

параметрами: $n=4$; $10^8 \cdot I_0=1,94$; $10,8$; $2,78$; $3,20$ м²/Н; $\tau_1=0,13$; $1,65$; $7,48$; $40,5$ мс; в процессе разгрузки параметры τ_3 , τ_4 увеличивались в 10^7 раз, т. е. $\varphi_0/\varphi_{\max}=0,32$.

Расчеты, проведенные при несколько иной аппроксимации L и $n > 4$, не приводят к существенному изменению волновой картины, что объясняется узостью спектра и наличием одного максимума спектра L .

В целом сходимость расчета с опытом (учитывая нестабильность характеристик грунта даже при его тщательной укладке в небольшом объеме, а также влияние неоднородности процессов и сил трения) можно считать приемлемой как по амплитуде, так и по фазовым характеристикам проходящей и отраженной волны сжатия. Полученные данные свидетельствуют о принципиальной возможности описания некоторых динамических процессов в грунтах на основе обобщенной модели Фойгта.

Авторы выражают благодарность проф. С. С. Григоряну за внимание к работе и ее обсуждение.

Поступила в редакцию
4/1 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Григорян. ПММ, 1960, 24, 6.
2. М. Н. Гольдштейн. Механические свойства грунтов. М., Стройиздат, 1971.
3. Р. М. Дейвис. Волны напряжений в твердых телах. М., ИЛ, 1961.
4. В. А. Котляревский. ПМТФ, 1962, 3.
5. J. A. Morrison. Quart. of Appl. Math., 1956, 14, 153.
6. Г. М. Ляхов, Я. А. Пачепский. ПМТФ, 1973, 2.
7. Т. Алфрей. Механические свойства высокополимеров. М., ИЛ, 1952.
8. Дж. Ферри. Вязкоупругие свойства полимеров. М., ИЛ, 1963.
9. J. Neumann, R. D. Richtmyer. J. Appl. Phys., 1950, 21, 232.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ УДАРЕ НА КОПРЕ МЕТОДОМ ПОДНЯТОГО РОЛИКА

А. А. Денисаев, А. В. Дубовик, В. К. Боболев

Известно, что инициирование быстрой химической реакции в жидких взрывчатых веществах (ЖВВ) при механических воздействиях носит очаговый характер [1]. Среди причин образования очага разогрева можно выделить:

- 1) адиабатическое сжатие газовых пузырьков с возможным образованием кумулятивных микроструй;
- 2) схлопывание кавитационных полостей;
- 3) трение твердых тел, находящихся в контакте с ЖВВ;
- 4) вязкий разогрев при выдавливании ЖВВ из зазора между двумя соударяющимися поверхностями.

Многообразие механизмов инициирования взрыва — причина получения различных и противоречивых результатов при испытании чувствительности ЖВВ к ударно-механическим воздействиям различными методами. Более надежные сведения о взрывоопасности ЖВВ при проведении тех или иных технологических операций обычно получают, моделируя эти операции при форсированных режимах воздействий. Достаточно полные представления о механической чувствительности могут быть

получены лишь при использовании широкого комплекса методов, индивидуально воспроизводящих воздействия, отвечающие различным механизмам инициирования взрыва. Важная роль принадлежит методам испытания, связанным с инициированием взрыва при схлопывании газовых пузырьков и кавитационных полостей, так как в неоднородном состоянии ЖВВ обладают повышенной взрывоопасностью. Наличие газовых пузырьков в жидкости сравнительно легко регистрируется визуально, в то время как образование кавитационных полостей может ускользнуть от исследователя вследствие кратковременности их существования. Кавитация может возникать при всякого рода сотрясениях сосуда с жидкостью или при ударах по нему. Самопроизвольное схлопывание полостей обычно не приводит к взрыву. Однако если схлопывание происходит под действием внешних сил, то вероятность взрыва весьма высока [2].

В работе [3] экспериментально и теоретически показано, что вязкий разогрев при механических воздействиях с энергиями до 100 Дж оказывается малоэффективным с точки зрения инициирования взрыва. Высокая чувствительность ЖВВ в неоднородном состоянии отчетливо проявляется в эффекте «поднятого ролика» [4]. Его суть состоит в том, что в опытах с поднятым на несколько миллиметров над каплей ЖВВ верхним роликом испытательного прибора (рис. 1, а) взрывы регистрируются при совсем небольших высотах сбрасывания груза, тогда как при опущенном на каплю ролике взрывы не наблюдаются.

Как было показано в работе [5], в опытах с поднятым роликом происходит дробный удар по капле ЖВВ, приводящий к ее разбрызгиванию. После соударения груза с поднятым верхним роликом вследствие большого различия их масс последний начинает двигаться со скоростью, превышающей скорость груза, и совершает несколько последовательных отражений от нижнего ролика и от груза. Предполагалось, что удар верхнего ролика по капле и последующий отскок приводят к возникновению неоднородностей в слое ЖВВ. В работе [6] при помощи высокоскоростного фотографирования зарегистрировано образование разрывов сплошности слоя ЖВВ в виде кавитационных полостей.

Описанный эффект может быть использован для исследования чувствительности к удару ЖВВ, находящихся в неоднородном состоянии. Для выбора параметров проведения опытов, таких как высота зазора между роликами h_0 , масса груза M , масса навески ЖВВ m и т. д., необходимо детальное изучение механизма дробного удара.

Конструкция испытательного прибора, использованного в данной работе (см. рис. 1), обеспечивала фиксирование верхнего ролика на высоте $h_0 = 0 \div 8$ мм от нижнего ролика при помощи вмонтированного в на-

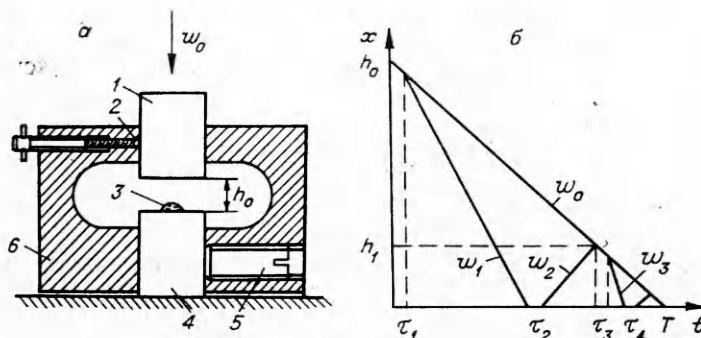


Рис. 1. Схема испытательного прибора (а) и $x-t$ -диаграмма движения груза (w_0) и верхнего ролика (w_1 , w_2 и w_3) (б).

1 -- верхний ролик; 2 -- шариковый прижим; 3 -- капля ЖВВ; 4 -- нижний ролик; 5 -- винт; 6 -- направляющая муфта.

правляющую муфту шарикового прижима, который не препятствовал движению верхнего ролика. Нижний ролик жестко закреплялся винтом. Использовались ролики от подшипников без фасок $\varnothing 19$ мм и массой 57,5 г.

На рис. 1, б представлена $x-t$ -диаграмма движения груза и верхнего ролика. Скорость груза на участке $h_0 > x > 0$ меняется незначительно, поэтому траектория представлена прямой линией. Движение верхнего ролика в направляющей муфте также считается равномерным, т. е. торможением вследствие трения пренебрегаем. На рис. 1, б τ_1 означает время соударения груза, падающего со скоростью ω_0 , с верхним роликом, который затем приводится в движение со скоростью ω_1 . τ_2 — время удара верхнего ролика по нижнему. Капля ЖВВ при этом превращается в слой, который теряет сплошность, и разрывается при последующем отскоке ролика на высоту h_1 навстречу грузу. После отражения от груза верхний ролик совершает повторный удар по неоднородному слою ЖВВ. Если этот удар не приведет к взрыву, то описанный цикл событий повторяется и в конечном итоге завершается совместным ударом верхнего ролика и груза.

Скорости движения верхнего ролика в различные промежутки времени согласно законам сохранения энергии и импульса составляют:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= (k+1)\omega_0, \\ \omega_2 &= -k\omega_1, \\ \omega_3 &= (k+1)\omega_0 + k\omega_0,\end{aligned}\tag{1}$$

где k — коэффициент отскока (по скорости).

Вычисляя с помощью $x-t$ -диаграммы величину отскока ролика, получаем

$$h_1 = k/[k(k+1) + 1] \cdot \{h_0 k - \omega_0[(\tau_1 + \tau_2)k + \tau_2]\}.\tag{2}$$

Из (2) следует, что для любого h_0 имеется предельная скорость

$$\omega_0^* = h_0 k / [(\tau_1 + \tau_2)k + \tau_2],\tag{3}$$

при которой отскок $h_1 = 0$. Иначе говоря, эффект поднятого ролика можно наблюдать лишь в ограниченном диапазоне скоростей удара. Для проведения массовых испытаний чувствительности ЖВВ на копре К-44-II необходимо выбрать такую величину h_0 , чтобы ω_0^* была значительно больше максимальной скорости падения груза, равной 4 м/с. Для оценки величины h_0 , удовлетворяющей этому требованию согласно (3), необходимо знать величины τ_1 , τ_2 и k .

Время τ_1 измерялось электроконтактным методом. Полученные результаты в интервале скоростей удара $\omega_0 = 1 \div 4$ м/с аппроксимируются гиперболической зависимостью

$$\tau_1 = \tau_0 + (A/\omega_0),\tag{4}$$

где $\tau_0 = 0,03$ мс, $A = 0,05$ мм.

Полагая, что в случае холостого удара (при отсутствии капли ЖВВ) характер зависимости времени τ_2 от скорости удара аналогичен (4), получим

$$h_1 = k/[k(k+1) + 1] \cdot [h_0 k - \omega_0 \tau_0 (2k+1) - A(k+1)].\tag{5}$$

Воспользовавшись для оценки значением $k = 0,55$ [7], получим

$$h_1 = 0,163 h_0 - 0,019 \omega_0 - 0,023,\tag{6}$$

где h_0 и h_1 выражены в мм, а ω_0 — в м/с. Из (6) следует, что $\omega_0^* = 4$ м/с, если $h_0 \geq 0,61$ мм.

Подтверждением изложенного расчета могут служить результаты опытов с нитроглицерином, выполненных при $h_0 = 0,5$ мм и $M = 5$ кг ($\omega_0^* \approx 3$ м/с). На рис. 2 кривая частоты взрывов имеет характерную куполообразную форму. Максимальная частота взрывов НГЦ имеет место при $22,5 < H < 40$ см (H — высота сбрасывания). Уменьшение частоты взрывов при $H > 40$ см объясняется отсутствием отскока верхнего ролика и ликвидацией эффекта поднятого ролика.

Построение экспериментальных $x-t$ -диаграмм движения верхнего ролика проводилось по результатам опытов, в которых с помощью двух тензодатчиков давления регистрировались моменты соударений верхнего ролика с грузом и нижним роликом. По результатам указанных опытов рассчитывались скорости движения верхнего ролика в зависимости от скорости удара ω_0 . Результаты обработки экспериментов представлены на рис. 3. Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о том, что значение k в действительности не является постоянной величиной.

При ударе груза по верхнему ролику $k = 0,6 \div 0,8$, а при ударе последнего по нижнему ролику $k = 0,3 \div 0,4$. Это, очевидно, связано с торможением верхнего ролика в направляющей муфте и с нецентральной ударом, приводящей к перекосу ролика. В опытах с ЖВВ, кроме того, ролик теряет энергию на выдавливание капли жидкости из зазора между соударяющимися поверхностями. Тем не менее, как следует из рис. 3, формулы (1) с $k = 0,55$ удовлетворительно описывают движение верхнего ролика. Исходя из этого вывода, соотношение (6) было использовано для выбора величины зазора между роликами 5 мм. В этом случае $\omega_0^* = 40$ м/с и ошибка в установке зазора относительно невелика. Кривые частоты взрывов для различных ЖВВ, полученные в опытах с $h_0 = 5$ мм, имеют обычную для копровых испытаний S -образную форму. Из (6) также следует, что в диапазоне скоростей удара $1 \div 4$ м/с (характерных для копра К-44-II) величина отскока $h_1 = 0,7 \div 0,8$ мм.

На рис. 4 представлена осциллограмма опыта по регистрации движения верхнего ролика при наличии НГЦ для $h_0 = 5$ мм, $M = 5$ кг, $H = 20$ см. Обозначения под осциллограммой совпадают с обозначением на рис. 1, б. Момент взрыва фиксировался с помощью двух фотодиодов типа ФД-10Г, включенных в параллельную цепь, сигнал от которых записывался на верхнем луче осциллографа одновременно с сигналом тензо-

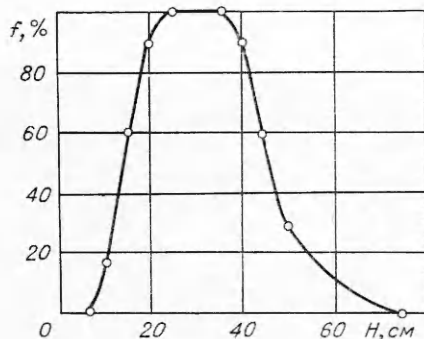


Рис. 2. Кривая частоты взрывов НГЦ при $h_0 = 0,5$ мм и $M = 5$ кг.

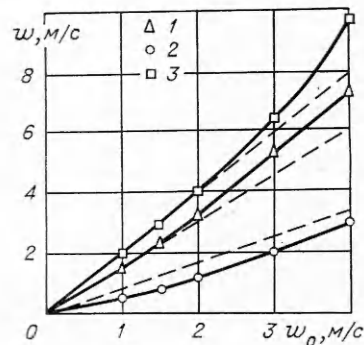


Рис. 3. Скорости движения верхнего ролика при циркуляции в зазоре между грузом и наковальней в зависимости от скорости удара ω_0 .

1 — w_1 ; 2 — w_2 ; 3 — w_3 ; — — — — — расчетные зависимости при $k = 0,55$.

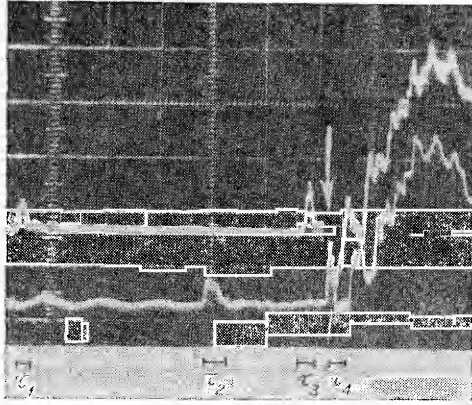


Рис. 4. Осциллограмма удара по капле НГЦ. Верхний луч — сигнал с датчика в ударнике груза, нижний луч — с датчика на наковальне копра под нижним роликом.

Вблизи нижних пределов кривых частостей имели место взрывы в момент начала завершающего удара груза, т. е. при $t=T$. Из рис. 1, б следует, что и в этом случае инициирование взрыва связано с ударом по неоднородному слою ЖВВ, образовавшемуся после вторичного отскока верхнего ролика. При сбрасывании груза с высоты H , соответствующей 100% частости, взрывы в ряде случаев регистрировались в течение времени t_2 (рис. 5), т. е. при первом ударе верхнего ролика по капле ЖВВ. Сигнал тензодатчика, соответствующий этому удару, имел два характерных максимума. Подобный вид осциллограммы удара свидетельствует о непараллельности соударяющихся поверхностей роликов, связанной с перекосом верхнего ролика. При захлопывании клинообразного зазора, вероятно, происходит диспергирование капли ЖВВ и захват воздушных пузырьков, что обеспечивает инициирование взрыва.

Эксперименты по регистрации момента взрыва позволили объяснить результаты другой серии опытов, когда при использовании грузов различной массы ($M=2,5; 5$ и 10 кг) получены кривые частостей взрывов НГЦ, практически совпадающие между собой. Как выяснено выше, инициирование взрыва в ЖВВ связано с ударом верхнего ролика, скорость движения которого определяется только ω_0 и не зависит от M . Для проведения серийных испытаний ЖВВ использовался груз $M=5$ кг.

Масса капель ЖВВ во всех опытах составляла 5—7 мг. Такая навеска была выбрана в соответствии с результатами опытов [4], в которых обнаружено, что частота взрывов при прочих одинаковых условиях является медленно меняющейся функцией массы капель, имеющей максимум в диапазоне от 1 до 10 мг. Действительно, капли массой менее 1 мг после удара по ним образовывали тончайшую жидкую прослойку между роликами, которая лишь заполняет шероховатости их поверхностей. Если брались капли массой более 10 мг, вся энергия ролика тратилась на выдавливание жидкости из зазора, и

датчика. Обрыв верхнего луча (указан стрелой), обусловленный резким отбросом его вниз за пределы экрана, связан с взрывом навески НГЦ.

Результаты большого количества аналогичных опытов с различными ЖВВ показывают, что в подавляющем большинстве случаев при испытании по методу поднятого ролика инициирование взрыва имеет место в течение времени t_4 при ударе верхнего ролика (имеющего скорость ω_3) по слою неоднородного, вспененного ЖВВ. Отклонения от этой закономерности отмечаются лишь вблизи нижних и верхних пределов кривых частостей взрывов исследованных ЖВВ.

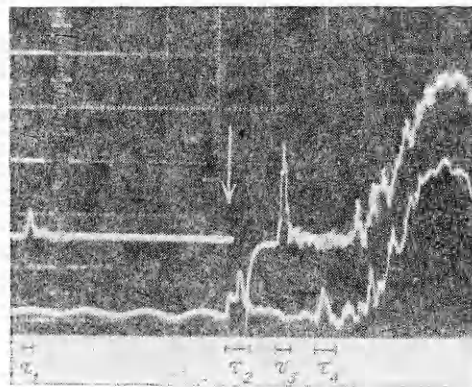


Рис. 5. Осциллограмма удара по капле НГЦ в случае перекоса верхнего ролика.

отскока, необходимого для образования неоднородностей в слое, не было. Удар по сплошному слою не приводит к возбуждению взрыва.

Рассмотренный выше метод испытания был использован в данной работе для исследования чувствительности ряда ЖВВ, существенно различающихся по своим физическим и термодинамическим параметрам.

Были исследованы: нитроглицерин (НГЦ) технический, нитроглицерин (НГ) технический, динитратдиэтиленгликоль чистый и технический, бутилнитрат чистый, бутилендинитрат чистый, нитрометан (НМ) чистый, тетранитрометан (ТНМ) технический и динитратбисметилолфуроксан чистый.

На рис. 6 представлены кривые частоты взрывов для тех ЖВВ, которые взрывались в условиях данных испытаний. Каждая точка получена по результатам не менее 30 опытов. Обнаружено, что из испытанных ЖВВ наиболее высокой чувствительностью к данному виду воздействия обладают чистый динитратдиэтиленгликоль, динитратбисметилолфуроксан и НГЦ — их кривые частоты практически совпадают.

Ряд ЖВВ не удалось взорвать по методу поднятого ролика. К ним относятся бутилнитрат, бутилендинитрат, НМ и ТНМ. Не удалось также исследовать чувствительность смесей НМ/ТНМ и бензол/ТНМ, так как они обладают малой вязкостью и хорошо смачивают поверхность стального ролика, растекаясь по ней тончайшим слоем. Кроме того, указанные смеси обладают высокой летучестью и значительная часть навески испаряется за время, необходимое для подготовки очередного опыта.

Представленный выше анализ механизма эффекта поднятого ролика приводит к выводу о том, что в качестве критерия чувствительности ЖВВ в рассмотренных опытах может быть использована энергия E удара верхнего ролика, вызывающего взрыв в слое неоднородного ЖВВ. Указанные энергии, вычисленные для определенности в точках, соответствующих 50% вероятности возбуждения взрыва ряда ЖВВ, значения высот сбрасывания груза, соответствующие нижним пределам кривых частоты H_0 и 50% частоты взрывов H_{50} , представлены в таблице.

Энергия возбуждения взрывов ЖВВ, испытанных по методу поднятого ролика, не превосходит 1 Дж и близка к значениям характерных энергий удара в известных опытах Ф. П. Боудена [2] по инициированию взрыва в слое НГЦ, содержащем газопузырьки. Необходимо подчеркнуть, что приведенные в таблице значения H_0 и H_{50} нельзя использовать для количественной характеристики чувствительности ЖВВ,

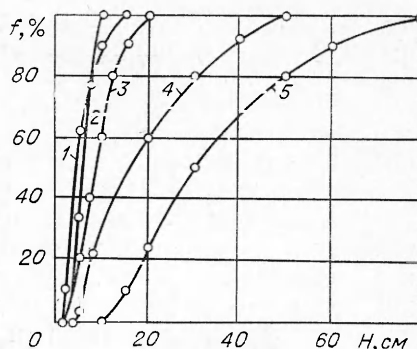


Рис. 6. Кривые частоты взрывов некоторых ЖВВ.

1 — динитратбисметилолфуроксан; 2 — динитратдиэтиленгликоль (чистый); 3 — НГЦ; 4 — НГ; 5 — динитратдиэтиленгликоль (техн.).

ЖВВ	$E(H_{50})$, Дж	H_0 , см	H_{50} , см
Динитратбисметилолфуроксан	0,10	2	4
Динитратдиэтиленгликоль (чистый)	0,13	2,5	5,5
НГЦ	0,21	2,5	8,5
НГ	0,40	4	16
Динитратдиэтиленгликоль (техн.)	0,74	10	30

поскольку, как показано выше, они не отражают существа процессов, приводящих к инициированию взрыва. Построение кривых частот взрывов (см. рис. 6) — промежуточный этап исследования, необходимый для определения скорости w_0 , соответствующей H_{50} . Для последующего определения энергии удара, вызывающего взрыв ЖВВ с вероятностью 50%, использовались данные рис. 3.

Результаты настоящих экспериментов не позволяют сделать всесторонний вывод о чувствительности ЖВВ к механическим воздействиям, так как дают ограниченную информацию о стадии развития взрыва в неоднородной жидкости. В частности, возможно, что относительно большой величиной критического диаметра детонации объясняется отсутствие взрывных явлений при испытании бутилнитрата и бутилендинитрата.

*Институт химической
физики АН СССР,
Москва*

*Поступила в редакцию
11/XII 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.
2. В. Е. Гордеев, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 172, 2, 383.
3. Э. И. Андрианкин, В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ФГВ. 1972, 8, 3.
4. К. К. Андреев, Ю. А. Терехина.— В кн.: Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1963.
5. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др.— В сб.: Взрывное дело, № 63/20. М., «Недра», 1967.
6. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1970, 6, 2.
7. Г. Эберт. Краткий справочник по физике. М., Физматгиз, 1963.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ ОБЛИЦОВКИ УДЛИНЕННОГО КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА И ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КУМУЛЯТИВНОГО НОЖА

Б. И. Шехтер, Л. А. Шушко, С. Л. Крыськов

Кумулятивный эффект [1—6] широко используется в мирной и военной технике. Одновременно ведутся многочисленные исследования с целью расширения области применения и повышения эффективности изделий на его основе, разрабатываются новые кумулятивные заряды.

В последнее время стали применять так называемые удлиненные кумулятивные заряды (УКЗ) [6—8]. Они отличаются от обычных, осесимметричных тем, что при взрыве создают кумулятивный нож.

Наиболее подробно изучено струеобразование осесимметричных кумулятивных зарядов. Явления, связанные с формированием кумулятивного ножа, рассматривались либо применительно к сварке взрывом [9—11], либо в очень специфических условиях [12, 13]. Процесс обжати облицовки УКЗ и формирования кумулятивного ножа имеет существенные особенности и еще слабо изучен. Его понимание необходимо для технического грамотного конструирования и применения удлиненных кумулятивных зарядов. Некоторым из этих вопросов посвящена настоящая статья.