который заливался НГЦ, прикрывался сверху прозрачной крышкой, для фиксирования точного момента выхода ударной волны. Инертная преграда (см. рис. 1), блок с НГЦ и крышка изготавливались из плексигласа. База измерения скорости ударной волны равнялась 10 мм, диаметр отверстия в блоке — 60 мм. Диаметр активного заряда, как и в опытах по отражению света, равнялся 100 мм.

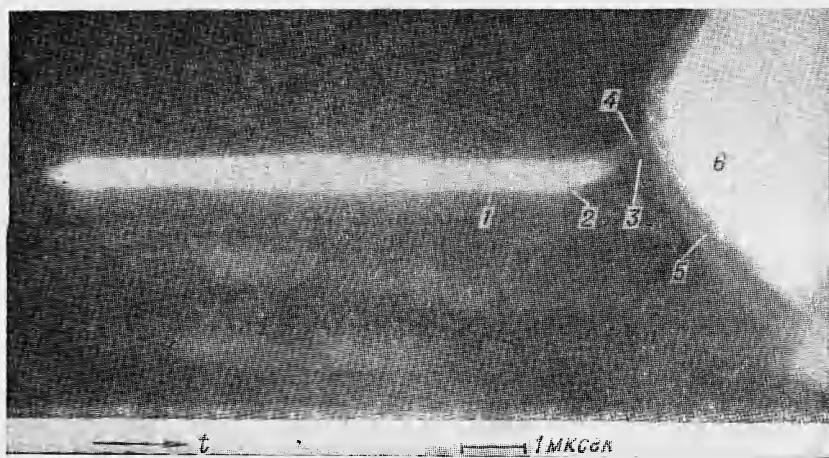


Рис. 5. Фоторазвертка опыта по схеме рис. 4. выше порога инициирования.
1 — отражение от дна; 2 — момент выхода ударной волны в объем; 3 — «темная зона»; 4 — отражение света от фронта ударной волны; 5 — «предсвечение»; 6 — свечение фронта нормальной детонации.

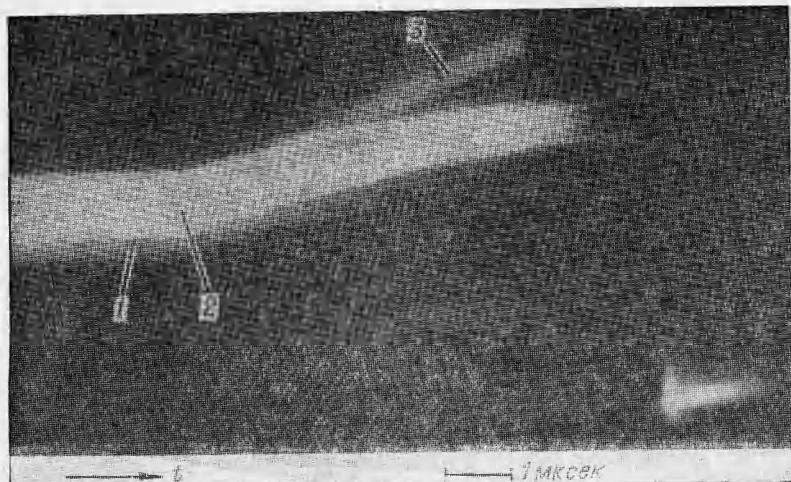


Рис. 6. Фоторазвертка опыта по схеме рис. 4 ниже порога инициирования.
1 — отражение от дна; 2 — момент выхода ударной волны в объем; 3 — отражение света от фронта ударной волны.

Инертная преграда состояла из двух пластин толщиной 10 и 2 мм, между которыми оставлялся тонкий зазор с напыленным тексогеном. Момент выхода ударной волны из НГЦ контролировался по высвечиванию зазора, создаваемого между крышкой и слюдой толщиной 0,02 мм. Свечение продуктов детонации активного заряда экранировалось с помощью алюминиевой фольги толщиной 0,05 мм, которая также отделялась от плексигласа тонким зазором.

Таким образом, на фоторазвертках фиксировалось высвечивание трех зазоров, по которым определялась средняя скорость распространения ударной волны D в плексигласе и НГЦ. Ударная адиабата плексигласа ($\rho_0 = 1,19 \text{ г/см}^3$) известна ($D = 2,68 + 1,61 u$ из [15], где u — массовая скорость в плексигласе), поэтому значение скорости ударной волны определяет все остальные ее параметры в инертной преграде. Ударные волны различной интенсивности в НГЦ создавались отражением от инертной преграды различных детонационных волн.

Отметим, что при регистрации процесса высвечивания зазоров на фоторегистре оказывается возможным строго контролировать отсутствие перекосов фронта ударной волны и возникновения детонации в исследуемом ВВ.

При прохождении ударных волн через инертную среду происходит их затухание, вследствие чего значение истинной скорости волны на границе раздела инертная преграда — НГЦ будет несколько отличаться от измеренного среднего значения. Для оценки затухания ударной волны в плексигласе был поставлен специальный опыт, в котором с помощью описанной методики измерялись средние скорости распространения ударной волны в нескольких, расположенных одна за другой пластинах плексигласа толщиной 5 мм. В результате этого было установлено, что уменьшение скорости волны можно считать линейным и равным 0,5% на 1 мм плексигласа. Это значение затухания ударной волны было принято для расчетов при всех амплитудах ударных волн как в плексигласе, так и в НГЦ. Данные, необходимые для построения ударной адиабаты, сведены в таблицу.

D_0 , км/сек	D_1 , км/сек	u_1 , км/сек	$p_1 \cdot 10^{-9}$, дин/см ²	ρ_1 , г/см ³
4,66	4,18	1,14	76	2,20
4,85	4,31	1,25	86	2,26
4,95	4,36	1,31	91	2,29
5,24	4,67	1,47	111	2,32
5,34	4,86	1,52	118	2,33
5,38	4,77	1,56	119	2,38

П р и м е ч а н и е. Здесь D_0 и D_1 — измеренные скорости ударной волны с учетом затухания в плексигласе и НГЦ; u_1 , ρ_1 , p_1 — соответственно рассчитанные величины массовой скорости, давления и плотности НГЦ.

Несмотря на ошибками при обработке фоторазверток и при оценке затухания ударной волны в плексигласе и НГЦ.

Знание ударной адиабаты НГЦ (1) дает возможность оценить давление на ударном фронте детонационной волны. Для этого полученную ударную адиабату нужно проэкстраполировать до пересечения с прямой Михельсона. Скорость детонации НГЦ в нормальном режиме составляет 7,65 км/сек [10]. В результате экстраполяции получено значение давления $\sim 400 \cdot 10^3 \text{ atm}$. Отношение давления на фронте детона-

Оказалось, что полученная зависимость между D_1 и u_1 линейна в пределах от $\sim 76 \cdot 10^3$ до $\sim 120 \cdot 10^3 \text{ atm}$ и хорошо описывается эмпирическим уравнением

$$D_1 = 2,24 + 1,66 u_1. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что экспериментальные точки ударной адиабаты в D — u -координатах имеют разброс по скорости D относительно прямой (1), не превышающий 2%. Он определяется в основ-

ционной волны к давлению продуктов взрыва в точке Чепмена — Жуге, найденное в работе [11] и равное $\sim 250 \cdot 10^3$ atm, составляет 1,6, что совпадает с результатами других исследований [12—14].

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что инициирование нормальной детонации НГЦ в объеме происходит по механизму, обнаруженному ранее в нитрометане.

Для более полного представления об условиях возбуждения детонации в НГЦ важно выяснить вопрос о том, каким способом возбуждается нормальная детонация при наличии стенок. Наиболее важно

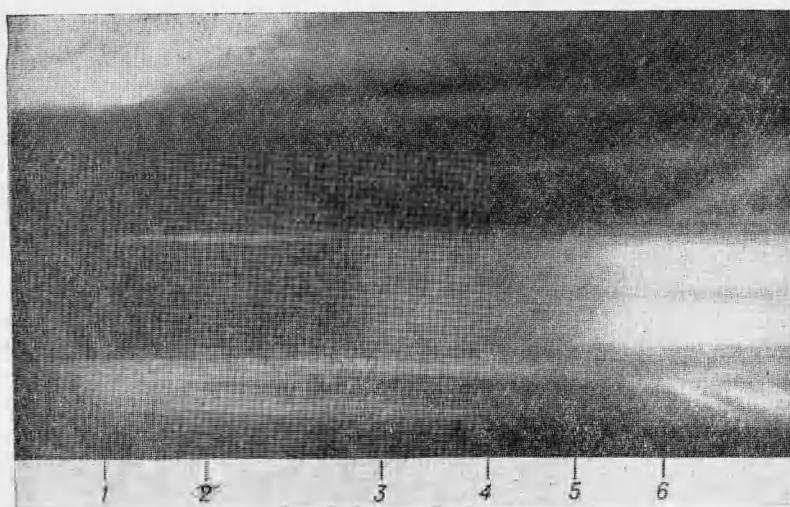


Рис. 7. Фоторазвертка опыта по инициированию детонации в стеклянной трубке.

1 — момент выхода ударной волны; 2—6 — зоны с различным свечением.

установить порог инициирования в этих условиях и картину переходных процессов, предшествующих образованию нормальной детонационной волны. На рис. 7 приведена фоторазвертка с торца заряда по инициированию детонации в НГЦ, содержащегося в стеклянной трубке с внутренним диаметром 16 мм и толщиной стенок $\sim 1,5$ мм. Амплитуда входящей в НГЦ ударной волны составляла $\sim 25 \cdot 10^3$ atm. Поскольку диаметр стеклянной трубки невелик, эта относительно слабая ударная волна еще более затухает по давлению через 2—3 мксек за счет боковой разгрузки. Тем не менее, как видно из рис. 7, детонация с нормальной скоростью возникает через ~ 15 мксек. Приведенная фоторазвертка резко отличается от развертки процесса при инициировании детонации в объеме (см. рис. 2). Хорошо видно, что после входа ударной волны наблюдается несколько различных по своей интенсивности и продолжительности свечений по всему диаметру заряда, среди которых можно видеть, по крайней мере, пять отдельных участков. Отсюда можно заключить, что возбуждение нормальной детонации в НГЦ, содержащемся в оболочке, носит более сложный характер, требующий дальнейшего исследования.

Поступила в редакцию
11/VI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Zippertaug. Explosivstoffe, 1955, 3, 25.
2. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1961, 140, 1.
3. A. W. Satterfield, W. E. Davis, J. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 7, 4.
4. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, А. Н. Андреевский. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.
5. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов. ПМТФ, 1963, 1.
6. Р. Х. Курбангалина. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, 1947.
7. С. Б. Ратнер. ЖФХ, 1946, 20, 11, 1377.
8. H. L. Selberg. Appl. Sci. Res., 1956, A5, 6, 450.
9. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник. ЖЭТФ, 1958, 34, 4, 886.
10. А. Ф. Беляев, В. М. Караваев, А. Н. Азбукина. Сб. «Физика взрыва», № 5, 1955.
11. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1959, 128, 5.
12. В. С. Илюхин, П. Ф. Похилидри. Докл. АН СССР, 1960, 133, 4, 793.
13. А. Я. Апин, Л. Н. Стесик, Н. С. Шведова. Докл. АН СССР, 1961, 137, 908.
14. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Изв. АН СССР, ОХН, 1964, 8, 1513.
15. G. E. Hauver. J. Appl. Phys., 1965, 36, 2113.