

УДК 541.126

## ВЛИЯНИЕ ПЛОЩАДИ СДВИГА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ВЗРЫВА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ УДАРНОМ СДВИГЕ

Н. А. Билык, А. Л. Михайлов, В. П. Ханин, А. С. Михайлов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, Kolodey@cdfirst.vniief.ru

Показана зависимость давления прижатия, приводящего к взрыву при ударном сдвиге, от площади сдвига (площади контакта взрывчатого вещества (ВВ) с металлической поверхностью). Экспериментально подтверждена зависимость вероятности взрыва ВВ (флегматизированный октоген, тэн), сжатого между двумя стальными плоскостями (торцами двух роликов), от давления прижатия и площади контакта ВВ с верхним роликом в испытаниях на чувствительность к трению при ударном сдвиге. Сдвиг верхнего ролика осуществлялся на 1,5 мм. Показано, что увеличение площади контакта ВВ с роликом при прижатии ВВ приводит к увеличению вероятности взрыва ВВ при сдвиге верхнего ролика при одних и тех же давлениях прижатия ВВ. Установлен масштабный фактор влияния площади контакта ВВ с поверхностью ролика на давление, при котором происходит взрыв ВВ при ударном сдвиге смежной с ВВ поверхности. Статистическими методами показано, что давление, приводящее к взрыву ВВ при ударном сдвиге смежной стальной поверхности относительно ВВ, распределено по двухпараметрическому закону Вейбулла.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, чувствительность к трению, вероятность взрыва, закон распределения, взрыв ВВ при ударном сдвиге.

Известно [1, 2], что с увеличением размера детали снижаются ее прочностные характеристики, например, для хрупких материалов — это предел прочности, для пластичных материалов — предел усталости. Причина данного эффекта заключается в увеличении вероятности появления критического дефекта (трещин, пор, жестких включений и т. д.) с ростом объема детали. Возникает вопрос, влияет ли размер детали из взрывчатого вещества (ВВ) в изделии на уровень критической действующей нагрузки, при которой происходит взрыв ВВ. Критическими дефектами, приводящими к взрыву ВВ, могут быть, например, «горячие точки» [3, 4].

Оценка очагов разогрева показывает [5], что для того, чтобы вызвать самораспространяющееся взрывчатое превращение ВВ, достаточно одновременного распада двух-трех соседних молекул. По данным [6] минимальный очаг, который способен вызвать взрыв ВВ (например, тэна, гексогена, тетрила) при ударе, должен иметь температуру не ниже  $400 \div 600$  °С, диаметр  $\approx 10^{-5} \div 10^{-7}$  м, время существования очага взрыва  $\approx 10^{-3} \div 10^{-5}$  с. Такие очаги могут быть получены даже при

слабых воздействиях. Минимальная энергия, необходимая для образования очага, составляет всего лишь  $\approx 10^{-7}$  кал. В твердых ВВ одним из механизмов возникновения горячих точек может быть неоднородность неупругой деформации под действием динамических нагрузок в силу неоднородности исходного объекта — трение частиц ВВ между собой, пластическая деформация отдельных частиц, их разрушение, поры, жесткие включения и т. п. [3]. Горячая точка также может быть каналом локального электрического пробоя [7].

Одним из воздействий, приводящих к взрыву ВВ, является действие на детали из ВВ давления со сдвигом в условиях, когда подвергающаяся нагружению деталь из ВВ может проскальзывать по смежной детали изделия. В [8] теоретически рассматривалась задача иницирования взрыва ВВ при низкоскоростных воздействиях от нагрева поверхности ВВ в результате трения внедряющегося сферического предмета.

Привлекая статистический подход [9], можно показать, что к взрыву ВВ приводит максимально горячий очаг в детали при заданном давлении. Как показывают испытания на чувствительность ВВ стандартными методами [5], наиболее опасным нагружением ВВ является трение при ударном сдвиге.

Для исследования влияния площади прижатия ВВ на вероятность взрыва при ударном сдвиге в экспериментах использовался штатный прибор маятникового типа К-44-3 [10] (см. также [11, 12]) с роликами диаметром 10 мм. С целью увеличения площади прижатия ВВ применяли также ролики  $\varnothing 20$  и 25 мм. Толщина слоя ВВ между роликами около 0.3 мм. Смещение верхнего ролика составляло 1.5 мм.

Количество возможных горячих очагов даже при испытании ВВ в роликах диаметром 10 мм может быть достаточно большим. Это позволяет в качестве распределения давления  $P$  прижатия роликов ( $P$  — случайная величина), приводящего к взрыву ВВ при ударном сдвиге, принять трехпараметрический закон Вейбулла (распределение минимальных членов выборки [9]):

$$F(P < p) = q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p - p_0}{p_c} \right)^\alpha \right], \quad (1)$$

где  $q$  — вероятность взрыва при прижатии ВВ давлением  $p$ ;  $p_0$ ,  $p_c$ ,  $\alpha$  — параметры распределения (сдвига, масштаба и формы соответственно).

Избавляясь от степени в выражении функции распределения (1), получаем выражение

$$\ln[-\ln(1 - q)] = \alpha[\ln(p - p_0) - \ln p_c]. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены графики функции  $\ln[-\ln(1 - q)] = f[\ln(p - p_0)]$ , построенные по результатам испытаний ВВ на основе флегматизированного октогена (далее октоген) в приборах с роликами  $\varnothing 10$ , 20 и 25 мм. При заданном давлении проводилось по  $n = 25$  экспериментов, из них в  $m$  опытах были взрывы. Испытания с  $q = 100\%$  и  $q = 0$  заменены на  $q = (n + 1)/(n + 2) = 0.96$  и  $q = 1/(n + 2) = 0.037$ .

Смещение параллельных прямых, построенных для трех серий опытов с вышеречисленными диаметрами роликов, относительно друг друга свидетельствует о влиянии на давление инициирования взрыва масштабного фактора (площади контакта ВВ с металлической поверхностью верхнего ролика при ударном сдвиге), причем тем сильнее, чем больше площадь контакта ВВ при ударном сдвиге.

Величину смещения прямых определяли, приравнявая  $\ln[-\ln(1 - q)]$  нулю.

Уравнения регрессионных зависимостей частот взрыва ВВ, полученные по данным

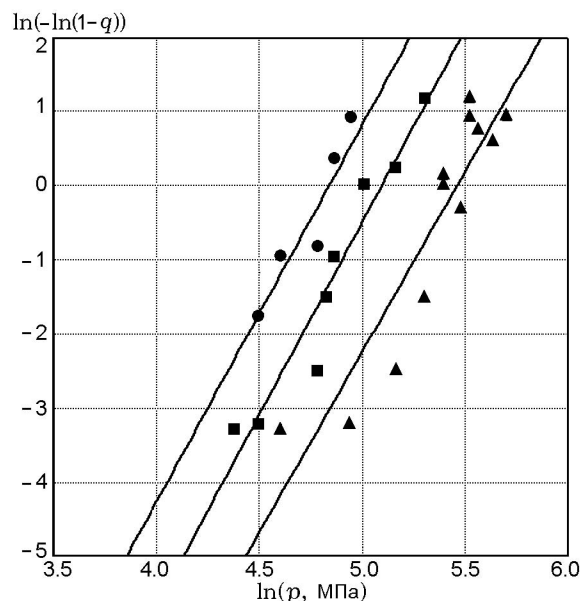


Рис. 1. Линии регрессии, построенные по данным испытаний октогена:

▲ — опыты с роликами  $\varnothing 10$  мм,  $\ln[-\ln(1 - q)] = -26.5029 + 4.853 \ln p$ ; ■ —  $\varnothing 20$  мм,  $\ln[-\ln(1 - q)] = -26.3692 + 5.1745 \ln p$ ; ● —  $\varnothing 25$  мм,  $\ln[-\ln(1 - q)] = -24.5468 + 5.0717 \ln p$

серий опытов в приборах с роликами  $\varnothing 20$  и 25 мм, отличаются от уравнения для опытов с роликами  $\varnothing 10$  мм только свободным членом. Поэтому каждое из уравнений можно уточнить, присоединив результаты опытов с роликами других размеров (для кривой, построенной по данным опытов с  $\varnothing 10$  мм, присоединяем результаты опытов с роликами  $\varnothing 20$  и 25 мм; для  $\varnothing 20$  мм — опыты с  $\varnothing 10$  и 25 мм; для  $\varnothing 25$  мм — опыты с  $\varnothing 10$  и 20 мм). Зависимости, построенные по объединенным данным, приведены на рис. 2.

Коэффициент при  $\ln p$  есть не что иное, как параметр формы  $\alpha$  (показатель степени в экспоненте функции распределения вероятностей (см. формулы (1), (2)), т. е.  $\alpha \approx 5$ ).

В общем виде уравнение регрессии для частот взрывов по данным опытов в приборах с роликами  $\varnothing 20$  и 25 мм имеет следующий вид:

$$\ln[-\ln(1 - q)] = \alpha[\ln(p - p_0) - \ln p_c + \ln K],$$

где  $\ln K$  — дополнительный член, учитывающий масштабный фактор.

Проводя обратные преобразования, т. е. избавляясь от логарифмов в левой и правой частях уравнения, получаем функцию распреде-

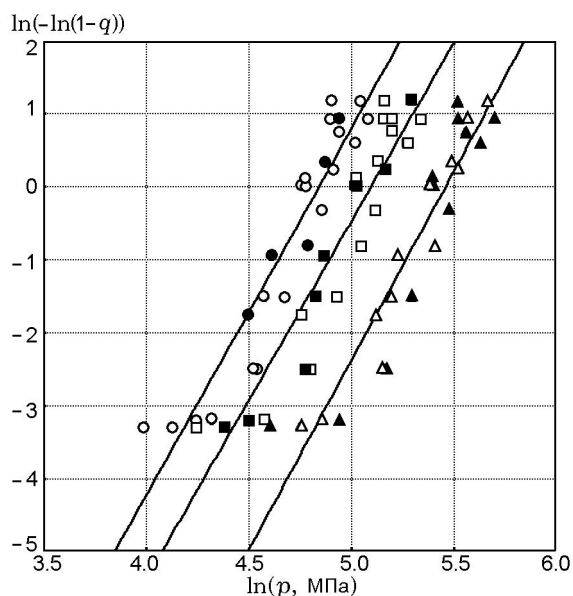


Рис. 2. Линии регрессии, построенные по объединенным данным опытов с октогеном:

$\Delta, \blacktriangle$  — опыты с роликами  $\varnothing 10$  мм,  $\ln[-\ln(1-q)] = -27.323 + 5.0019 \ln p$ ;  $\square, \blacksquare$  —  $\varnothing 20$  мм,  $\ln[-\ln(1-q)] = -25.4966 + 5.0019 \ln p$ ;  $\circ, \bullet$  —  $\varnothing 25$  мм,  $\ln[-\ln(1-q)] = -24.216 + 5.0019 \ln p$ ; светлые точки — данные опытов с другими диаметрами роликов

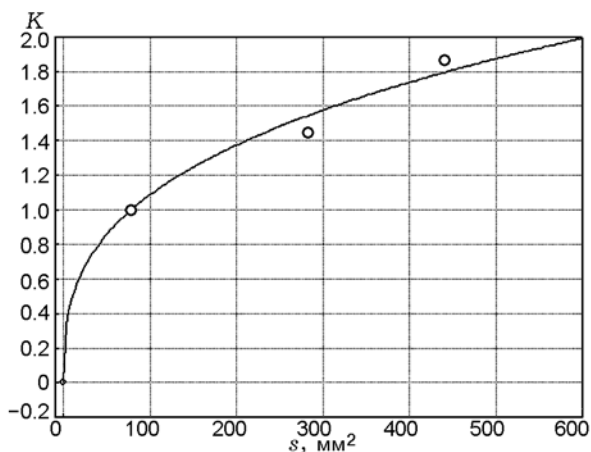


Рис. 3. Зависимость масштабного коэффициента от площади прижатия ролика для октогена ( $K = (s/78.5)^{1/2.95}$ )

ления вероятностей взрыва ВВ в приборах с роликами  $\varnothing 20$  и  $25$  мм:

$$q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p - p_0}{p_c} K \right)^\alpha \right]. \quad (3)$$

Масштабный коэффициент  $K$  определяется в виде  $(s/s_0)^{1/\beta}$ , где  $1/\beta$  — показатель, при

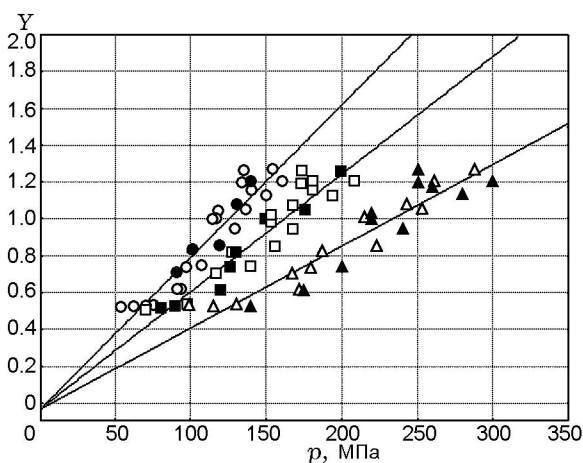


Рис. 4. Регрессионные зависимости, построенные по объединенным данным для октогена:

$\Delta, \blacktriangle$  — опыты с роликами  $\varnothing 10$  мм,  $Y = -0.0362 + 0.0044p$ ;  $\square, \blacksquare$  —  $\varnothing 20$  мм,  $Y = -0.0357 + 0.0064p$ ;  $\circ, \bullet$  —  $\varnothing 25$  мм,  $Y = -0.0392 + 0.0083p$ ; светлые точки — данные опытов с другими диаметрами роликов

котором получаемая по формуле (3) зависимость наилучшим образом соответствует экспериментальным данным,  $s_0$  — площадь торца ролика  $\varnothing 10$  мм,  $s$  — площадь прижатия ролика. Для расчета  $\beta$  значения  $K$  брали из трех серий опытов с ВВ. При испытании ВВ в приборах с роликами  $\varnothing 20$  и  $25$  мм контактная площадь составляла 0.9 от площади торца ролика. Величина  $\beta$ , оцененная по методу наименьших квадратов для октогена, равнялась  $\beta = 2.95$ . График функции  $K = (s/s_0)^{1/\beta}$ , полученной при  $\beta = 2.95$ ,  $s_0 = 78.5 \text{ мм}^2$ , показан на рис. 3.

Методом наименьших квадратов получено значение параметра масштаба  $p_c = 233.6$  МПа и параметра сдвига  $p_0 \approx 0$  (с малым разбросом около нуля).

Параметр сдвига  $p_0$  можно оценить другим способом. Для этого в выражении (1) необходимо избавиться от степени и для  $K = 1$  получить уравнение вида

$$[-\ln(1-q)]^{1/\alpha} = \frac{p - p_0}{p_c}. \quad (4)$$

Зависимости  $\{Y = [-\ln(1-q)]^{1/\alpha}, p\}$ , где  $\alpha = 5$ , представлены на рис. 4.

Линии регрессии (4), построенные по объединенным данным испытаний ВВ тэна на удар со сдвигом, приведены на рис. 5. Масштабный коэффициент  $K$  в уравнении (3) получен при  $\beta = 2.32$ ,  $\alpha = 4$ ,  $p_c = 380$  МПа,  $p_0 = 0$ .

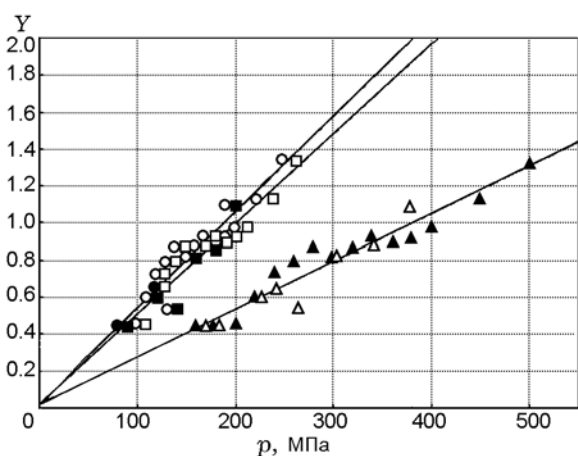


Рис. 5. Регрессионные зависимости, построенные по объединенным данным для тэна:

Δ, ▲ — опыты с роликами Ø10 мм,  $Y = 0.0173 + 0.0026p$ ; □, ■ — Ø20 мм,  $Y = 0.0173 + 0.0049p$ ; ○, ● — Ø25 мм,  $Y = 0.0173 + 0.0052p$ ; светлые точки — данные опытов с другими диаметрами роликов

Параметры функции распределения (3) для опытов на чувствительность флегматизированного октогена и тэна к трению при ударе со сдвигом приведены в таблице.

Функция распределения вероятностей давления со сдвигом, приводящего к взрыву ВВ (флегматизированный октоген), в сериях опытов с роликами Ø10, 20, 25 мм принимает вид

$$F(P < p) = q = 1 - \exp \left\{ - \left[ \frac{p}{p_c} \left( \frac{s}{s_0} \right)^{1/2.95} \right]^5 \right\}, \quad (5)$$

или для каждого размера роликов:

а) ролики Ø10 мм

$$q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p}{233.6} \right)^5 \right], \quad p_{0.5} \approx 220 \text{ МПа}$$

(при  $p = p_{0.5}$ ,  $q = 0.5$ );

б) ролики Ø20 мм

$$q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p}{151.3} \right)^5 \right], \quad p_{0.5} \approx 141 \text{ МПа};$$

в) ролики Ø25 мм

$$q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p}{130.1} \right)^5 \right], \quad p_{0.5} \approx 121 \text{ МПа.}$$

Параметры функции распределения вероятностей давления со сдвигом

ВВ	$\beta$	$\alpha$	$p_c$ , МПа	$p_0$ , МПа
Флегматизированный октоген	2.95	5	233.6	0
Тэн	2.32	4	380	0

Параметр сдвига  $p_0$ , являющийся минимальным значением давления, выше которого начинаются взрывы ВВ, в распределении Вейбулла равен нулю, т. е. при действии даже малых давлений со сдвигом по схеме проведения опытов «стальной ролик — ВВ — стальной ролик» формально существует вероятность взрыва.

Вероятность взрыва ВВ при ударном сдвиге смежной детали (поверхности) в конструкции изделия определяется по двухпараметрическому закону Вейбулла (3) с параметрами для флегматизированного октогена, тэна, приведенными в таблице.

## ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное и расчетное исследование влияния площади сдвига стального ролика относительно ВВ (флегматизированный октоген, тэн) на вероятность взрыва ВВ в испытаниях на чувствительность к трению при ударном сдвиге.

Установлен масштабный фактор влияния площади контакта ВВ с металлической поверхностью на давление взрыва ВВ при ударном сдвиге смежной с ВВ поверхности, т. е. показано, что увеличение площади контакта приводит к снижению давления взрыва ВВ при ударном сдвиге.

Давление со сдвигом, при котором происходит взрыв ВВ, подчиняется двухпараметрическому закону Вейбулла. Оценены параметры закона Вейбулла давления взрыва ВВ (флегматизированный октоген, тэн) при ударном сдвиге ролика.

Авторы благодарны А. В. Дубовику (ИХФ, г. Москва) за высказанные предложения и замечания при прочтении статьи.

Опыты проведены В. Г. Василенко и А. С. Михайловым.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Конторова Т. А.** Статистическая теория прочности. I // Журн. техн. физики. — 1940. — Т. 10, вып. 11. — С. 886–890.
2. **Болотин В. В.** Статистические методы в строительной механике. — М.: Стройиздат, 1961.
3. **Харитон Ю. Б.** Сборник по теории взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1940. — С. 177.
4. **Dremin A. N.** Toward Detonation Theory. — Springer Verlag, 1999.
5. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. — М.: Наука, 1968. — С. 172.
6. **Боуден Ф. П., Иоффе А. Д.** Быстрые реакции в твердых телах. — М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
7. **Борисенок В. А., Бельский В. М.** Об электрическом механизме образования «горячих точек» в конденсированных взрывчатых веществах // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: IX Харитоновские чтения. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. — С. 56–63.
8. **Мартынова М. Е., Гушанов А. Р., Чернышев Ю. Д.** Кинетика инициирования взрывчатых превращений за счет трения при низкоскоростных воздействиях в рамках методики Д // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. — 2010. — Вып. 3. — С. 55–64.
9. **Гумбель Э.** Статистика экстремальных значений. — М.: Мир, 1965.
10. **ГОСТ Р 50835-95.** Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения характеристик чувствительности к трению при ударном сдвиге.
11. **Боуден Ф. П., Иоффе А. Д.** Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. — М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
12. **Описание** изобретения к а. с. № 158727. Козлов В. С., Ростенко Д. В., Кузнецов П. Г., Мамаев В. А., Муратов С. М., Умнова Р. С. Способ определения чувствительности к трению взрывчатых веществ, порохов и пиротехнических составов // Бюл. изобрет. и товарн. знаков. — 1963. — № 22.

*Поступила в редакцию 21/VII 2007 г.,  
в окончательном варианте — 15/VI 2012 г.*

---