

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

*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.*

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 деталей. Возникает вопрос, влияет ли размер детали из 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 400–600 °С, диаметр  $\approx 10^{-5}$ – $10^{-7}$  м, время существования очага взрыва  $\approx 10^{-3}$ – $10^{-5}$  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 неод-

нородности 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 подвергшаяся нагружению деталь из ВВ может проскальзывать по смежной детали изделия. В [8] теоретически рассматривалась задача инициирования 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 Ø20 и 25 мм. Толщина слоя ВВ между роликами составляла ~0,3 мм. Смещение внешнего 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 Ø10, 20 и 25 мм. При заданном давлении проводилось по  $n = 25$  экспериментов, из которых в  $m$  опытах были взрывы. Испытания с  $q = 100\%$  и  $q = 0$  заменены на  $q = \frac{n+1}{n+2} = 0,96$

и  $q = \frac{1}{n+2} = 0,037$ .

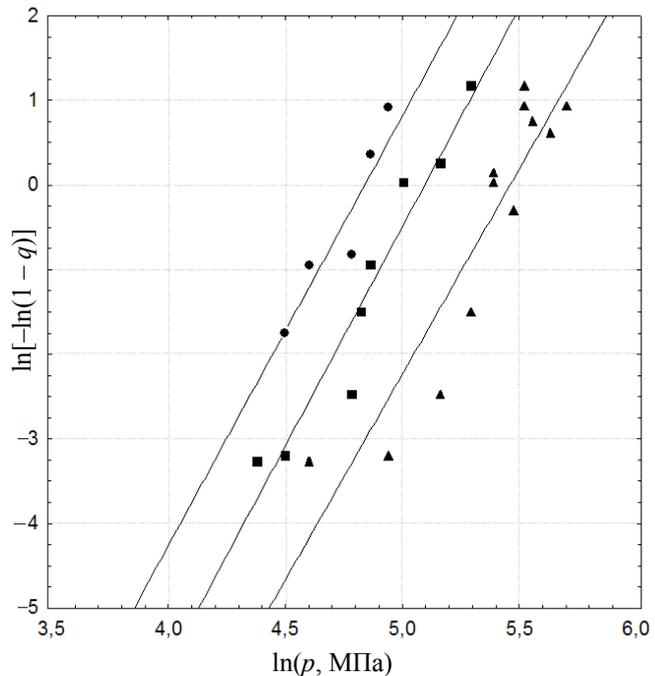


Рис. 1. Линии регрессии, построенные по данным испытаний октогена:  $\blacktriangle$  – опыты с роликами Ø10 мм,  $\ln[-\ln(1 - q)] = -26,5029 + 4,853 \ln p$ ;  $\blacksquare$  – Ø20 мм,  $\ln[-\ln(1 - q)] = -26,3692 + 5,1745 \ln p$ ;  $\bullet$  – Ø25 мм,  $\ln[-\ln(1 - q)] = -24,5468 + 5,0717 \ln p$

Смещение параллельных прямых, построенных для трех серий опытов с вышеперечисленными 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, приравняв  $\ln[-\ln(1-q)]$  нулю.

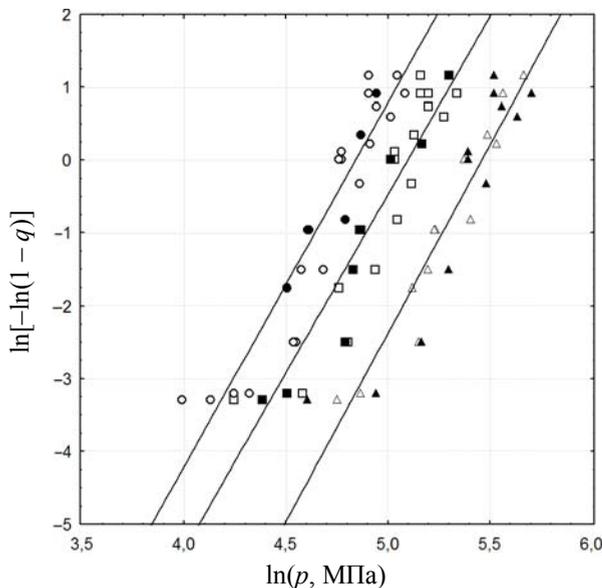


Рис. 2. Линии регрессии, построенные по объединенным данным опытов с октогеном:  $\Delta, \blacktriangle$  – опыты с роликами  $\varnothing 10$  мм,  $\ln[-\ln(1-q)] = -27,323 + 5,0019 \ln p$ ;  $\square, \blacksquare$  –  $\varnothing 20$  мм,  $\ln[-\ln(1-q)] = -25,4966 + 5,0019 \ln p$ ;  $\circ, \bullet$  –  $\varnothing 25$  мм,  $\ln[-\ln(1-q)] = -24,216 + 5,0019 \ln p$ ; светлые точки – данные опытов с другими диаметрами роликов

Уравнения регрессионных зависимостей частот взрыва ВВ, полученные по данным для серий опытов в приборах с роликами  $\varnothing 20$  мм 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 распределения 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  $K$  определялся в виде  $(s/s_0)^{1/\beta}$ , где  $1/\beta$  – показатель, при 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.

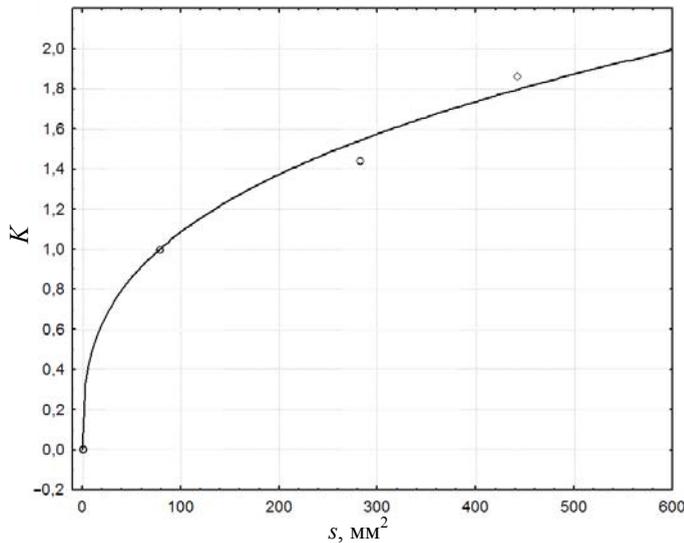


Рис. 3. Зависимость масштабного коэффициента от площади прижатия ролика для октогена ( $K = s/78,5)^{1/2,95}$

Методом наименьших квадратов получено значение параметра масштаба  $p_c = 233,6 \text{ МПа}$  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

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

Зависимости  $\left\{ Y = [-\ln(1 - q)]^{1/\alpha}, p \right\}$ , 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  $\beta = 2,32$ ;  $\alpha = 4$ ;  $p_c = 380 \text{ МПа}$ ,  $p_0 = 0$ .

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

Параметры функции распределения вероятностей давления со сдвигом

ВВ	$\beta$	$\alpha$	$p_c, \text{ МПа}$	$p_0, \text{ МПа}$
Флегматизированный октоген	2,95	5	233,6	0
Тэн	2,32	4	380	0

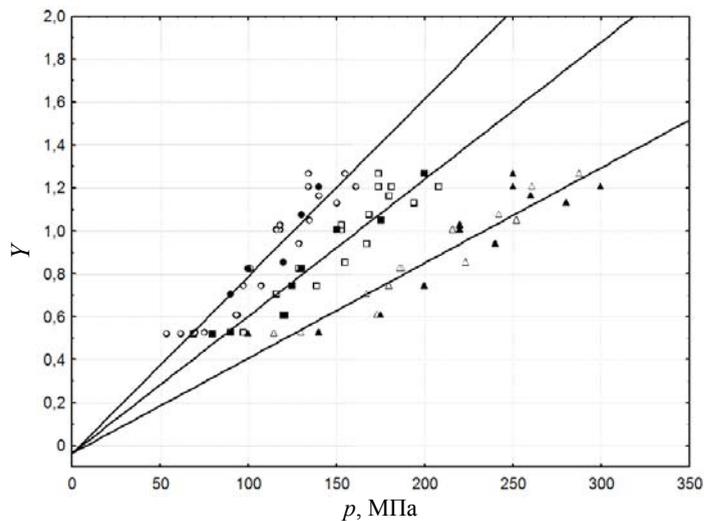


Рис. 4. Регрессионные зависимости, построенные по объединенным данным для октогена:  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – опыты с роликами  $\varnothing 10$  мм,  $Y = -0,0362 + 0,0044p$ ;  $\square$ ,  $\blacksquare$  –  $\varnothing 20$  мм,  $Y = -0,0357 + 0,0064p$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$  –  $\varnothing 25$  мм,  $Y = -0,0392 + 0,0083p$ ; светлые точки – данные опытов с другими диаметрами роликов

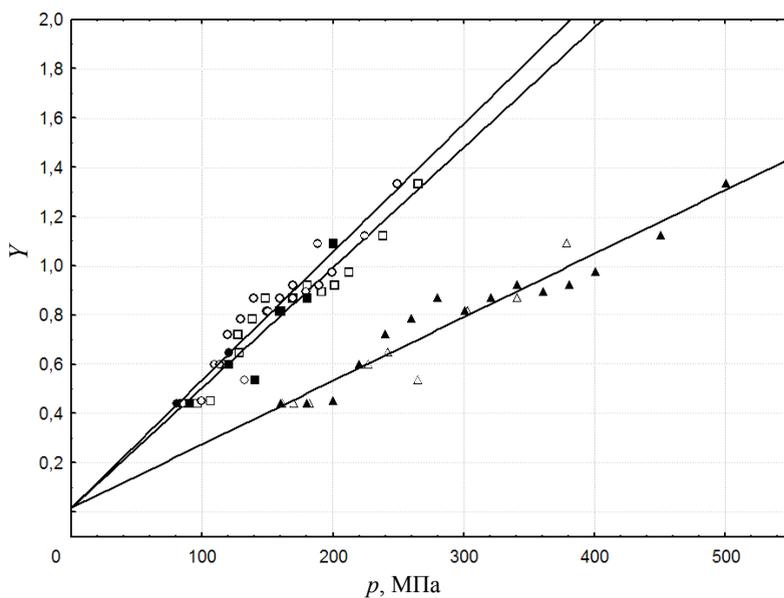


Рис. 5. Регрессионные зависимости, построенные по объединенным данным для тэна:  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – опыты с роликами  $\varnothing 10$  мм,  $Y = 0,0173 + 0,0026p$ ;  $\square$ ,  $\blacksquare$  –  $\varnothing 20$  мм,  $Y = 0,0173 + 0,0049p$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$  –  $\varnothing 25$  мм,  $Y = 0,0173 + 0,0052p$ ; светлые точки – данные опытов с другими диаметрами роликов

Функция распределения вероятностей давления со сдвигом, приводящего к взрыву ВВ (флегматизированный октоген), в сериях опытов с роликами  $\varnothing 10, 20, 25$  мм принимает вид

$$F(P < p) = q = 1 - \exp \left\{ - \left[ \frac{p}{p_c} \left( \frac{s}{s_0} \right)^{2,95} \right]^5 \right\}, \quad (5)$$

или для каждого размера роликов:

а) ролики  $\varnothing 10$  мм  $q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p}{233,6} \right)^5 \right], \quad p_{0,5} \approx 220$  МПа

(при  $p = p_{0,5}, q = 0,5$ );

б) ролики  $\varnothing 20$  мм  $q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p}{151,3} \right)^5 \right], \quad p_{0,5} \approx 141$  МПа;

в) ролики  $\varnothing 25$  мм  $q = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p}{130,1} \right)^5 \right], \quad p_{0,5} \approx 121$  МПа.

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. Васипенко и А. С. Михайловым.

## Список литературы

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 New York, 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. Матем. 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. Способ определения чувствительности к трению взрывчатых веществ, порохов и пиротехнических составов / В. С. Козлов, Д. В. Ростенко, П. Г. Кузнецов, В. А. Мамаев, С. М. Муратов, Р. С. Умнова // Бюлл. изобрет. и товарн. знаков. 1963. № 22.

## **The Shear Area Effect on the Explosive Detonation Probability Under the Shock Shear**

N. A. Bilyk, A. L. Mikhaylov, V. P. Khanin, A. S. Mikhaylov

*The paper studies the dependence of the application pressure resulting in explosion under the shock shear on the shear area (the explosive contact area with a metal surface). The dependence of the detonation probability of the explosives (phlegmatized octogen, PETN) pressured between two steel surfaces (faces of two rollers) on the application pressure and the explosive contact area with the upper roller is confirmed during the testing for friction sensitivity under the shock shear. The upper roller is shifted for 1.5 mm. It is proved that the increase of the explosive contact area with the roller under the explosive application raises the probability of explosive detonation under the upper roller shearing at the same pressures applied to the explosives. A scale effect of the explosive contact area with the roller surface on the pressure of the explosive detonation is identified under the shock shear of the surface adjacent to the explosive. Statistical methods are used to confirm that the pressure resulting in the explosive detonation under the shock shear of the adjacent steel surfaces relative to the explosive is distributed according to the Weibull two-parameter law.*