

О МЕХАНИЗМЕ КАНАЛЬНОГО ЭФФЕКТА  
ПРИ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

Л. В. Дубнов, Л. Д. Хотина  
(Москва)

В практике взрывных работ часто встречаются случаи взрывания ВВ в цилиндрических зарядных камерах (трубах) при несплошном (по сечению) заполнении камеры веществом, например в шпурах или скважинах, пробуренных в горных породах, когда диаметр патронов меньше диаметра зарядной камеры.

Наблюдения показали, что в описанных условиях режим детонации многих ВВ может иметь существенные отличия от детонации тех же ВВ на открытом воздухе или в тесно примыкающих к заряду оболочках. Внешнее проявление этого отличия состоит в том, что при несплошном заполнении трубы ВВ детонирует с непостоянной, меняющейся по длине заряда скоростью; для аммонитов и других смесевых ВВ, как правило, с убывающей скоростью, вплоть до полного затухания детонации.

Отмеченные особенности детонации ВВ в трубах связаны только с наличием свободного пространства — зазора (канала) между зарядом и стенками трубы, вследствие чего в литературе это явление часто называют «канальным эффектом».

Согласно исследованиям [1—5], канальный эффект (понимаемый как воздействие зазора на режим детонации ВВ) зависит от свойств ВВ, усиливается с увеличением массы и прочности трубы, длины заряда, наличия перемычек из инертного материала между частями заряда. Он достигает максимума при некотором оптимальном сечении зазора и исчезает при очень больших и очень малых зазорах. Шероховатость стенок трубы и поверхности заряда, также как и перекрытие зазора легкими (бумажными, картонными) перегородками, ослабляет канальный эффект. Применение мощного дополнительного детонатора, в отличие от взрывания на открытом воздухе, приводит к ускоренному затуханию детонации ВВ типа аммонитов. Чем меньше диаметр заряда, тем более вероятно затухание детонации вследствие канального эффекта.

Пользуясь обнаруженными зависимостями, можно оценивать сопротивляемость того или иного ВВ канальному эффекту по длине участка детонации ( $l_{дет}$ ) до ее обрыва при прочих заданных условиях опыта (диаметре заряда, величине зазора, материале трубы и пр.), или по минимальному (критическому) диаметру заряда ( $d_{кр}$ ), обеспечивающему прохождение детонации на заданной длине заряда.

Первоначально рядом авторов было выдвинуто предположение [1, 4, 7], что явление канального эффекта связано с движением газообразных продуктов взрыва по зазору со скоростью, превышающей скорость детонации ВВ, вызывающем уплотнение ВВ впереди фронта

детонации. Однако некоторые последующие наблюдения, в частности результаты рентгеноимпульсной съемки, побудили внести в эту гипотезу уточнения.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Для более полного изучения явления и раскрытия механизма канального эффекта с помощью СФР производилась скоростная покадровая и с временной разверткой фоторегистрация взрывов, а также рентгеноимпульсная съемка, условия которых описаны в [2]. Для получения достаточно контрастных рентгенограмм во взрываемые смеси вводились соли свинца или поверхность заряда покрывалась свинцовой фольгой.

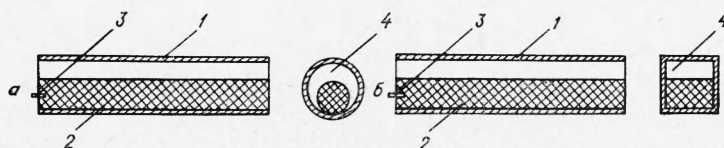


Рис. 1. Схема опыта.

1 — трубка; 2 — заряд ВВ; 3 — капсуль-детонатор; 4 — воздушный зазор.

Заряды взрывались в цилиндрических трубках из стекла (рис. 1, а) и других материалов или в трубах прямоугольного сечения из плексигласа (рис. 1, б). При исследованиях образцы аммонита ПЖВ-20<sup>1</sup>, порошкообразных тротила и гексогена (рис. 2) взрывались в трубах прямоугольного сечения (15×25 мм) с высотой канала 15 и длиной заряда 500 мм. Прессованный гексоген взрывался в заряде диаметром 10 и длиной 500 мм в стеклянной трубке внутренним диаметром 20 мм.

Из рис. 2 видно, что в случае взрыва аммонита и тротила (см. рис. 2, а, б) имеются две зоны свечения: в канале (А) и в веществе (В). Последняя отвечает детонационной волне (ДВ) в заряде.

Зона свечения в канале постепенно расширяется и ее передний фронт (справа) удаляется от фронта детонации. Это свидетельствует о том, что граница раздела светящейся среды и невозмущенного воздуха в канале перемещается по каналу со скоростью  $W$  большей, чем скорость детонации  $D$ . Вместе с тем волна возмущения не отрывается от фронта детонации, о чем свидетельствует сплошное свечение среды в пространстве, примыкающем к зоне детонации, причем свечение фиксируется не только впереди зоны, но и позади в виде постепенно суживающегося хвоста (В).

Отличие между взрывами аммонита и тротила состоит в том, что при выбранных условиях опыта зона свечения в канале для аммонита непрерывно расширяется, в то время как для тротила, начиная с интервала времени примерно 90 мксек, она практически остается неизменной. Аналогичную картину наблюдал Гольбиндер с сотрудниками [3, 6] для ряда динитросоединений и малоплотного тротила.

Заметно отличная картина свечения при взрыве гексогена. Здесь разделение зон свечения не столь отчетливое, периодически фиксируются своеобразные вспышки.

Для более точного замера скоростей были получены временные

<sup>1</sup> Состав аммонита, %: аммиачная селитра — 64, тротил — 16, хлористый натрий — 20.

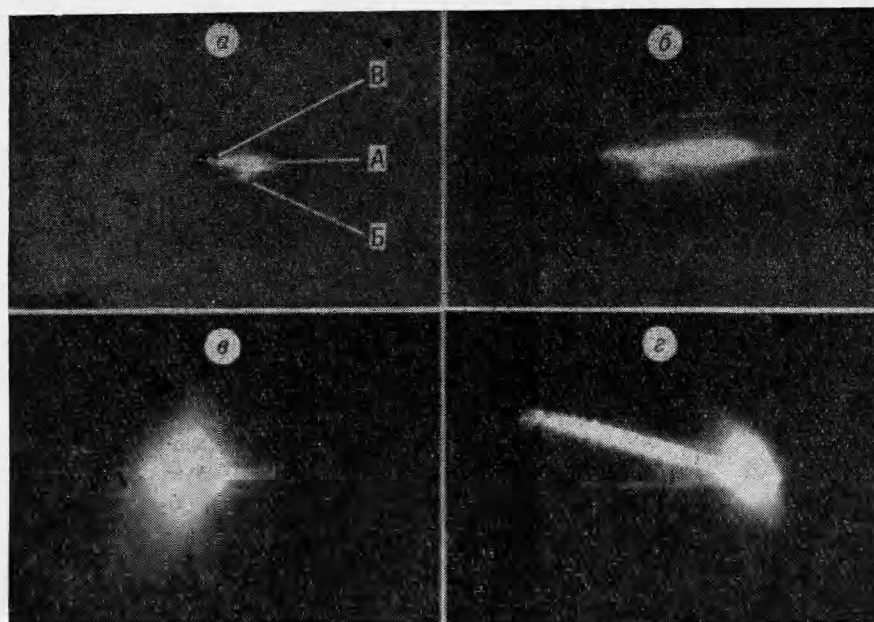


Рис. 2. Скоростная съемка:

а) аммонита ПЖВ-20,  $\rho_0 = 1,1 \text{ г/см}^3$ ; б) тротила,  $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ ; в) гексогена,  $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ ,  
 г) гексогена,  $\rho_0 = 1,62 \text{ г/см}^3$ .

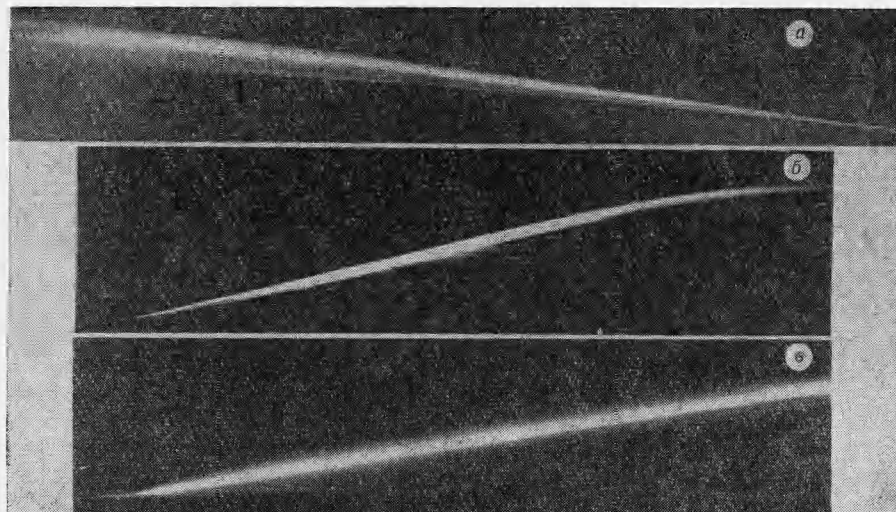


Рис. 3. Временные развертки взрывов:

а) аммонита ПЖВ-20; б) порошкообразного тротила; в) прессованного гексогена

развертки взрывов (рис. 3), условия опытов и результаты обсчета которых помещены на табл. 1. Для сравнения те же ВВ равной плотности взрывались в трубках без зазора одинакового диаметра или сечения.

Полученные результаты позволяют отметить следующие особенности детонации для разных ВВ:

7\*

1. При взрыве предохранительного аммонита (рис. 3, а) скорость детонации монотонно падает вплоть до полного затухания. Скорость светящейся волны  $W$  в зазоре также постепенно убывает, но более медленно, в результате чего разность  $W - D$  с увеличением времени возрастает.

Таблица 1

ВВ	Характеристика заряда ВВ			Труба		Участок измерения, мм	D, м/сек		W, м/сек	W/D		
	плотность, г/см <sup>3</sup>	диаметр, мм	длина, мм	материал	внутр. диам., мм		в трубе с зазором	в трубе без зазора				
Аммонит ПЖВ-20*	1,1	10×15 (прямоугольное сечение)	700	плексиглас	25×15 (прямоугольное сечение)	0—225	2800	2750	3800	1,36		
						225—350	2200				3500	
						450—500	1760					3390
Тротил	1,0	12	550	стекло	20	0—137	3560	4770	1,34			
						137—340	4250			4800		
						400—550	5130				5130	
Тротил	1,55	12	550	стекло	20	0—285	6800	6780	1,05			
						285—550	7130			7130		
Гексоген	1,0	10	550	стекло	25	0—30	5800	6000	6370		1,10	
						30—100	6100			6770		
						100—200	6600					6800
						220—550	6830					
Гексоген	1,62	10	550	стекло	25	0—50	8100	8000	1,03			
						50—500	8300			8300		

\* Детонация прекратилась на расстоянии 520 мм от места инициирования.

2. При взрыве порошкообразного тротила (рис. 3, б) обе скорости вначале возрастают, но приращение  $D$  больше, чем  $W$ . На некотором удалении от места инициирования обе скорости становятся равными и весь комплекс со смещенными друг относительно друга передними фронтами свечения перемещается по трубе с практически постоянной скоростью, превышающей скорость детонации тротила на открытом воздухе. Конечная скорость в данном случае отвечает скорости детонации тротила при плотности порядка 1,3 г/см<sup>3</sup>.

3. Для прессованного тротила участок и время выравнивания скоростей меньше, чем для порошкообразного. Абсолютный прирост  $D$  незначителен: от 6800 до 7130 м/сек. На открытом воздухе при плотности 1,55 г/см<sup>3</sup> тротил детонирует со скоростью 6780 м/сек.

4. Для флегматизированного порошкообразного гексогена картина аналогична порошкообразному тротилу, но с несколько меньшей длиной участка выравнивания скоростей. Стабилизированная скорость детонации равна 6830 м/сек, что отвечает скорости детонации гексогена при плотности 1,23 г/см<sup>3</sup>.

5. Для прессованного гексогена (рис. 3, в) выравнивание скоростей происходит на очень коротком участке. Конечная скорость детонации (8300 м/сек) выше, чем скорость детонации при взрывании в трубках без зазора (8300 м/сек). Свечение яркое и фиксируется в виде широкой полосы.

Для идентификации светящейся волны в зазоре и выяснения причин изменения скорости детонации ВВ при взрыве в трубах с зазором была выполнена рентгеноимпульсная съемка [2].

На рис. 4 представлена рентгенограмма взрыва аммонита ПЖВ-20 с небольшой (15%) добавкой азотнокислого свинца в трубе прямоугольного сечения из плексигласа. Из рисунка видна нормальная картина разлета продуктов взрыва (ПВ); ПВ не входят в зазор и не дви-

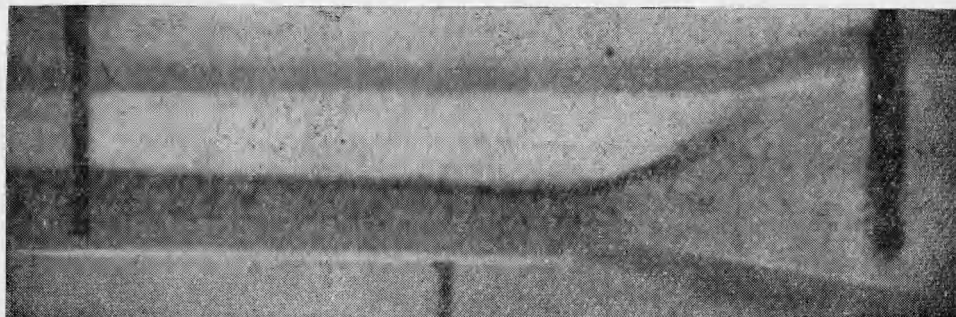


Рис. 4. Рентгенограмма через 86 мксек после инициирования взрыва.

жутся в нем впереди фронта детонации, граница расширяющихся продуктов взрыва вполне четкая. При затухании детонации газовая волна в зазоре «нагоняет» фронт детонации, и в момент обрыва граница раздела ПВ — воздух почти нормальна к поверхности заряда [2]. Вместе с тем заметно, что впереди фронта детонации вещество уплотнено, а диаметр или сечение заряда уменьшены. Уплотнение не равномерное по поперечному размеру заряда и по длине (рис. 5).

Рентгенограммы позволяют заключить, что не продукты взрыва, а, видимо, ударная воздушная волна распространяется по зазору, причем во всех случаях на начальном участке ее скорость  $W > D$ , а затем в зависимости от влияния уплотнения на детонационные свойства ВВ, либо это преобладание сохраняется, либо скорости выравниваются.

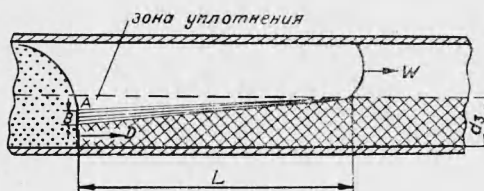


Рис. 5. Характер деформации заряда.

Для подтверждения данного предположения были выполнены опыты с взрыванием в условиях разрежения. Если бы канальный эффект был обязан уплотняющему действию газообразных продуктов взрыва, то с уменьшением давления воздуха в трубе скорость потока газов в канале должна была бы увеличиваться и эффект усиливаться за счет прогрессирующего увеличения площади и времени деформации заряда, несмотря на некоторое уменьшение среднего давления газов в канале. В случае же распространения ударной воздушной волны в зазоре канальный эффект в результате снижения давления в волне должен был бы заведомо ослабляться.

В табл. 2 приведены результаты опытов по взрыванию аммонита ПЖВ-20 ( $d=12$  мм,  $\rho=1,05$  г/см<sup>3</sup>) в разреженной атмосфере ( $p_{ост}=7$  мм рт. ст.). Рентгенограммы взрыва смеси аммонита ПЖВ-20 с азотнокислым свинцом (15%) в барокамере с остаточным давлением 7 мм рт. ст. показали совершенно такую же картину разлета ПВ, как

и при взрывании при обычных условиях. Вместе с тем действие канального эффекта ослабляется: уменьшается степень уплотнения ВВ впереди фронта детонации, увеличивается  $l_{\text{дет}}$  при заданном диаметре заряда.

Таблица 2

Остаточное давление в барокамере, мм рт. ст.	Длина участка детонации, см
Атмосферное (на воздухе)	33
449	32
37	50
7	75

Таким образом, предположение о распространении в зазоре ударной воздушной волны, вызывающей канальный эффект, находит подтверждение. В его пользу говорят также опыты Гольбинера и Тышевича [6], в которых была обнаружена сильная зависимость интенсивности свечения от природы заполняющего канал газа (аргон, воздух, углекислота).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты позволяют по-новому описать явление канального эффекта. Можно с достаточным основанием утверждать, что в зазоре (канале) между зарядом и стенками трубы распространяется прямоугольная ударная воздушная волна (УВ), опережающая фронт детонации (рис. 6). Она возникает в результате сжатия воздуха в канале продуктами взрыва.

Передний фронт ПВ образует своеобразный газовый поршень с выпуклой поверхностью, примыкающей к фронту детонации и перемещающийся по каналу со скоростью  $D$ . При этом сами ПВ, расширяясь, движутся от плоскости раздела с воздухом в обратном направлении, т. е. по ним бежит косая волна разрежения, создающая градиент давления.

Возникающая в канале УВ по общим законам газодинамики должна обладать скоростью большей, чем скорость газового поршня, т. е.  $W_0 > D$ , что и фиксируется при фотографировании.

К моменту образования разрыва (завершения формирования ударного фронта) скорость волны  $W_0$  может быть выражена как однозначная функция  $D_0$ , исходя из следующих общих зависимостей для ударных волн

$$W = u \frac{\rho}{\rho - \rho_0},$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{(k+1)p + (k-1)p_0}{(k-1)p + (k+1)p_0}.$$

В данном случае  $u$  отвечает скорости газового поршня, т. е.  $u = D$ , а давление на фронте УВ должно быть равным давлению на поршне, т. е. давлению продуктов взрыва на границе раздела  $p_{\text{п.в}}$ <sup>1</sup>. Тогда

$$W_0 = D \frac{(k+1)p_{\text{п.в}} + (k-1)p_0}{2(p_{\text{п.в}} - p_0)}. \quad (1)$$

<sup>1</sup> Приближенно  $p_{\text{п.в}}$  можно принять равным среднему давлению продуктов взрыва в зарядной камере,  $p_{\text{п.в}} = RT \frac{\Delta}{1 - \alpha \Delta}$ , где  $\Delta$  — плотность заряжения трубы;  $T$  — температура взрыва.

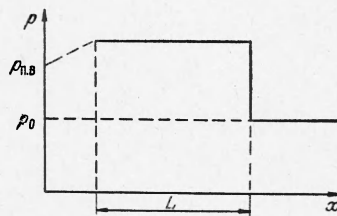


Рис. 6. Схематический профиль УВ в канале.

При высокой плотности заряжания трубы, т. е. малом отношении площади сечения зазора ( $S_z$ ) к площади сечения трубы ( $S_T$ ),  $p_{п.в} \gg p_0$  и предельное значение скорости УВ равно

$$W_0 = D \frac{k+1}{2}. \quad (2)$$

Принимая для воздуха  $k=1,4$ , получим  $W_0=1,2D$ . Выведенные уравнения справедливы при допущении постоянства скорости вдоль всей образующей «поршня». На самом деле, вследствие сопротивления сжатого воздуха поверхности раздела ПВ — воздух возникает градиент скорости и поверхность приобретает «завал», хорошо видимый на фото-снимках, который будет тем большим, чем больше сечение зазора.

Условие  $u=D$  сохраняется только в угловой точке  $A$ , а среднее значение  $\bar{u} < D$ .

Прямым следствием возникновения канальной ударной волны является деформация (уплотнение) заряда впереди фронта детонации, особенно проявляющееся для ВВ с малой плотностью. Процесс деформации схематически изображен на рис. 5 и хорошо фиксируется на рентгенограмме рис. 4. В результате воздействия волны сжатия, распространяющейся по веществу от поверхности контакта с УВ, в заряде возникает коническая область уплотнения, примыкающая своим основанием к фронту ДВ. Степень деформации заряда помимо физических свойств ВВ зависит от параметров ударной волны — ее длины  $L$  и давления  $p_{у.в}$ .

В свою очередь, изменения диаметра (площади сечения) заряда, а также возникновение в нем зоны высокой плотности может существенно повлиять на процесс детонации. Для ВВ смесового типа (аммонитов), отличающихся относительно низкой детонационной способностью, указанные явления приводят к снижению скорости детонации или даже к плаванию ее затуханию.

Для ВВ с высокой детонационной способностью (порошкообразный тротил, гексоген и др.) уплотнения приводят к росту  $D$ . Приближенный полуэмпирический расчет деформации заряда под воздействием канальной волны был сделан в работе [6]. Точный расчет крайне затруднен ввиду непостоянства значений скоростей детонационной и ударных волн и соответственно параметров последней. Максимальная глубина динамического сжатия должна определяться из уравнения:

$$b = u' \tau = u' \frac{L}{W}, \quad (3)$$

где  $\tau$  — максимальное время действия канальной ударной волны на материальную точку на поверхности заряда до подхода к ней фронта детонации;  $u'$  — скорость волны сжатия ВВ;  $L$  — длина канальной УВ.

Конечная плотность сжатого слоя определяется из адиабаты ударного сжатия.

В общем виде длина канальной волны находится из выражения

$$L = \int_{\tau_0}^t [W(t) - D(t)] dt, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — время образования первичного ударного фронта. Анализ приведенной функции  $L(t)$  показывает, что длина волны не может неограниченно расти с увеличением времени прежде всего потому, что с

увеличением  $L$  возрастают потери энергии на трение сжатого в волне воздуха о стенки трубы и поверхность заряда. В результате этого скорость УВ становится функцией  $L$ , уменьшается с ее увеличением; соответственно при постоянной  $D$  уменьшается  $W - D$  и  $dL/dt$ . В конечном итоге, начиная с некоторого времени  $\tau_1$ , скорости  $W$  и  $D$  уравниваются и ударная волна фиксированной и максимальной для данных условий длины распространяется по каналу со скоростью детонации. Соответственно скорости меняется и давление в канальной ударной волне.

Такое равновесие быстро достигается для прессованных зарядов и более медленно для порошкообразных, у которых в результате уплотнения вещества скорость детонации растет, и возрастающие потери в УВ до некоторой степени возмещаются ускорением движения толкающего «поршня».

Более сложные зависимости получаются в том случае, когда с увеличением плотности ВВ скорость детонации уменьшается (аммониты). Его можно уподобить движению поршня с замедлением. Здесь длина волны может расти несмотря на увеличение потерь энергии на трение и снижение  $W$  вследствие прогрессирующего снижения  $D$  и соответственного увеличения  $W - D$ . Однако, как показывает фоторегистрация, и в этом случае устанавливается равновесие ( $W = D$ ), хотя и на значительно более длинных участках заряда, если только детонация не затухнет (при достаточно больших значениях диаметра заряда  $d_0$ ).

Отличие этого случая состоит, видимо, и в том, что профиль ударной волны ( $p = f(L)$ ) приближается к профилю обычной ударной воздушной волны, возникающей при взрыве ВВ в не ограниченном стенками пространстве.

Изложенный механизм канального эффекта достаточно удовлетворительно описывает те качественные явления, которые были кратко изложены в введении к настоящей статье.

Несколько по-особому проявляется канальный эффект при взрыве высокочувствительных ВВ (гексоген). Здесь канальная ударная волна не успевает развиться на значительную глубину, так как она сравнительно быстро инициирует детонацию ВВ с поверхности заряда впереди первичного фронта детонации (вспышки на снимках). В результате этого возникает пульсирующая детонация, вызываемая все время возникающими «мелкими» канальными волнами. Средняя скорость детонации в этих условиях выше, чем скорость детонации такого же заряда в трубах без зазора, причем для порошкообразного гексогена она возрастает как за счет уплотнения вещества впереди фронта детонации, так и вследствие инициирования обгоняющими канальными ударными волнами.

Поступила в редакцию  
4/X 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Дубнов. Сб. «Взрывное дело», № 49/6, Госгортехиздат, 1962, стр. 262.
2. Л. В. Дубнов, Л. Д. Хотина. Сб. «Взрывное дело», № 52/9, Госгортехиздат, 1963, стр. 168.
3. А. И. Гольбиндер, Л. М. Светлова, В. Ф. Тышевич. Сб. «Взрывное дело», № 52/9, Госгортехиздат, 1963, стр. 155.
4. И. Я. Петровский, Л. В. Волков. Сб. «Теория взрывчатых веществ», М., Оборонгиз, 1963, стр. 474.
5. Hirowa Fukuda. J. ind expl. soc., 1961, 22, 2.
6. А. И. Гольбиндер, В. Ф. Тышевич. Докл. АН СССР, 1964, 156, 4.
7. Н. L. Selberg. Aktiv för Fusik, 1960, 18, 17.