



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Ф. Беляев, М. А. Садовский, И. И. Тамм, Применение закона подобия при взрывах к явлению передачи детонации,
Прикл. мех. техн. физ., 1960, том 1, выпуск 1, 3–17

<https://www.mathnet.ru/pmtf9542>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.173

15 мая 2025 г., 03:58:10



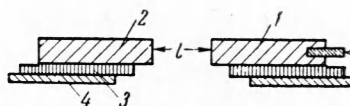
ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА ПОДОБИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ К ЯВЛЕНИЮ ПЕРЕДАЧИ ДЕТОНАЦИИ

А. Ф. Беляев, М. А. Садовский, И. И. Тамм

(Москва)

Известно, что детонация заряда взрывчатого вещества (ВВ) может вызвать детонацию другого заряда, находящегося неподалеку. Это явление обычно называют передачей детонации или детонацией через влияние. Заряд, в котором первоначально возникает детонация, называется активным или передающим, а заряд, которому передается детонация, называется пассивным или воспринимающим.

Фиг. 1. Схема опытов Бюро по передаче детонации. 1 — активный заряд, 2 — пассивный заряд, 3 — свинцовые подкладки, 4 — стальные плиты

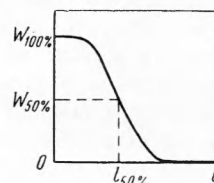


Явление передачи детонации, весьма важное в практическом отношении, а также представляющее значительный научный интерес, изучалось многими исследователями [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Для всех ранее проведенных исследований в области передачи детонации характерно следующее:

1. Применение цилиндрических обычно удлиненных зарядов.
2. Расположение зарядов торцами друг к другу.
3. Отсчет расстояний передачи от торца активного до торца пассивного заряда так, как это показано на фиг. 1.

Уже в первых исследованиях передачи детонации был установлен вероятностный характер явления. Расстояния передачи детонации и расстояния отсутствия передачи не отделены резкой границей. В довольно широких пределах расстояния между зарядами при проведении ряда опытов возможны как передача детонации, так и отсутствие передачи. Характер изменения вероятности передачи детонации с расстоянием схематически показан на фиг. 2, где по оси абсцисс отложены расстояния между зарядами l , а по оси ординат — вероятность передачи w .



Фиг. 2. Схема зависимости вероятности передачи детонации от расстояния

Важнейшим результатом проведенных ранее работ, и прежде всего фундаментальных исследований Бюро [1], было установление связи между расстоянием передачи детонации R и весом активного заряда C .

Согласно Бюро, для расстояний, соответствующих 50% вероятности передачи,

$$R_{50} = k\sqrt{C} \tag{1}$$

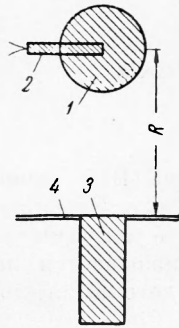
Аналогичное соотношение приводится и для расстояний безопасных R_0 по передаче детонации в «Единых правилах безопасности при ведении взрывных работ»

$$R_0 = k\sqrt{C} \tag{2}$$

Коэффициент k формулы (2), соответствующий условию отсутствия передачи, должен быть больше k формулы (1).

Существенное внимание в ранее выполненных работах по изучению передачи детонации уделялось также вопросу о механизме передачи детонации. Механизм этот сложен, но вместе с тем несомненно, что основными факторами, обеспечивающими передачу детонации от заряда к заряду, является ударная волна и поток расширяющихся продуктов взрыва.

Было также показано, что при определенных условиях и, в частности, при наличии у активного заряда оболочки передача детонации может осуществляться осколками оболочек: попадание хотя бы одного осколка может вызвать детонацию пассивного заряда. Ниже использовались заряды без оболочки или с весьма слабой оболочкой и эффекты осколков не рассматриваются.



Фиг. 3. Основной вариант опытов по передаче детонации, использованный в данной работе. 1 — активный (сферический) заряд; 2 — электродетонатор; 3 — пассивный заряд; 4 — экран

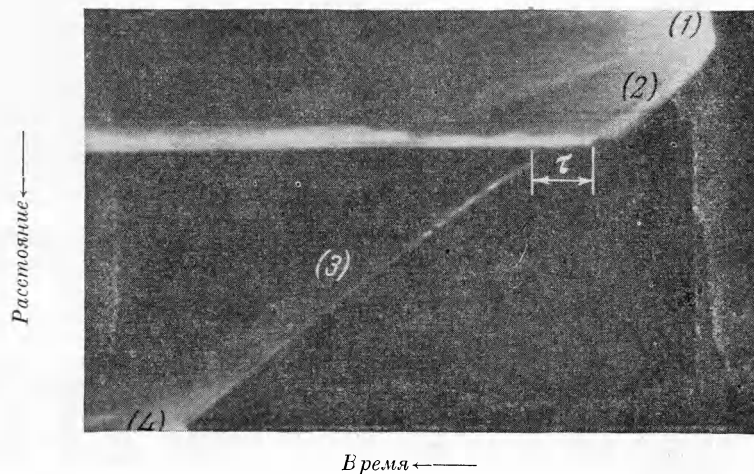
Несмотря на значительное количество работ, вопрос о параметрах, определяющих дальность передачи детонации, далеко не является исчерпанным. Необходимо с самого начала иметь в виду, что для активного и пассивного зарядов основные параметры передачи детонации являются различными. Для пассивного заряда важна его чувствительность, связанная с величиной критического диаметра: чем меньше критический диаметр, определяемый согласно Харитону [8] временем реакции во фронте детонационной волны, тем выше чувствительность ВВ, тем на большее расстояние может быть передана детонация данному пассивному ВВ от одного и того же активного заряда. По предложению Апина исследование передачи детонации от постоянного активного заряда разным пассивным зарядам может дать и действительно дает существенный материал о чувствительности ВВ, особенно в тех случаях, когда речь идет о зарядах такой структуры, таких свойств, при которых трудно использовать стандартную пробу определения чувствительности (копер Каста).

Вместе с тем до сих пор не ясно, какая характеристика активного заряда является основной с точки зрения передачи детонации; как увидим далее, даже основной закон для расстояния передачи $R = k\sqrt{C}$, где C — вес активного заряда, вызывает сомнение.

Основной задачей данного исследования является уточнение вопроса об основном параметре активного заряда, определяющем дальность передачи детонации. При установлении такого параметра будем исходить из закона подобия при взрывах в его энергетической интерпретации [10]. При этом естественно в качестве активных зарядов использовать заряды сферической формы: именно для таких зарядов законы распространения ударных волн и расширения продуктов взрыва являются наиболее простыми и детально исследованными. На фиг. 3 дана основная схема расположения зарядов в наших опытах. Наверху активный заряд сферической формы с электродетонатором; внизу пассивный заряд цилиндрической формы; вровень с верхним торцом пассивного заряда располагается отражающий экран (о роли этого экрана см. далее). В соответствии с принятым в законе подобия, расстояния отсчитываются от центра активного заряда до поверхности пассивного заряда, на которую воздействует ударная волна или поток продуктов взрыва.

Подрыв зарядов проводился в специальной взрывной камере, оборудованной смотровыми окнами. Явление взрыва и передача детонации регистрировались скоростным зеркальным фоторегистром СФР-2 [9].

На фиг. 4 приведен характерный снимок явления передачи детонации от сферического заряда литого ТГ (тротил-гексоген) 50/50 весом 23 г (диаметр 30 мм) цилиндрическому заряду порошкообразного ТГ 50/50 плотностью 1.0 г/см³ на расстояние 37 мм. Снимок произведен СФР-2 в варианте фоторегистра с непрерывной разверткой при линейной скорости развертки 1500 м/сек. Линия 1 на снимке фиг. 4 — свечение детонации сферического активного заряда (электродетонатор углублен в заряд:



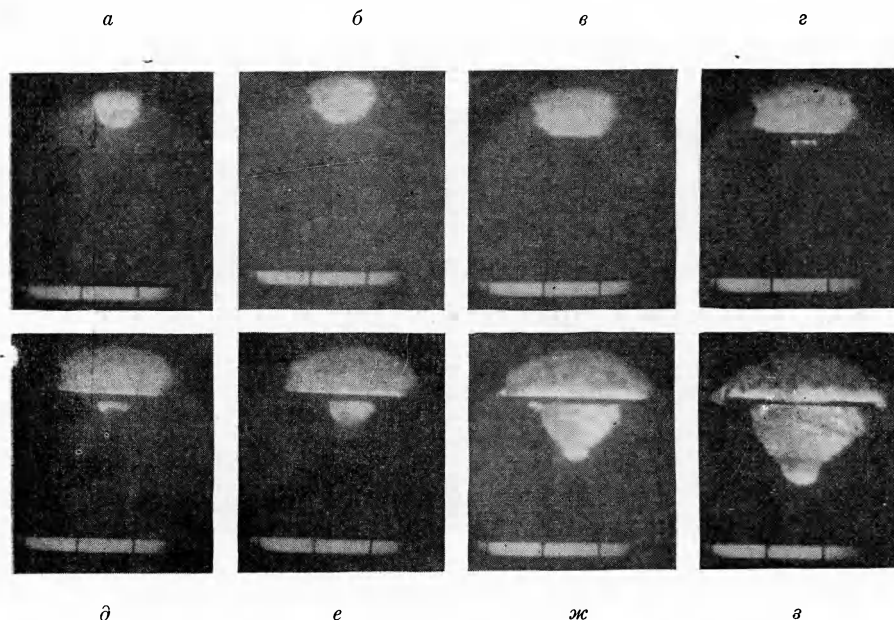
Фиг. 4. Запись явления передачи детонации в варианте фоторегистра. 1 — свечение детонации активного заряда, 2 — свечение расширяющихся продуктов взрыва активного заряда, 3 — свечение детонации пассивного заряда, 4 — свечение струи продуктов взрыва, вылетающих с торца пассивного заряда

детонация возникает в центре и выходит на поверхность заряда практически одновременно; именно поэтому мы получаем почти вертикальную линию). Линия 2 — свечение расширяющихся продуктов взрыва активного заряда. Примерно на середине расстояния сверху вниз находится верхний торец пассивного заряда и экрана. В результате отражения продуктов взрыва от поверхности заряда и экрана получается длительное свечение в виде горизонтальной линии. Линия 3 — свечение детонации пассивного заряда. Из фиг. 4 видно, что контакт продуктов активного заряда с поверхностью пассивного заряда не вызывает мгновенной детонации последнего.

Детонация пассивного заряда происходит с некоторой задержкой τ , которая может быть измерена непосредственно по фотографии. Соответствующие данные см. ниже. Необходимо отметить, что без экрана расшифровка снимка была бы крайне трудной: свечение продуктов взрыва охватило бы пассивный заряд, и детали возникновения детонации в нем были бы трудно различимыми.

На фиг. 5 показаны фотографии, полученные СФР-2 в варианте лупы времени, при съемке процесса передачи детонации от сферического заряда литого ТГ весом 135 г (диаметр заряда 54 мм) цилиндрическому заряду насыпного ТГ 50/50 плотностью 0.9. Расстояние R от центра активного заряда до поверхности пассивного 127 мм. Масштаб расстояний дается масштабной линейкой внизу каждого кадра; расстояние между двумя метками масштабной линейки составляет 100 мм. Под каждым кадром указано время в микросекундах от момента взрыва активного заряда. Через 8 мксек продукты взрыва активного заряда подходят к поверхности пассив-

ного заряда и экрана; через 12 *мксек* отчетливо видно их торможение из-за отражения; через 16 *мксек* видно начало свечения детонации пассивного заряда. Хотя снимки в варианте лупы времени более наглядны, но при необходимости оценки скоростей, времен задержки и т. д. предпочтительнее запись в варианте фоторегистра.



Фиг. 5. Запись явления передачи детонации в варианте лупы времени. *a* — 4 *мксек*; *б* — 8 *мксек*; *в* — 12 *мксек*; *г* — 16 *мксек*; *д* — 20 *мксек*; *е* — 24 *мксек*; *ж* — 32 *мксек*; *з* — 40 *мксек*]

При помощи указанной выше методики были проведены обширные исследования явления передачи детонации « прежде всего определение расстояния передачи детонации для различных ВВ; при этих исследованиях менялся состав как активных, так и пассивных зарядов.

При использовании сферических активных зарядов вероятностный характер явления передачи детонации полностью сохраняется, поэтому, следуя Бюрло, в качестве основного расстояния передачи детонации мы принимали то расстояние, на котором вероятность передачи детонации составляла 50%.

Некоторые из полученных данных приведены в табл. 1. В качестве ВВ пассивных зарядов использовались:

1) гексоген плотностью 1.0 (активные заряды: ТГ 50/50, гексоген плотностью 1.43 и гексоген плотностью 1.1),

2) ТГ 50/50 плотностью 1.0 (активные заряды: литой ТГ 50/50, порошкообразный ТГ 50/50, аммонит-6 — смесь 80% ам. селитры и 20% тротила),

3) аммонит-6 (активные заряды: ТГ 50/50 литой, гексоген $\rho = 1.43$, гексоген $\rho = 1.1$).

Во втором столбце таблицы указаны веса активных зарядов C . В третьем столбце таблицы приведены значения C_0 — значение тротилового эквивалента, т. е. значение веса тротила, энергия взрыва которого равна энергии взрыва данного заряда. В простейшем случае

$$C_0 = C\varepsilon/\varepsilon_{\text{ТГТ}}$$

Здесь $\varepsilon_{\text{ТГТ}}$ — удельная теплота взрыва тротила и ε — удельная теплота взрыва данного ВВ. В качестве $\varepsilon_{\text{ТГТ}}$ принимается обычно значение

1000 ккал/кг, соответствующее тротилу большой плотности. Величина C_9 характеризует содержание энергии в заряде.

В данной работе использовались сравнительно малые заряды ВВ. Известно [10], что для таких зарядов часть ВВ разбрасывается и энергия ее не используется; «работающей» активной частью является вес, C^* меньший, чем полный вес. Для оценки активного веса C^* были проведены специальные опыты по измерению скорости разлета продуктов вблизи от зарядов, значительно различающихся по весу, с последующей обработкой результатов методами закона подобия. Было установлено,

Таблица 1

Расстояние передачи детонации

R_{50} — расстояние, соответствующее 50% вероятности, $R_{50}^{\circ} = R_{50} (C_9^*)^{-1/3}$ — приведенное расстояние 50% вероятности, $R_{\text{ср}}^{\circ}$ — среднее значение, в скобках под ними — максимальное отклонение от среднего в %

Активный заряд	$C, \text{ г}$	$C_9, \text{ г}$	$C_9^*, \text{ г}$	$R_{50}, \text{ см}$	$R_{50}^{\circ}, \text{ м/кг}^{1/3}$	$R_{\text{ср}}^{\circ}$
Пассивный заряд — гексоген $\rho = 1.0$						
ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	135	154	154	19.6	0.365	0.37 (8.0)
	23	26	26	11.6	0.390	
Гексоген $\rho = 1.43$	46	58.5	58.5	15.0	0.390	
Гексоген $\rho = 1.1$	50	64	55	12.9	0.340	
Пассивный заряд — ТГ 50/50 $\rho = 1.0$						
ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	23	26	26	6.3	0.243	0.20 (6.5)
ТГ 50/50 $\rho = 0.9$	22	22.7	19	5.1	0.190	
Ам. 6 $\rho = 0.9$	135	135	22	5.5	0.197	
Пассивный заряд — аммонит-6 $\rho = 1.0$						
ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	135	154	154	9.4	0.176	0.177 (1.7)
	23	26	26	5.2	0.176	
Гексоген $\rho = 1.43$	46	58.5	58.5	7.0	0.180	
Гексоген $\rho = 1.1$	50	64	55	6.6	0.174	

что в случае литого ТГ 50/50 и гексогена $\rho = 1.43$ разбросом вещества можно пренебречь и поправку на разброс не вводить; в случае гексогена $\rho = 1.1$ поправка становится существенной; большая величина поправки для медленно реагирующего аммонита связана с тем, что энергия, определяющая разлет продуктов вблизи от заряда, составляет малую часть потенциальной энергии взрыва (на значительных расстояниях от заряда доля энергии аммонита, превращающаяся в работу, значительно возрастает).

После того как проведена оценка «активного» веса C^* , можно вычислить фактический тротильный эквивалент

$$C_9^* = C^* \varepsilon / \varepsilon_{\text{ТНТ}} \quad (3)$$

соответствующее значение приведено в столбце 4 табл. 1. В столбце 5 табл. 1 представлено измеренное значение расстояния R_{50} , соответствующее 50% вероятности передачи. В таблице даны значения

$$R_{50}^{\circ} = R_{50} / \sqrt[3]{C_9^*} \quad (4)$$

т. е. приведенные расстояния, соответствующие 50% вероятности передачи детонации.

Из данных табл. 1 видно, что для пассивных зарядов, изготовленных из разных ВВ, приведенные расстояния различны. Однако для пассивных зарядов из одного и того же ВВ приведенные расстояния в пределах ошибок опыта являются практически одинаковыми, несмотря на значительную разницу в весе и в свойствах ВВ активных зарядов.

Из закона подобия следует, что одинаковым приведенным расстояниям R° соответствуют одинаковые значения максимального давления ударной волны и потока продуктов взрыва, а также одинаковые значения скоростей распространения ударных волн и расширения продуктов взрыва.

Сопоставляя этот неоднократно проверенный на опыте вывод закона подобия с тем фактом, что для пассивного заряда с постоянными свойствами приведенные расстояния 50% передачи детонации при использовании разных активных зарядов являются практически одинаковыми, мы приходим к важному выводу о том, что передача детонации связана со значением величины давления ударной волны.

Для каждого пассивного заряда, изготовленного из определенного ВВ данной плотности и структуры, существует определенное давление p_k ударной волны, обеспечивающее 50% вероятности передачи. Если $p > p_k$, вероятность возникновения детонации пассивного заряда значительна; при $p \geq p_k$ передача детонации будет иметь место при каждом опыте. Если $p < p_k$, вероятность возникновения детонации пассивного заряда мала; при $p \leq p_k$ передача будет отсутствовать полностью.

Для пассивных зарядов разных ВВ разной плотности и структуры значения p_k будут различными: чем менее чувствительным является заряд, тем больше необходимое значение p_k .

Зная значение R° для данного пассивного заряда, можно попытаться оценить абсолютное значение давления p_k , необходимое для возбуждения детонации. К сожалению, эта оценка не является простой и достаточно надежной. При больших значениях R° и относительно малых давлениях (до 10—20 кг/см²) существует надежная зависимость $\Delta p = f(R^\circ)$, неоднократно проверенная на опыте в разных условиях [10]. В принятых условиях значения R° относительно малы, значения p_k , как увидим далее, велики, и для этих условий сколько-нибудь надежная связь отсутствует. Некоторые значения давлений в интересующем нас диапазоне были измерены А. И. Коротковым [11]; эти значения в дальнейшем будут использованы, однако они далеко не являются исчерпывающими.

Для ориентировочной оценки значений давления могут быть использованы результаты работы И. И. Тамм и Ю. Н. Рябинина, в которой было проведено значительное количество измерений скорости разлета продуктов для различных зарядов и в том числе для интересующих нас ВВ (ТГ 50/50, аммонит-6 и т. д.) [12]. И. И. Тамм и Ю. Н. Рябинин использовали заряды значительно различающихся весов, что позволило им оценить величину разбрасываемого слоя i , следовательно, оценить «активно работающий» вес заряда S^* и отсюда фактический эквивалент S_3^* . В результате этой работы ими была установлена зависимость $i(R^\circ)$ — скорости разлета продуктов от фактического тротилового эквивалента для интересующих нас систем. В соответствии с законом подобия для разных зарядов, но для одинаковых приведенных расстояний скорости разлета оказались практически одинаковыми. При изменении R° скорости разлета меняются, причем закон этого изменения существенно отличается от закона изменения давлений. Однако если для некоторого R° известно значение скорости разлета i , то для этого же R° может быть вычислено значение давления. В начальной стадии разлета продуктов ударная волна и продукты взрыва движутся вместе: скорость распространения ударной волны D практически равна скорости разлета продуктов i .

Для подсчета давлений в ударной волне по известной скорости фронта были использованы данные Селиванова, который в своей работе произвел

расчет параметров сильной ударной волны при переменном $\gamma = c_p/c_v$.

Ударная волна, подходя к пассивному заряду, наталкивается на его поверхность и отражается. При этом давление в волне, действующей на пассивный заряд, значительно возрастает. Поэтому в качестве характеристики давления, действующего на пассивный заряд, было выбрано давление отражения. Правда, определенное таким образом давление относится к ударной волне, а при отражении продуктов взрыва, двигающихся вслед за ударной волной, давление может отличаться. Тем не менее, таким способом может быть оценен порядок величины так же, как и соотношение между давлениями, необходимыми для различных пассивных зарядов.

Используя расчетные данные Селиванова, нами были также оценены температуры в отраженных волнах, вызывающих детонацию различных пассивных зарядов. Необходимо указать, несмотря на то, что эти температуры получены для ударных волн без учета действия продуктов взрыва, они могут все-таки давать некоторое представление о разогреве в волне, вызывающей детонацию, и наряду с давлениями могут служить методом сравнения чувствительности различных пассивных зарядов.

Таблица 2

Ориентировочные значения давлений p атм и температур T° К, необходимых для передачи детонации
(v — скорость фронта ударной волны $v_{\text{ср}}$ — ее среднее значение)

Пассивный заряд	Активный заряд	v , м/сек	$v_{\text{ср}}$, м/сек	p , атм	T° К
Гексоген $\rho = 1.0$	ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	2750	2650	650	5500
	Гексоген $\rho = 1.43$	2600			
	Гексоген $\rho = 1.1$	2550			
ТГ 50/50 $\rho = 1.0$	ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	3800	3850	1800	10000
	ТГ 50/50 $\rho = 0.9$	4000			
	АМ-6 $\rho = 0.9$	3800			
АМ-6 $\rho = 1.0$	ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	4100	4100	2100	11000
	Гексоген $\rho = 1.43$	4100			
	Гексоген $\rho = 1.1$	4000			

В табл. 2 в столбце 3 даны скорости фронта ударной волны активных зарядов, соответствующие 50% вероятности возбуждения пассивного заряда, указанного в столбце 1. В соответствии с близкими значениями приведенных расстояний R° близкими оказываются и скорости фронта ударной волны, необходимые для осуществления 50% вероятности передачи детонации. В столбце 4 даны средние значения скорости фронта для каждого вида пассивного заряда, а в столбце 5 приведены соответствующие средние значения давлений (при отражении), необходимые для 50% вероятности возбуждения детонации. В столбце 6 приведены температуры разогрева фронта ударной волны, отраженной от поверхности пассивного заряда.

Сравним полученные нами значения давлений с опытными значениями, определенными Коротковым [11]. По нашим расчетам для 50% вероятности передачи детонации порошкообразному гексогену необходимо давление (при любых активных зарядах) около 600 атм. По данным Короткова на приведенных расстояниях, соответствующих 50% вероятности передачи детонации, давление отражения составляет 400 атм. По нашим данным для порошкообразного ТГ 50/50 необходимо давление 1800 атм, в то время как по Короткову на соответствующем приведенном расстоянии давление равно 1100 атм. Наконец, для аммонита-6, по нашим данным, давление 2100 атм, а по Короткову оно 1600 атм.

Данные Короткова систематически дают несколько меньшие значения давлений, что, впрочем, не удивительно, так как использованный Коротковым метод Гопкинсона по своей сущности должен давать несколько заниженные значения. С другой стороны, в нашем методе подсчета, использующем идеальные соотношения, значения давлений должны получаться несколько больше истинных. Во всяком случае, сравнение с данными, полученными Коротковым, показывают, что вычисленные нами значения давлений не должны значительно отличаться от истинных и могут быть приняты в качестве ориентировочных.

Помимо указанных в табл. 1 и 2 пассивных зарядов были также проведены оценочные опыты по передаче детонации зарядам других ВВ. Приведем данные о соответствующих давлениях, необходимых для осуществления 50% вероятности передачи детонации.

Для пассивного заряда аммонита-6 плотностью 0.8 необходимо давление 1800 *атм* (вместо 2100 для $\rho = 1.0$); для пассивного заряда литого ТГ 50/50 давление должно быть порядка 11 000 *атм* (вместо 1800 *атм* для порошкообразного)¹; отметим также, что температура в волне, вызывающей детонацию литого ТГ 50/50, должна быть порядка 25000° К вместо 10000° для порошкообразного.

Для жидкого нитроглицерина давление 900 *атм*, т. е. несколько выше, чем у порошкообразного гексогена. Если учесть, что нитроглицерин жидкий (см. выше разницу между ТГ 50/50 литым и порошкообразным), то следует сделать вывод, что при одинаковом физическом состоянии нитроглицерин должен быть значительно чувствительней гексогена; наконец, для порошкообразного (слегка подпрессованного) азида свинца необходимое давление 25—35 *атм*, т. е. значительно ниже, чем для всех прочих систем, что совершенно естественно, принимая во внимание весьма высокую чувствительность азида свинца.

Как уже отмечалось выше, использование фоторегистрации дает возможность определить период задержки возникновения детонации — время τ между моментом подхода ударной волны к поверхности пассивного заряда и моментом возникновения детонации.

Установлено, что в условиях 50% вероятности передачи детонации фиксируемый нами период задержки вспышки составляет 10—20 *мксек* для гексогена и для ТГ 50/50 и 30 *мксек* для аммонита-6. Если заряды находятся на более близких расстояниях, чем $R^{\circ}_{50\%}$ (соответственно давление ударной волны выше и вероятность возникновения детонации 80—100%), то время τ для гексогена и ТГ 50/50 порядка нескольких микро-секунд, а для аммонита-6 10—15 *мксек*.

Из того факта, что разные по весу активные заряды обеспечивают передачу детонации при одинаковых R° и p , можно сделать вывод, что за время 10—20 *мксек* давление во фронте ударной волны не успевает сколько-нибудь значительно уменьшиться; в противном случае заряды меньшего веса осуществляли бы 50% вероятности передачи детонации на меньшем R° .

Нами были поставлены контрольные опыты по передаче детонации от весьма малых активных зарядов. На одинаковых приведенных расстояниях R° длительность волны сжатия должна быть пропорциональной корню кубическому из веса заряда $t \sim C^{1/3}$. Сравнивались активные заряды тэна весом 50 г и заряды тэна весом всего лишь 1 г. Плотность зарядов была 1.5 г/см³. В качестве пассивных зарядов в этих опытах использовались заряды аммонита-6, имеющие сравнительно большой период задержки τ . Оказалось, что 1 г заряда обеспечивает 50% вероятности передачи детонации на приведенном расстоянии, в 1,5 раза меньшем (следовательно, при значительно большем максимальном «пиковом» давлении

¹ Эти данные ориентировочные, полученные из предположения, что γ в проходящей и отраженной волне одинакова.

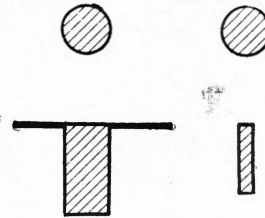
ударной волны), чем 50 г заряда. Это кажущееся отклонение от выполнения закона подобия естественно объяснить весьма малой длительностью воздействия при использовании 1 г зарядов. Ударная волна 23 г зарядов литого ТГ 50/50 имеет меньшую длительность и давления за фронтом у нее падают быстрее, чем у 135 г заряда литого ТГ 50/50. Но для развития детонации требуется время τ всего 10–20 мксек. За это время, очевидно, даже у 23 г зарядов ТГ 50/50 давление не успевает упасть сколько-нибудь значительно. Напротив, у 1 г зарядов тэна давление за фронтом ударной волны падает столь быстро, что за 10–20 мксек успевает снизиться весьма значительно, что и приводит в конечном итоге к необходимости для обеспечения передачи детонации использовать меньшие приведенные расстояния и большие давления.

Изложим еще одну вспомогательную серию опытов, в которой снижение времени воздействия высокого давления достигалось несколько иным методом. На фиг. 6 слева дана обычная использованная нами схема расположения зарядов. Диаметр пассивного заряда 30 мм; кроме того, воспринимающий торец заряда снабжен экраном. Справа показан заряд диаметром 10 мм без экрана. При использовании гексогена (в качестве пассивного заряда) диаметр 10 мм еще далек от критического и детонация его должна быть полноценной. Но при отражении ударной волны от ограниченной поверхности должен быстро возникнуть режим обтекания, в результате чего давление на поверхности заряда должно быстро снизиться. Ориентировочно время обтекания $\tau_{обт} \sim d/2c$, где d — диаметр отражающей поверхности и c — местная скорость звука [10]. Опытами было установлено, что при передаче детонации заряду, показанному справа, приведенное расстояние 50% вероятности показывает некоторую тенденцию к снижению, которую естественно объяснить быстрым падением давления. По нашей оценке время обтекания заряда диаметром 10 мм $\tau_{обт} \sim 10$ мксек, что весьма близко к указанному выше значению времени возникновения детонации (~ 20 мксек). Если 10 мм пассивный заряд снабдить отражающим экраном, то приведенное расстояние 50% вероятности передачи детонации для него становится практически одинаковым с приведенным расстоянием для 30 мм заряда.

Таким образом, кажущееся отклонение от простых соотношений закона подобия имеет место лишь в тех случаях, когда тем или иным путем создаются такие условия, что давление за фронтом ударной волны успевает значительно упасть за время порядка 10 мксек. В условиях наших опытов для исследованных веществ при весах активных зарядов в десятки граммов и более и при диаметрах пассивного заряда 30 мм и более за время порядка 10–20 мксек давление не успевает снижаться сколько-нибудь значительно.

Из всего изложенного выше можно сделать следующие выводы. Если за время, необходимое для развития детонации в пассивном заряде (это время можно назвать критическим временем t_k), падение давления невелико, то возникновение детонации определяется величиной критического давления p_k ; время в этом случае не входит в явном виде именно потому, что фактическое время воздействия превосходит t_k . Если время действия высокого давления меньше t_k , то это должно быть компенсировано соответствующим увеличением давления. Возможно, что в некоторых условиях вероятность возникновения детонации будет определяться не значением давления, а импульсом некоторой головной части ударной волны.

Рассмотрим теперь результаты опытов, полученных с активными зарядами цилиндрической формы. Как уже отмечалось выше, основные опыты



Фиг. 6. Передача детонации заряду без экрана (справа)

были проведены со сферическими активными зарядами. Именно для таких зарядов известно $u(R^\circ)$, что дает возможность вычислить необходимое давление p_k .

Таблица 3

Расстояния передачи детонации от цилиндрических зарядов (в направлении торца)

R_{50} — расстояние, соответствующее 50% вероятности передачи детонации;
 $R_{50}^0 = R_{50}(C_9^*)^{-1/3}$ — приведенное согласно кубической зависимости;
 R_{cp}^0 — среднее; $R' = R_{50}(C_9^*)^{-1/2}$ — приведенное согласно квадратичной

Активный заряд	d , мм	C , г	C_9^* , г	R_{50} , см	R_{50}^0	R_{cp}^0	R'
Пассивный заряд — гексоген $\rho=1.0$							
ТГ 50/50	25	20	22.8	26.2	0.92	0.92	1.73
$\rho = 1.68$	50	164	187	52.5	0.92		1.22
Пассивный заряд — ТГ 50/50 $\rho=1.0$							
ТГ 50/50	30	21	16.4	10.7	0.42	0.43	0.84
$\rho = 1.0$	60	170	151	23.5	0.44		0.61
ТГ 50/50	25	20	22.8	17.0	0.60	0.59	1.12
$\rho = 1.68$	40	82	93.5	26.4	0.58		0.87
Пассивный заряд — аммонит-6 $\rho = 0.8$							
ТГ 50/50	25	20	22.8	16.2	0.57	0.55	1.07
$\rho = 1.68$	50	164	187	30.0	0.52		0.69

В табл. 3 приведены данные, полученные для цилиндрических зарядов разного веса с высотой h , равной диаметру d при условии, что активный заряд обращен к пассивному торцом (обычное расположение). Расстояние отсчитывается от центра активного заряда.

В столбце 8 таблицы дана величина

$$R' = R_{50} / \sqrt{C_9^*}$$

Если бы формула Бюрло $R_{50} = k\sqrt{C}$ хорошо описывала результаты наших опытов, то для определенного пассивного заряда при изменении веса активного заряда величина R' должна была бы оставаться постоянной. В действительности из данных таблицы следует, что величина R' при изменении веса заряда существенно меняется. При изменении веса активного заряда, так же как в случае сферических зарядов, постоянной является величина приведенного расстояния

$$R_{50}^0 = R_{50} / \sqrt[3]{C_9^*}$$

Подчеркнем различия между количественными зависимостями в случае сферического и цилиндрического зарядов. При использовании сферического заряда ударная волна является симметричной (исключая некоторую асимметрию, связанную с направлением электродетонатора). При взрыве зарядов цилиндрической формы распространение продуктов взрыва, также как и ударной волны, является направленным

Предположим, что на некотором расстоянии от сферического заряда наблюдается давление p_k . Возьмем теперь цилиндрический заряд $h = d$ того же веса. Тогда давление p_k будет наблюдаться в направлении торца цилиндра на значительно большем расстоянии; в направлении боковых сторон — на несколько большем расстоянии и, наконец, в направлении диагоналей — на несколько меньшем расстоянии. Сравним данные таблицы 1 (сфера) с данными табл. 3 (цилиндр). При передаче детонации

от литого заряда ТГ (активный заряд) заряду гексогена (пассивный заряд) приведенное расстояние 50% вероятности передачи детонации для сферического заряда было $R_{\text{ср}}^{\circ} \approx 0.38$; для цилиндра в направлении торца, при использовании в качестве активного заряда литого ТГ 50/50 $R_{\text{ц.т}}^{\circ} \sim 0.92$. Таким образом,

$$R_{\text{ц.т.}}^{\circ} \sim 2.4 R_{\text{сф}}^{\circ}$$

Если принять данные для ТГ 50/50 в качестве пассивного заряда, то

$$R_{\text{сф}}^{\circ} = 0.2, \quad R_{\text{ц.т.}}^{\circ} = 0.59, \quad R_{\text{ц.т.}}^{\circ} \approx 3.0 R_{\text{сф}}^{\circ}$$

Примерно тот же результат получается при использовании в качестве пассивного заряда аммонита-6. Заметим, кстати, что чем менее чувствительно пассивное ВВ, тем больше значение p_k и тем сильнее, следовательно, должен сказываться переход от сферы к несферической форме: эффекты направленности сильнее выражены вблизи от заряда при больших давлениях.

Таблица 4

Расстояние R_{50} передачи детонации от цилиндрических зарядов (в направлении боковой стороны)
(в последней графе в скобках указано максимальное отклонение от среднего приведенного значения $R_{\text{ср}}^{\circ}$ в %)

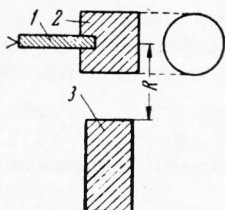
Активный заряд	d h, мм	$C, \text{г}$	$C_{\text{э}}^*, \text{г}$	$R_{50}, \text{см}$	R°	$R_{\text{ср}}^{\circ}$
				Пассивный заряд — гексоген	$\rho = 1.0$	
ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	40 40	82	93.5	23.0	0.51	0.52 (1.9)
Гексоген $\rho = 1.43$	40 39	69	87.5	22.5	0.51	
Гексоген $\rho = 1.1$	42 45	69	77	22.6	0.53	
				Пассивный заряд — аммонит-6	$\rho = 1.0$	
ТГ 50/50 $\rho = 1.68$	40 40	82	93.5	13.7	0.30	0.28 (5.9)
Гексоген $\rho = 1.43$	40 39	69	87.5	12.5	0.28	
Гексоген $\rho = 1.1$	42 45	69	77	11.6	0.27	

Есть все основания полагать, что давление p_k , необходимое для возбуждения детонации, не должно зависеть от того, является ли ударная волна центрально симметричной, или нет. Из этого следует, что давление p_k у цилиндрического заряда в направлении торца имеет место на расстоянии в 2.5—3.0 раза больше, чем у сферического заряда.

Остановимся на следующем отличии зарядов несферической формы: выше мы видели, что для сферического заряда, любой активный заряд характеризуется расстоянием 50% передачи детонации и величиной тротилового эквивалента. При использовании, например, резко различных по свойствам ТГ 50/50 литого и порошкообразного в случае сферических зарядов приведенные расстояния 50% вероятности передачи детонации одинаковы. Для цилиндрических зарядов получается другая картина. При передаче детонации заряду порошкообразного ТГ 50/50 от литого и порошкообразного ВВ приведенные расстояния оказываются разными, что, впрочем, легко объясняется. Уже давно установлено, что направленное действие проявляется тем более резко, чем больше скорость детонации ВВ и его плотность. Известно, что кумулятивное действие, являющееся частным случаем направленного действия, является наиболее эффективным при использовании мощных ВВ с высокой скоростью детонации. Именно поэтому для цилиндрического заряда из ТГ 50/50 малой плотности ($\rho = 1.0$) при использовании в качестве пассивного заряда ТГ 50/50 $R_{\text{ц.т.}}^{\circ} \approx 2 R_{\text{сф}}^{\circ}$, в то время как для литого ТГ 50/50 в качестве активного заряда $R_{\text{ц.т.}}^{\circ} \approx 2.5 \div 3.0 R_{\text{сф}}^{\circ}$.

В табл. 4 приведены данные о передаче детонации от активных цилиндрических зарядов при боковом расположении (схема расположения показана на фиг. 7). Приведенное расстояние 50% вероятности передачи детонации $R_{ц.б}^{\circ}$ несколько больше, чем для сферических зарядов, но значительно меньше, чем при передаче в направлении торца. При использовании в качестве пассивного заряда гексогена $R_{ц.б}^{\circ} \approx 1.37 R_{сф.}^{\circ}$; при использовании аммонита-6 в качестве пассивного заряда $R_{ц.б}^{\circ} \approx 1.55 R_{сф.}^{\circ}$.

В данном случае, так же как для сферических зарядов, в качестве характеристики активного заряда достаточно значения тротилового эквивалента. Значительно различающиеся по скорости детонации активные заряды дают практически одинаковое приведенное расстояние, соответствующее 50% вероятности передачи детонации.



Фиг. 7. Схема опыта при передаче детонации от цилиндрического заряда.
1 — электродетонатор,
2 — активный заряд,
3 — пассивный заряд

Суммируя все изложенное выше, можно сделать следующие заключения.

Наиболее простые закономерности при передаче детонации наблюдаются при использовании сферических активных зарядов. Для пассивного заряда определенных свойств и заданной чувствительности приведенные расстояния, соответствующие 50% вероятности передачи детонации, оказываются одинаковыми для любых активных зарядов. Поскольку

$$R^{\circ} = R_{50} (C_3^*)^{-1/3}$$

то расстояние 50% вероятности передачи детонации следует рассчитывать по формуле

$$R_{50} = R^{\circ} \sqrt[3]{C_3^*} = k^* \sqrt[3]{C_3^*} \quad (5)$$

При этом свойства активного заряда полностью учтены величиной его тротилового эквивалента, вычисленной с учетом разбрасываемого слоя. Этот учет необходим для малых зарядов ВВ с малой скоростью химического превращения. Для ВВ с большой скоростью превращения (литой ТГ, прессованный гексоген и т. д.), а также для крупных зарядов аммонитов, тротила и т. д., этот учет несуществен: разбросом можно пренебречь и полагать $C_3^* = C_3$. Значение k^* определяется исключительно чувствительностью ВВ пассивного заряда, его физическим состоянием и структурой. По своей физической сущности k^* представляет то приведенное расстояние, на котором давление ударной волны таково, что обеспечивает 50% вероятность возбуждения детонации в данном пассивном заряде.

Таким образом, если свойства активного заряда полностью определяются значением C_3 или C_3^* , то свойства пассивного заряда полностью определяются значением $k^* = R_{50}^{\circ}$.

Переход от зарядов сферической формы к зарядам несферической (куб, цилиндр и т. д.) существенно усложняет проблему. Естественно, однако, и в этом случае, во всяком случае для сосредоточенных зарядов, за основу взять результат, полученный для наиболее простого случая — использования сферических зарядов, введя поправку на несферичность. Таким образом, для сосредоточенных зарядов любой формы

$$R_{50} = \xi k^* \sqrt[3]{C_3^*} \quad (6)$$

где ξ — поправочный коэффициент, который, к сожалению, зависит от многих факторов, а именно:

1) от формы активного заряда и от направления распространения потока продуктов взрыва,

2) от таких факторов, как скорость детонации и плотность активного заряда (направленное действие более резко выражено у зарядов ВВ с большой скоростью детонации и с большой плотностью),

3) от чувствительности пассивного заряда (чем меньше чувствительность, тем на меньшее расстояние передается детонация, тем существеннее наличие направленного эффекта; поэтому, как мы уже видели, чем менее чувствительным является пассивный заряд, тем больше ξ).

Из наших данных следует, что для цилиндрических зарядов в направлении торца, изготовленных из литого ТГ поправочный коэффициент $\xi \approx 2.5-3.0$; если активный заряд из порошкообразного ТГ, то $\xi \approx 2.0$.

Для цилиндрических зарядов в боковых направлениях ξ порядка 1.5 и мало зависит от свойств активного заряда.

Если для сферических зарядов наши данные достаточно надежны, то для зарядов несферической формы они являются сугубо ориентировочными, это, в частности, относится к приведенным выше значениям ξ . Несомненно, что для построения сколько-нибудь полной теории передачи детонации для зарядов, форма которых отличается от сферической, необходимо провести дальнейшие обширные исследования, это особенно относится к зарядам, которые не являются сосредоточенными (удлиненный цилиндр и т. д.).

Здесь нужно подчеркнуть следующее важное обстоятельство: предположим, что мы проводим серию опытов по передаче детонации одинаковым пассивным зарядам, используя несферические активные заряды. Вес активных зарядов (их тротиловый эквивалент) меняется; следовательно, меняются и геометрические размеры зарядов.

Предположим, однако, что меняется только вес (и размеры) зарядов, все же прочие параметры являются неизменными или подобными (форма зарядов подобна, направление передачи одинаково, т. е., например, всегда в направлении торца цилиндра, плотность ВВ заряда и его скорость детонации одинаковы). Тогда в формуле (6), очевидно,

$$\xi = \text{const}, \quad R_{50} = k' \sqrt[3]{C_0^*}$$

Таким образом, при неизменных свойствах пассивных и активных зарядов при условии соблюдения подобия формы, передача детонации должна описываться законом подобия в его простейшем варианте, как и для сферических зарядов. Этот вывод, как мы видели выше, полностью подтверждается опытом, во всяком случае для сосредоточенных зарядов, и дает лишнее основание утверждать, что в основе закона передачи детонации должен лежать закон подобия в простейшем варианте (с кубической зависимостью).

Из этого следует важный практический вывод. Если в основе вычисления расстояния 50% вероятности передачи детонации лежит простейший вариант закона подобия, то расстояния, безопасные по передаче детонации (расстояния, соответствующие малой вероятности передачи детонации), должны соответственно вычисляться не по общепринятой формуле $R_6 = k\sqrt{C}$, а по формуле

$$R_6 = k_1 \sqrt[3]{C} \quad (7)$$

т. е. также на основании простейшего варианта закона подобия. При этом, конечно, должны быть соблюдены те правила, которые вытекают из закона подобия. Заряды должны быть подобными по форме; если, например, при увеличении веса заряда цилиндрической формы увеличивать длину, оставляя неизменным диаметр заряда, то подобие формы не будет соблюдено и использование закона подобия в его простейшем варианте станет невозможным. Расстояние необходимо отсчитывать от центра заряда в соответствии с тем, как это принято при применении закона подобия к взрывам.

Необходимость учета и использования кубической зависимости, при определенных условиях, вытекает из наших опытов, но этого, конечно, недостаточно для рекомендаций практического характера.

Как известно, для целей практики наиболее важными являются следующие случаи передачи детонации:

- 1) передача детонации от патрона к патрону в условиях шпура,
- 2) передача детонации между крупными зарядами в условиях хранения.

При первом варианте речь идет о передаче детонации между удлиненными цилиндрическими зарядами, находящимися в полости (шпур). С точки зрения применения закона подобия такие условия являются сложными и требуют специальных опытов. Что касается второго варианта, имеющего важнейшее практическое значение, связанного с расчетами безопасных расстояний по передаче детонации для складов ВВ, то наши выводы недостаточно обоснованы для этого варианта из-за небольшого веса использованных зарядов. Кроме того, типы ВВ, использованные нами, далеко не перекрывают обширный ассортимент ВВ, применяемых в промышленности. Важнейшим практическим выводом наших исследований является то, что универсальность и широкая применимость формулы $R_0 = k\sqrt{C}$ безусловно ставится под сомнение; в условиях наших опытов эта формула заведомо непригодна.

Отсюда возникает насущная задача проведения обширной серии опытов с крупными зарядами и в том числе с зарядами ВВ с относительно малой детонационной способностью (меньше, чем у аммонита-6).

Здесь можно заметить следующее: как уже отмечалось выше, из результатов наших опытов следует, что время воздействия не входит в явном виде, для зарядов в десятки и сотни граммов время заметного снижения давления за фронтом ударной волны меньше времени, необходимого для развития детонации в пассивном заряде. Можно, однако, представить следующий случай: активный заряд весьма велик, соответственно весьма велико время воздействия. Не может ли при этих условиях после периода задержки взрыва порядка сотен микросекунд возникнуть детонация от ударной волны с меньшими давлениями, чем указанные выше? Если это возможно, то простейший вариант закона подобия будет неприменим к случаю больших зарядов. Решить этот вопрос можно, лишь проведя соответствующие опыты с крупными зарядами.

Остановимся в заключение на механизме передачи детонации. Опять-таки мы будем рассматривать лишь передачу детонации ударной волной и продуктами и не будем рассматривать передачу осколками. Выше мы уже отмечали, что для каждого пассивного заряда необходимо определенное давление. Для аммонитов это давление превышает 1000 атм; для гексогена и нитроглицерина оно составляет несколько сот атмосфер; для азида свинца 25—35 атм. Подчеркнем, что даже давления в тысячи атм недостаточно для того, чтобы путем сжатия вызвать разогрев самого вещества, как это имеет место при сжатии детонационной волной газовых смесей или взрывчатых веществ большой плотности. Очевидно, при передаче детонации происходит интенсивное сжатие и разогрев воздушных включений, имеющих в пассивном заряде [1], а также сжатие и разогрев слоя воздуха, примыкающего к заряду. При давлении в 30 атм (среднее значение для азида свинца) разогрев воздуха должен составлять 1200° С; такой разогрев обеспечивает поджигание азида свинца. Для гексогена, аммонитов и пр. детонация возникает при более высоких давлениях; следовательно, «температуры поджигания» для них выше. В результате поджигания возникает горение, идущее при высоких давлениях, создаваемых ударной волной. Это горение быстро ускоряется и переходит в детонацию.

Процесс возникновения детонации при передаче детонации, таким образом, должен быть сложным и включать стадию поджигания, ускоряющегося горения, перехода в детонацию. Естественно, что для полного

завершения процесса требуется определенное время, составляющее, как уже отмечалось выше, несколько микросекунд для высокочувствительных ВВ, десятки микросекунд для аммонитов высокого качества и, возможно, около сотни микросекунд для аммонитов и динамитов низкого качества (плохое измельчение и смешение, слежавшиеся, увлажнившиеся заряды и пр.).

Выводы

1) При передаче детонации от сравнительно малых (десятки и сотни граммов) активных зарядов сферической формы выполняется закон подобия в его простейшем варианте. Расстояния, на которых осуществляется 50% вероятности передачи детонации, в условиях наших опытов определяется не формулой $R_{50} = k\sqrt{C}$, а формулой

$$R_{50} = k^* \sqrt[3]{C_0^*} \quad (*)$$

В этой формуле C_0^* — фактическая величина тротилового эквивалента, полностью определяет свойства активного заряда; значение k^* зависит от чувствительности пассивного заряда.

2) Для возбуждения детонации в пассивном заряде необходимо:

а) некоторое давление ударной волны, зависящее от чувствительности пассивного заряда;

б) некоторое «критическое» время действия давления, определяемое временем установления детонации. Если время действия оказывается меньше критического, то для возбуждения детонации в пассивном заряде необходима более сильная волна — большее давление, т. е. приближение активного заряда к пассивному на расстояние, меньшее, чем предписывается формулой (*). Как показали наши опыты, «критические» времена очень малы; они имеют порядок 10 мксек. Времена действия зарядов, больших десятков граммов, превосходят критические. Поэтому в условиях наших опытов возникновение детонации определяется в основном величиной критического давления, которое (при условии 50% вероятности передачи детонации) составляет: для высокочувствительных ВВ типа азида свинца — несколько десятков атмосфер; для таких ВВ, как гексоген, жидкий нитроглицерин, — сотни атмосфер; для аммонитов — тысячу атмосфер и более.

3) При использовании зарядов несферической формы условия осложняются из-за направленного действия взрыва. Есть основания полагать, что и в этом случае в основу должен быть положен закон пропорциональности расстояния передачи от корня кубического из веса зарядов.

4) Для возможности практических рекомендаций необходимо провести опыты по передаче детонации от крупных зарядов различных ВВ, используемых промышленностью.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила
15 11 1959

ЛИТЕРАТУРА

1. Б ю р л о Е. Детонация через влияние, Русск. перевод. Изд. Арт. Академии, 1934.
2. П а т р и М. Передача детонации на расстоянии, в кн. Горение и детонация взрывчатых веществ, 1938, стр. 117.
3. L a f f i t t e P., P a t r y M. Sur la transission de la detonation a distance, C. r., 1931, 192, 948.
4. G a w t h r o p D., P e r r o t G. Propagation of detonation across a gas-gap between two cartridges of explosive. J. Frankl. Inst, 1929, 208, 643.
5. Б е л я е в А. Ф. и Х а р и т о н Ю. Б. О передаче детонации между инициирующими ВВ. Ч. I, II, III. ЖЭТФ, 1936, 371; 1937, 191, 1937, 199.
6. Г о л ь б и н д е р А. И. К вопросу о взрывчатых свойствах инертных смесей с нитроглицерином. ДАН 1945, 50, 199.
7. D e f f e t L. L'aptitude a la detonation. Explosifs, 1954, No 1.
8. Х а р и т о н Ю. Б. О детонационной способности взрывчатых веществ. Вопросы теории ВВ, 1947, 7.
9. Ш н и р м а н Г. Л., Д у б о в и к А. С., К е в л и ш в и л и П. С. Скоростная фоторегистрирующая установка СФР. Физика взрыва, 1955, No 3, 5.
10. С а д о в с к и й М. А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований. Физика взрыва, 1952, № 1, 20.
11. К о р о т к о в А. И. Некоторые результаты измерения давления взрыва вблизи от заряда ВВ. Физика взрыва, 1953, № 2, 76.
12. Р я б и н и н Ю. Н., Т а м м И. И. «О подобии воздушных ударных волн, образуемых зарядами ВВ. Физика взрыва, 1956, № 5, 71.