

УДК 544.454:662+536.66

## КОРРЕКТИРОВКА СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К УДАРУ

© 2023 г. А. В. Дубовик\*

Федеральный исследовательский центр им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: a-dubovik@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2022;  
после доработки 14.04.2022;  
принята в печать 20.04.2022

Вопрос о целесообразности использования нового ВВ или смесового состава часто решается по результатам их испытаний на чувствительность к механическим воздействиям (удару, трению и другим), которые обычно выполняются стандартными методами – государственными, отраслевыми и т.д. Однако опыт применения этих методов показывает, что их результативность нередко недостаточно высока и часто имеет место недооценка уровня опасности ВВ в обращении. В статье по результатам анализа лабораторных методов испытаний ВВ на чувствительность к удару – критических давлений и критических энергий, основанных на поиске оптимальных для данного ВВ параметров механического инициирования взрыва, рассматриваются пути модификации существующих стандартов испытаний для повышения их точности при получении данных о показателях чувствительности ВВ.

*Ключевые слова:* взрывчатые вещества, взрывоопасность, чувствительность к удару, методы испытаний, инициирование взрыва, критические условия.

DOI: 10.31857/S0207401X23030056, EDN: LXXDPL

### ВВЕДЕНИЕ

Научно-технические проблемы, возникающие на стадии разработок корректных методов испытаний взрывчатых и прочих энергоёмких материалов на чувствительность к механическим воздействиям, постоянно находятся в центре внимания специалистов, занимающихся созданием безопасных условий для производства и переработки различных видов взрыво- и пожароопасных субстанций [1–4]. Трудность практического решения поставленных задач состоит прежде всего в том, что необходимо одновременно обеспечить как простоту, доступность и малые трудозатраты испытаний, так и высокую точность и воспроизводимость результатов определения показателей чувствительности взрывчатых веществ (ВВ).

Упрощённые методы испытаний, которые положены в основу стандартных методов (государственных, отраслевых и других), как правило, дают недостаточно верные представления о чувствительности ВВ, часто недооценивая их опасность в обращении. Обычно это связано с фиксацией какого-либо методического параметра испытаний – массы образца, энергии удара и пр. В этом случае обычно теряется из вида такой важный показатель испытаний, как фактор критичности условий возникновения взрыва, позволяющий определить максимум чувствительности ВВ

к данному виду воздействия. Критические показатели инициирования ВВ можно установить только при вариации большинства определяющих параметров внешнего воздействия и состояний испытываемого образца. Однако строгое соблюдение принципа вариативности параметров испытаний неизбежно приводит к усложнению исследовательских работ и увеличению трудозатрат.

Ниже рассматриваются достоинства и недостатки некоторых из существующих стандартных и лабораторных методов испытаний ВВ на чувствительность к удару и вносятся предложения по их улучшению на основе последних теоретических и экспериментальных результатов исследований по поведению зарядов твёрдых ВВ при ударе на копре.

### ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ВВ

Метод критических давлений (МКД) для испытаний ВВ на чувствительность к удару был разработан в начале 1960-х годов в ИХФ РАН группой сотрудников под руководством Л.Г. Болховитинова, Г.Т. Афанасьева и В.К. Боболева [5]. Ранее для характеристики чувствительности ВВ использовалась процентная оценка числа взры-

вов при ударах с фиксированными энергиями по зарядам постоянной массы (ГОСТ 4545-48). С введением МКД сформировался новый методологический подход к исследованиям чувствительности ВВ, основанный на глубоком понимании физико-механических процессов при ударе и строго обоснованных количественных данных о критических показателях чувствительности ВВ. Поясним его суть на примере испытаний на чувствительность к удару зарядов из ультрадисперсного перхлората аммония (УДП) с размером частиц 0.8–1.4 мкм. Учитывая тот факт, что критические параметры возбуждения взрыва присущи всем ВВ, то полученные в опытах с зарядами УДП данные об особенностях их поведения при ударе полностью применимы для формирования четких представлений об основах механической чувствительности ВВ с произвольной структурой и направлениях поиска критических условий их инициирования.

При определении чувствительности ВВ по методу критических давлений используются спрессованные под давлением 0.3–0.5 ГПа (в зависимости от прессуемости исследуемого вещества) дискообразные заряды диаметром  $D = 2R$  и толщиной  $h_0 < D$ . Обычно изготавливают заряды с  $D = 10$  мм и  $0.1 \leq h_0 \leq 1.0$  мм. Для осциллографической записи давлений холостого и снаряженного ударов применяются проволочные тензодатчики, а регистрация момента воспламенения или взрыва заряда ВВ осуществляется с помощью фотоэлектрических элементов.

В работах [5–7] показано, что поведение практически всех твердых ВВ, включая всевозможные смесевые составы, при ударе приблизительно одинаково: с начала опыта в течение нескольких десятков микросекунд тонкий заряд сжимается упруго и давление возрастает, как при холостом ударе. Затем при достижении некоторого давления  $P_0$  начинается кратковременная ( $\sim 1$  мкс) пластическая деформация заряда при слабове возрастающем давлении  $P(t)$ , которая сменяется развитым пластическим течением и/или прочностным разрушением заряда, сопровождающимся резким (за время  $t_f \approx 10$ –30 мкс) спадом давления. Именно во время прочностных разрушений зарядов фотоэлементы фиксируют вспышки взрыва.

Спад давления на осциллограмме удара сопровождается высокоскоростным (до 0.5 км/с) разлетом фрагментов разрушения заряда или раскаленных продуктов взрыва в случае инициирования взрывной реакции в радиальном потоке вещества. Если отложить в координатах  $P_0$ – $h_0$  значения давления разрушений, снятые при фиксированной энергии удара  $E_0 = MgH$  ( $H$  – высота сбрасывания груза массой  $M$  на заряд ВВ), то нетрудно установить гиперболический вид полученной зависимости, которая хорошо описывает состояния пре-

дельных нагрузок при сжатии тонких пластических прослоек [5–8]:

$$P_0 = \sigma \left(1 + D/3^{1.5} h_0\right), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – предел прочности образца ВВ на сжатие. Анализ экспериментальной кривой  $P_0(h_0)$  показывает, что взрывы при малых толщинах  $h_0$  фиксируются всегда в момент разрушения заряда, тогда как при больших  $h_0$  отказы чередуются со взрывами, а последние возникают только при повторных, т.е. следующих за первым, разрушениях заряда. Причем заряды большой толщины  $h_b$  (в несколько мм) взорвать практически невозможно, поскольку энергия удара последовательно растрачивается на множестве слабых разрушений.

Для данного ВВ четкую границу по оси  $h_0$  между регулярными и спорадически возникающими взрывами удается провести только при нескольких параллельно выполненных экспериментах. Но даже и в этом случае граничное значение  $h_0$ , получившее название критической толщины заряда ( $h_{кр}$ ), определяется по подсчету количества опытов с равным числом взрывов и, условно говоря, отказов, т.е. по 50%-ной частоте полноценных взрывов. Соответствующее критической толщине давление на прочностной кривой  $P_0(h_0)$  называется критическим ( $P_{кр}$ ). При однократном проведении опыта с зарядами ВВ погрешность определения  $h_{кр}$  и  $P_{кр}$  достаточно высока (15–20%), но при нескольких повторениях эксперимента она снижается до 5–10%. Поскольку тонкие и утолщенные заряды ВВ прессуются неодинаково, ошибка определения величины их прочности  $\sigma$ , значение которой усредняется по результатам расчетов по формуле (1), представляется сравнительно высокой: 15–20%.

Физически величина  $P_{кр}$  определяет давление, создаваемое ударом в заряде ВВ, время разрушения которого,  $t_f$ , равно периоду индукции теплового взрыва,  $t_i$ , инициированного протеканием диссипативных процессов (пластическое течение, фрикционный разогрев и другие) в горячих точках быстро движущейся среды. Энергетическим источником происхождения взрыва является тепло, в которое трансформируется значительная часть упругой энергии

$$E_{кр} = P_{кр}^2 S^2 / 2k, \quad S = \pi R^2, \quad (2)$$

запасаемой в копровой системе нагружения в начальной стадии удара ( $k$  – механическая жесткость копра). Обобщая полученный результат, констатируем, что при всех  $E_0 \geq E_{кр}$  прочностное разрушение ВВ запускает процессы сброса энергии из копровой системы нагружения в заряд, ее расходования на движение и разогрев продуктов разрушения и инициирование взрыва. Энергия удара  $E_0$  также определяет максимальную толщину

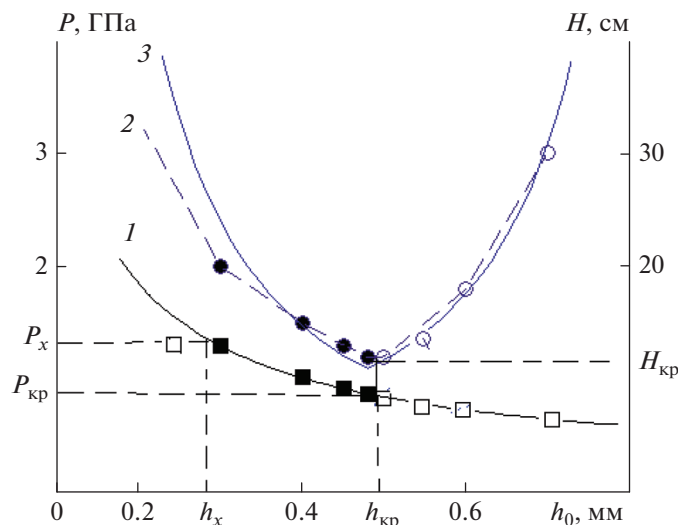


Рис. 1. Зависимость параметров удара от толщины зарядов УДП: 1 – давление  $P(h_0)$ , 2 – высота сбрасывания груза  $H(h_0)$ , 3 – расчет значений давления и энергии по формулам (1), (4). Точки – эксперимент.

ну заряда ( $h_x$ ), который невозможно разрушить ударом (“сверхтонкий” заряд), и соответствующее ей давление холостого удара ( $P_x$ ):

$$h_x = D \left[ 3^{1.5} (P_x/\sigma - 1) \right]^{-1}, \quad P_x = S^{-1} (2E_0 k)^{1/2}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что при уменьшении  $E_0$  снижается давление  $P_x$  и возрастает толщина заряда  $h_x$ . При ударе по зарядам толщиной  $h_0 < h_x$  давление  $P(t)$  изменяется по закону холостого опыта (синусоидально). Заряды толщиной  $h_x < h_0 \leq h_{кр}$  взрываются регулярно, поскольку при их разрушении время  $t_i \leq t_f$ . Для зарядов толщиной  $h_{кр} < h_0 < h_b$  справедливо условие  $t_i > t_f$ , и вероятность их взрывов (при повторных разрушениях) монотонно снижается до нуля по мере того как  $h_0 \rightarrow h_b$ . На рис. 1 приведена прочностная кривая  $I$  для зарядов УДП, снятая в экспериментах с  $E_0 = 24.5$  Дж ( $P_x = 1.32$  ГПа), на которой темными квадратами отмечены усредненные по трем параллельным опытам взрывы, а светлыми – их отсутствие при первом акте разрушения зарядов, а также штриховыми прямыми показано положение критической точки:  $h_{кр} = 0.48$  мм,  $P_{кр} = 0.88$  ГПа; здесь значения  $\sigma = 175$  МПа,  $h_x = 0.3$  мм. Отметим, что несомненным достоинством МКД является тот факт, что регистрируемые с его помощью критические параметры инициирования ВВ не зависят от энергии удара, лишь бы выполнялось условие прочности (1) при  $h_0 > h_x$ .

Развитием МКД в направлении отказа от сложного аппаратного инструментария, но не в ущерб значимости получаемых в эксперименте результатов, стала разработка лабораторного метода критических энергий (МКЭ), выполненная

автором с сотр. (А.А. Денисаевым, М.В. Лисановым и др.) в ИХФ РАН в 1970-х годах [7]. Как и в испытаниях по МКД методом КЭ испытываются на удар тонкие хорошо спрессованные (давление прессования 0.3–0.5 ГПа) заряды ВВ разной толщины  $h_0$ , но по которым наносятся удары с варьируемой энергией  $E_0$ . Регистрация взрыва или отказа проводится по наличию или отсутствию характерных для взрывных экспериментов аудиовизуальных эффектов. Основной недостаток органолептической процедуры регистрации взрыва–отказа компенсируется хорошо воспроизводимыми результатами многократно повторяемых опытов с ВВ (по 25 опытов с зарядом заданной толщины). Для этого в опытах с зарядами разной  $h_0$  снимаются полные кривые частоты взрывов  $f(H)$ , из которых определяются значения их нижних,  $H_0$ , и верхних,  $H_{100}$ , пределов чувствительности к удару и высоты  $H_{50}$ , при которой фиксируются 50% взрывов. Следует указать, что, применяя МКЭ, можно проводить испытания на чувствительность к удару пастообразных и вязкотекучих ВВ, что недоступно при использовании МКД.

На рис. 2 приведена кривая зависимости  $f(H)$  с указанием ее характеристических точек, снятая в опытах с зарядами УДП толщиной  $h_0 = 0.3$  мм с использованием прибора со свободным истечением вещества и с грузом массой  $M = 10$  кг. Она имеет обычную для частотных экспериментов S-образную форму, что позволяет надежно (не хуже чем с 10%-ной точностью) определить высоту  $H_{50} = 20$  см. После определения величины  $H_{50}$  из опытов с зарядами другой толщины строится кривая зависимости  $H_{50}(h_0)$ . По описанной процедуре получены кривые зависимостей  $H_0(h_0)$  и

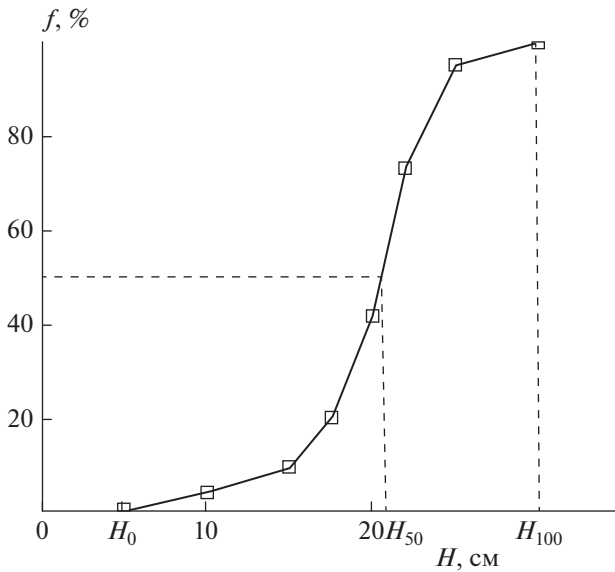


Рис. 2. Кривая частот взрывов  $f(H)$  для зарядов УДП с  $h_0 = 0.3$  мм.

$H_{100}(h_0)$ . На рис. 3 представлены все три указанные кривые. Они имеют характерную U-образную форму и минимальные значения при единой для них толщине заряда  $h_0 = 0.48$  мм, которая полностью совпадает с критической толщиной зарядов УДП  $h_{кр}$ , найденной в опытах по МКД.

Совпадение критических толщин зарядов при инициировании ВВ в методически независимых экспериментах по МКЭ и МКД не является случайным. Оно свидетельствует о том, что показатель  $h_{кр}$  (точнее,  $h_{кр}/D$ ) является определяющей характеристикой чувствительности ВВ, по которой рассчитываются значимые для практики критические параметры механического инициирования — давление  $P_{кр}$  и энергия  $E_{кр}$ . На рис. 1 наряду с кривой зависимости  $P_0(h_0)$  штриховой кривой 2 приведена зависимость  $H_{50}(h_0)$ , в соответствии с которой находим значения  $h_{кр} = 0.48$  мм,  $H_{кр} = 11$  см и  $E_{кр} = 10.8$  Дж.

Из анализа хода кривых 1 и 2 рис. 1 следуют выводы, подтвержденные тензометрическими экспериментами:

1) на левой ветви кривой 2 ( $h_0 \leq h_{кр}$ ) черными точками отмечены взрывы, возникающие при первом акте разрушений зарядов, тогда как на ее правой ветви ( $h_0 > h_{кр}$ ) взрывы, возникающие лишь при повторных разрушениях, отмечены светлыми точками;

2) наряду с  $H_0(h_{кр})$  параметр  $H_{50}(h_{кр}) = H_{кр}$  характеризует (на уровне 50%-ной частоты взрывов) наименьшую энергию удара, способного инициировать заряд ВВ. Действительно, из выражения (3) и расположения сходящихся к значению  $H_{кр}$  ветвей

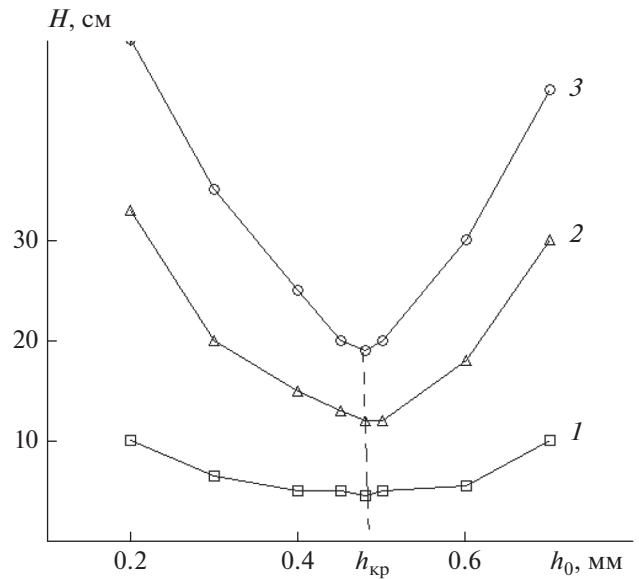


Рис. 3. Значения нижних (1) и верхних (3) пределов инициирования взрыва, а также точек с 50%-ной вероятностью возбуждения взрыва (2) на кривых частот взрывов в зависимости от толщины зарядов УДП.

кривой 2 следует, что при снижении энергии удара  $E_0$  одновременно расширяются зоны отказов слева ( $h_x \rightarrow h_{кр}$ ) и справа ( $h_b \rightarrow h_{кр}$ ) от  $h_{кр}$ . Поэтому при  $E_0 \rightarrow E_{кр}$  имеем в пределе  $h_0 = h_{кр}$  и  $P_x = P_{кр}$ ;

3) расположение экспериментальных значений  $P_{кр}$  и  $E_{кр}$  на единой абсциссе  $h_{кр}$  предусматривает аналитическую связь между ними не только в критических условиях инициирования, но и для всех параметров разрушений зарядов,  $P_0$  и  $E_0$ , найденных при заданной толщине  $h_0$ . Она записывается в виде (2) или в общем виде как

$$E_0 = aP_0^2, \quad a = 5S^2/K = 14.0 \text{ Дж/ГПа}^2, \quad (4)$$

если положить экспериментальные характеристики испытаний равными  $S = 0.785 \text{ см}^2$ ,  $K = 0.22 \text{ ГН/м}$ , а величины  $P_0$  и  $E_0$  выражать в ГПа и Дж соответственно. Сплошной линией 3 на рис. 1 показана построенная по формулам (1), (4) левая ( $h_0 \leq h_{кр}$ ) ветвь зависимости  $H_{50}(h_0)$ , а ее правая ветвь представлена как зеркальное отражение левой. Отсюда следует, что кривые зависимости  $H(h_0)$  можно приближенно рассматривать как параболические функции для всех значений  $h_0$ , близких к  $h_{кр}$ .

## О СТАНДАРТНЫХ МЕТОДАХ ИСПЫТАНИЙ

Согласно действующему ГОСТ 4545-88 испытания твердых ВВ на чувствительность к удару проводят по двум методам и в двух приборах: 1 и 2, называемых приборами с затрудненным и свободным истечением вещества соответственно [5].

## ВЫВОДЫ

Ударам подвергаются заряды постоянной массы  $m = 50$  мг в приборе 1 и заряды с  $m = 100$  мг в приборе 2. С помощью прибора 2 определяется нижний предел чувствительности,  $H_0$ , т.е. проводятся испытания по типу, представленному выше как испытания по МКЭ. Полученные результаты для УДП приведены на рис. 3 (кривая 1). Из него видно, что заряд УДП толщиной 0.7 мм ( $m = 100$  мг) взрывается при  $H_0 = 16$  см, тогда как при толщине  $h_{кр} = 0.48$  мм ( $m = 70$  мг) величина нижнего предела составляет  $H_0 = 7.5$  см. Отсюда следует, что в данном показательном примере чувствительность УДП, определенная по ГОСТ, оказалась бы существенно недооцененной. Так же обстоит дело и с оценками чувствительности других ВВ, включая оценки, полученные в экспериментах с прибором 1. В лабораторных опытах с этим прибором [7] установлено, что значение  $h_{кр}$  зарядов тетрила, при котором частота их взрывов наиболее высока (до 100%), составляет 0.3 мм, тогда как рекомендуемые для испытаний по ГОСТ заряды тетрила должны иметь  $h_{кр} = 0.4$  мм, при которой частота взрывов составляет не более 45%.

Заметим, что для получения достаточно корректной оценки чувствительности ВВ по МКЭ можно не снимать полную кривую частот взрывов, а ограничиться поиском минимального значения нижнего предела, варьируя толщину (массу) заряда. Таким способом определяется отрезок U-образной кривой с минимумом в точке  $h_{кр}$ , по которой находились объективные показатели чувствительности ВВ к удару — величина  $E_{кр}$  и далее —  $P_{кр}$ .

Корректная оценка чувствительности ВВ по методу 1, согласно которому находится процент взрывов при ударе груза с высоты 25 см, представляется более простой. Определяются частоты взрывов в нескольких сериях опытов с зарядами различной массы (толщины) и выбирается наибольшая частота взрывов. Соответствующая ей толщина зарядов равна критической.

1. Уточнены физические механизмы процессов возбуждения взрыва, положенные в основу создания лабораторных методов критических давлений и энергий для испытаний твердых ВВ на чувствительность к удару. Экспериментально показано существование минимально возможного значения энергии удара для возбуждения взрыва заряда ВВ, которое принято в качестве критического для энергии инициирования.

2. Установлены недостатки стандартных методов испытаний ВВ, недооценивающих уровень их чувствительностей к удару, и предложены способы модификации существующих методов для приведения их к уровню корректных оценок.

Настоящая работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ “Процессы горения и взрыва” (регистрационный номер 122040500073-4) и имела бюджетное финансирование.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назин Г.М., Корсунский Б.Л. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 53.
2. Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 53.
3. Дубовик А.В. Хим. физика. 2020. Т. 40. № 8. С. 76.
4. Махов М.Н. Хим. физика. 2021. Т. 39. № 1. С. 23.
5. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
6. Дубовик А.В. // Горение и взрыв. 2021. Т. 14. № 3. С. 130; <https://doi.org/10.30826/CE21140312>
7. Дубовик А.В. Чувствительность твердых взрывчатых систем к удару. М.: Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011.
8. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.