

УДК 662.215.4;662.215.5

# УСЛОВИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ПРИ УДАРЕ НИЗКОСКОРОСТНЫМИ ИНДЕНТОРАМИ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦОМ

Г. В. Белов, А. Н. Китин, Н. И. Шустова

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Представлены результаты анализа экспериментальных данных по условиям инициирования взрывчатого превращения в образцах флегматизированного октогена при ударе индентором со сферическим торцом. Показано, что условия инициирования взрывчатого превращения в широком диапазоне варьирования параметров индентора и скоростей удара описываются эмпирическими зависимостями, связывающими массово-геометрические параметры ударника с его минимальной скоростью, вызывающей инициирование взрывчатого превращения. Полученные зависимости могут быть использованы при практическом анализе исходов воздействия на взрывчатый состав, при построении адекватных физических моделей инициирования и их верификации.

Ключевые слова: индентор, сферический торец, флегматизированный октоген, инициирование, взрывчатое превращение.

DOI 10.15372/FGV20200112

## ВВЕДЕНИЕ

Для разработки моделей инициирования взрывчатых составов (ВС) при ударных воздействиях [1, 2] необходимы экспериментальные данные, позволяющие выявить условия удара, соответствующие качественной смене реакции ВС: механическое повреждение ВС или инициирование реакции взрывчатого превращения. При этом важно иметь не точечные экспериментальные данные (разбросанные по параметрам ударника и конструкции сборки с ВС), а физические зависимости, связывающие параметры удара с условиями инициирования в возможно широком диапазоне их изменения. Это, с одной стороны, позволит использовать такие зависимости для практических оценок, а с другой — сужает возможности подгонки неадекватных физических моделей под экспериментальные данные.

Полученные нами в последние годы результаты по инициированию образцов флегматизированного октогена (аналог РВХ-9501) ударниками со сферической формой инденторов позволяют рассчитывать на возможность выявления таких зависимостей. Анализ этих результатов представлен в настоящей работе. При этом данные по параметрам инициируемого взрывчатого превращения и динамике его

развития не рассматриваются. Их можно найти в цитируемых работах.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1. Она аналогична известной в литературе схеме испытаний взрывчатых веществ, моделирующей удар по «полупространству» [3]. В отличие от схем Steven impact test и SUSAN test [4, 5], в схеме, представленной на рис. 1, отсутствуют элементы конструктив-

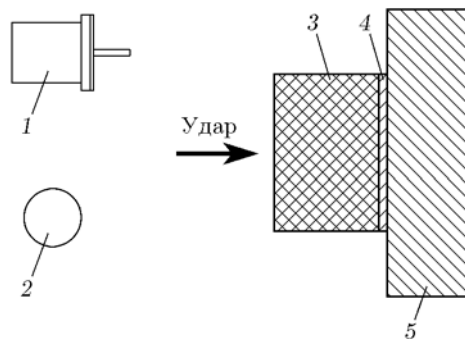


Рис. 1. Схема проведения экспериментов:

1 — ударник массой  $\approx 4000$  г ( $d = 8, 14.3$  мм); 2 — ударник массой  $\approx 2 \div 100$  г ( $d = 8 \div 29$  мм); 3 — образец ВС ( $\varnothing 120$  мм,  $h = 60$  мм); 4 — стальная пластина-индикатор ( $h = 2$  мм); 5 — массивная опора (в опытах с тяжелыми ударниками)

Результаты экспериментов

Номер серии опытов	Диаметр индентора, мм	Масса ударника, г	$v_{\min}$ , м/с	$v_{\max}$ , м/с	$v^*$ , м/с	Источник
1	8	2.1	78	73	$75.5 \pm 2.5$	[9]
2	18.3	25	53	46	$49.5 \pm 3.5$	[9]
3	14.3	12	52	50	$51 \pm 1$	[8, 9]
4	29	99.6	35	32	$33.5 \pm 1.5$	[9]
5	14.3	4000	7.4	6.8	$7.1 \pm 0.3$	Настоящая работа
6	8	4000	5.4	4.8	$5.1 \pm 0.3$	Настоящая работа

ного ограничения образца (корпус и экранирующие образец ВС слои). Поэтому на условия инициирования влияют только факторы, связанные с взаимодействием индентора и взрывчатого вещества. При этом форма индентора выбрана сферической, что исключает влияние его ориентации в момент удара на процесс взаимодействия с образцом. Все это способствует воспроизводимости условий удара и получаемых результатов.

В экспериментах использованы образцы ВС диаметром 120 мм и высотой  $h = 60$  мм, изготовленные из флегматизированного октогена прессованием (пористость  $\approx 1\%$ ). Размер образцов примерно на порядок превосходит зону интенсивных деформаций при внедрении индентора [6, 7], даже с учетом возможных отклонений ( $\approx 1 \div 2$  см) точки удара индентора от оси образца. В экспериментах с тяжелыми ударниками (массой  $\approx 4$  кг), в которых время от момента удара до момента инициирования велико ( $\approx 1$  мс), а масса ударника больше массы образца, последний опирался на массивную стальную опору, чтобы исключить влияние приобретаемой образцом скорости (в результате взаимодействия с ударником) на динамику внедрения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментов по инициированию взрывчатого превращения представлены в таблице: диаметр индентора; масса ударника; минимальная скорость ударника, при которой зафиксировано инициирование взрывчатого превращения в образце ( $v_{\min}$ ); максимальная скорость ударника, ниже которой взрывчатого превращения не зафиксировано ( $v_{\max}$ );

предельная скорость удара ( $v^*$ ); указан также источник информации.

Результаты каждой серии экспериментов основаны на данных не менее двух-трех опытов с инициированием взрывчатого превращения и без инициирования. Значение предельной скорости удара, вызывающей инициирование взрывчатого превращения, определялось как середина интервала между минимальной скоростью ударника, при которой в опытах зафиксировано инициирование взрывчатого превращения в образце ( $v_{\min}$ ), и максимальной скоростью ударника, ниже которой взрывчатого превращения не зафиксировано ( $v_{\max}$ ). В сериях экспериментов 1–4 ударниками (инденторами) являлись стальные шары. В сериях 5, 6 ударник представлял собой массивный пуансон с закрепленным на его торце индентором. Схема ударника представлена на рис. 1. Торец пуансона оклеивался слоем малоплотного пенопласта для исключения удара вылетающих из образца частиц ВС по металлу.

В тех экспериментах, где скорости удара были ниже требуемых для инициирования взрывчатого превращения в образце ВС, выявлены особенности взаимодействия инденторов с образцом, предшествующие условиям инициирования. Во всех опытах со сферическими ударниками диаметром  $8 \div 29$  мм (масса  $2 \div 100$  г) остаточная глубина внедрения в образец не превышала  $2 \div 4$  мм. То есть для всех размеров и масс таких ударников инициирование взрывчатого превращения происходит при заглаблениях сферической части менее чем на радиус. Формирование кратера сопровождается, как правило, образованием лицевого скола в образце за счет действия упругой разгрузки. В некоторых случаях (при скоростях уда-



Рис. 2. Лицевой скол в образце взрывчатого состава

ра более  $\approx 35$  м/с) скол занимает всю поверхность кратера (рис. 2). Образование сколов может отражаться на динамике внедрения в тех случаях, когда время до остановки индентора больше, чем время формирования скола. С этим, возможно, связан тот факт, что для тяжелых ударников (масса 4 кг) зарегистрирована большая относительная глубина внедрения индентора в образец без его взрыва (более радиуса), чем для сферических.

Анализ состояния поверхности сферических инденторов после взаимодействия с образцом ВС показал наличие двух характерных областей: центральной, с исходной поверхностью, и окружающего ее кольца со следами абразивного воздействия (рис. 3).

Размеры этих областей составляют  $45 \div 54^\circ$  и  $100 \div 114^\circ$  центрального угла

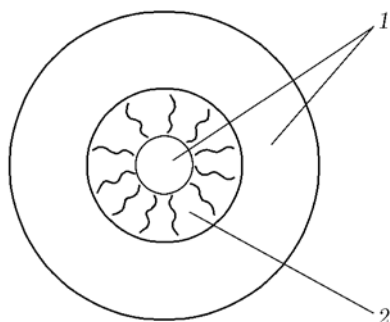


Рис. 3. Состояние поверхности сферического индентора:

1 — зоны исходной поверхности, 2 — зона со следами абразивного воздействия

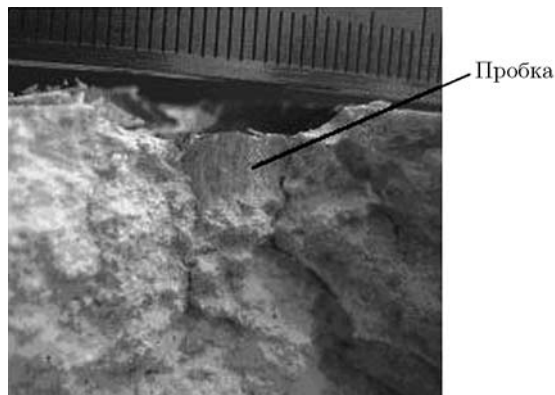


Рис. 4. «Пробка» под центральной частью индентора

индентора. Соответствующие относительные линейные размеры  $\approx 0.1h/r$  и  $\approx 0.4h/r$  ( $h$  — высота сегмента,  $r$  — радиус индентора). В некоторых опытах на поверхности инденторов, в области абразивного воздействия, наблюдались частички прилипшего ВС, свидетельствующие о разогреве ВС до пластического состояния. Такой вид инденторов указывает на то, что под центральной областью материала образца при внедрении движется вместе с индентором, не испытывая заметной радиальной деформации. За пределами этой области материал образца движется и в радиальном направлении, в том числе и по поверхности индентора. Таким образом, на границе этих двух областей создаются условия для образования «пробки» под центральной частью индентора. Наличие «пробки» в виде усеченного конуса зарегистрировано в одном из опытов работы [9] при скорости удара, близкой к предельной. На рис. 4 представлена его фотография. Диаметр основания «пробки» практически равен диаметру центральной области на поверхности индентора. Формирование «пробки» приводит к появлению границы раздела — «полосы сдвига», которая, так же как и зона абразивного воздействия, может быть местом образования первичного очага реакции.

Согласно данным, представленным в таблице, на предельную (минимальную) скорость индентора, вызывающую инициирование взрывчатого превращения, существенно влияет масса ударника. С ее ростом (при фиксированном диаметре индентора) величина предельной скорости сдвигается в сторону меньших значений. В частности, при диаметре ин-

дентора 14.3 мм увеличение массы ударника с 12 г до  $\approx 4$  кг привело к уменьшению предельной скорости примерно с 50 до 7 м/с (более чем в 7 раз), а при диаметре 8 мм — с 75 до  $\approx 5$  м/с (15 раз). Это указывает на то, что условия инициирования определяются не столько скоростью удара, сколько динамикой внедрения индентора, при которой обеспечивается возможность формирования критического поля деформаций в образце.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в таблице данные позволяют провести их анализ с целью выявления физических закономерностей, связывающих массово-геометрические параметры ударника со скоростью удара, соответствующей предельным условиям инициирования взрывчатого превращения. Данные таблицы охватывают достаточно большой диапазон параметров удара: по скорости примерно от 5 до 80 м/с, по массе ударника — от 2 г до 4 кг, по диаметру индентора — от 8 до 29 мм. Как отмечено выше, предельные условия инициирования взрывчатого превращения могут быть связаны с динамикой внедрения индентора. Поскольку его форма во всех экспериментах фиксирована, варьируемыми параметрами являются только диаметр индентора и масса ударника. В известные формулы, определяющие динамику проникания недеформируемых ударников, эти параметры входят в виде отношения массы ударника к его диаметру или площади миделева сечения. Например, в [10] зависимость глубины внедрения  $X$  недеформируемого шара от скорости представлена в виде

$$X = \frac{m}{2k_0\rho_0 S} \ln \left( \frac{H_0 + k_0\rho_0 v_0^2}{H_0 + k_0\rho_0 v^2} \right), \quad (1)$$

где  $m$  — масса ударника,  $k_0$  — коэффициент формы головной части ударника,  $\rho_0$  — плотность мишени,  $S$  — площадь поперечного сечения ударника,  $H_0$  — динамическая твердость материала мишени,  $v_0$  — начальная скорость ударника,  $v$  — текущая скорость ударника.

В [11] для случая неглубокого проникания шара используется зависимость

$$X = v_0 \sqrt{\frac{m}{2\pi R p_d}} \sin \sqrt{\frac{2\pi R p_d}{m}} t, \quad (2)$$

где  $R$  — радиус шара,  $p_d$  — прочностная характеристика мишени,  $t$  — время.

В работах [12, 13] для случая пробивания мишеней сферическим ударником с реализацией пробочного механизма приводятся данные, свидетельствующие о поглощении энергии ударника в основном в узкой кольцевой зоне мишени, пропорциональной диаметру ударника.

С учетом этих замечаний данные таблицы были преобразованы в зависимости предельной скорости удара от параметров  $m/D$  и  $m/S$  ( $D$  и  $S$  — диаметр и площадь миделева сечения индентора). Эти зависимости представлены на рис. 5 и 6. Размерность параметров:  $m$  — кг,  $D$  — м,  $S$  — м<sup>2</sup>,  $v^*$  —

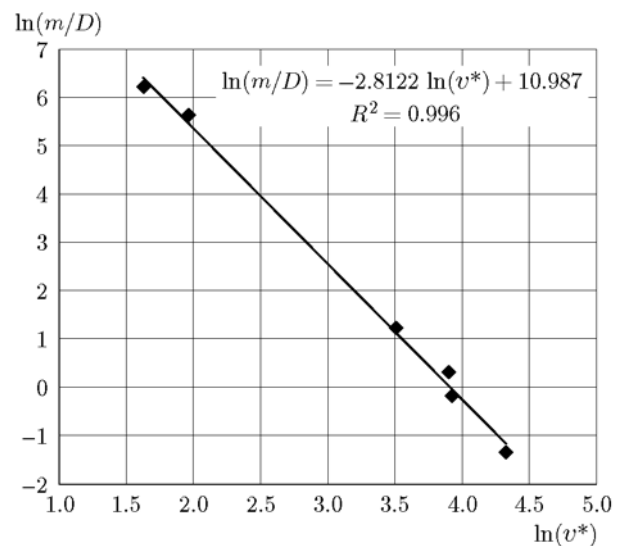


Рис. 5. Зависимость  $\ln(m/D) - \ln(v^*)$

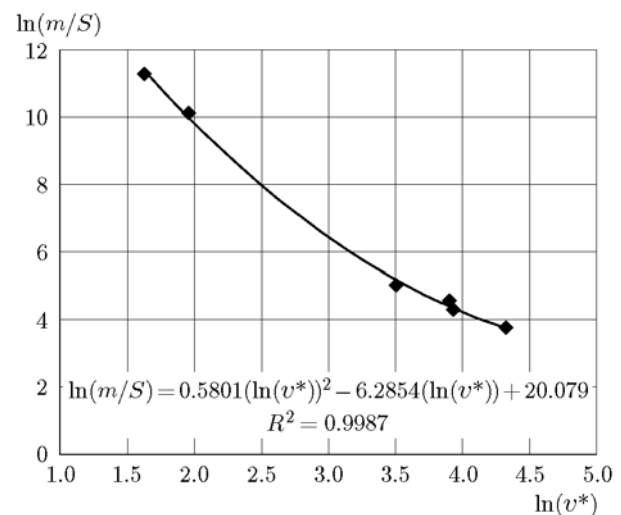


Рис. 6. Зависимость  $\ln(m/S) - \ln(v^*)$

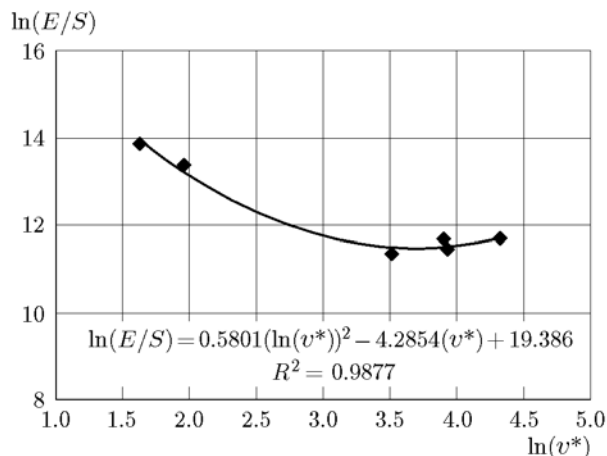


Рис. 7. Зависимость  $\ln(E/S) - \ln(v^*)$

м/с. Как видно из рисунков, все эксперименты с достаточно большой достоверностью ( $>0.99$ ) описываются линейной ( $\ln(m/D) - \ln(v^*)$ ) или полиномиальной ( $\ln(m/S) - \ln(v^*)$ ) зависимостями, однозначно связывающими параметры ударника с его предельной скоростью, при которой происходит инициирование взрывчатого превращения в образцах ВС. Это указывает на то, что условия инициирования определяются теми же параметрами ударника, что и динамика его проникания. На данном этапе рассмотрения трудно отдать предпочтение одной из этих зависимостей, хотя зависимость  $\ln(m/D) - \ln(v^*)$  выглядит более «фундаментально» в силу своей линейности. Возможно, это связано с преимущественной ролью «пробочного» механизма инициирования. В процессе анализа рассматривались и другие варианты описания данных таблицы. В частности, вместо массы ударника использовались его импульс и кинетическая энергия. Однако достоверность и однозначность описания экспериментальных результатов оказались ниже представленных на рис. 5 и 6. В качестве примера на рис. 7 показан вариант зависимости  $\ln(E/S) - \ln(v^*)$ . В данном случае зависимость имеет минимум, что приводит к неоднозначности в определении предельных условий инициирования. Кроме того, при использовании энергии и импульса ударника неопределенность в значениях скорости удара присутствует в значениях и по оси абсцисс, и по оси ординат, что увеличивает погрешность в описании результатов.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что имеющиеся экспериментальные ре-

зультаты по инициированию взрывчатого превращения в образцах флегматизированного октогена ударом сферического индентора могут быть описаны достаточно простыми эмпирическими зависимостями, связывающими массово-геометрические параметры ударника с его скоростью, соответствующей предельным условиям инициирования взрывчатого превращения. Эти зависимости охватывают большой диапазон изменения массово-геометрических параметров ударника и его скорости, что позволяет использовать их при практическом анализе исходов воздействия на данный ВС, при построении адекватных физических моделей инициирования и их верификации. Следует заметить, что в зависимость (1) в качестве параметра входит коэффициент формы головной части ударника ( $k_0$ ). Это позволяет рассчитывать на возможность описания аналогичным образом и результатов с другими формами инденторов.

Для более глубокого понимания закономерностей инициирования взрывчатого превращения при низкоскоростных ударных воздействиях целесообразно расширить диапазон экспериментальных данных для выявления хода зависимостей при предельно малых и больших диаметрах индентора.

## ВЫВОДЫ

1. Предельные условия инициирования взрывчатого превращения могут быть описаны эмпирическими зависимостями вида  $\ln(m/D) - \ln(v^*)$  или  $\ln(m/S) - \ln(v^*)$ , связывающими массово-геометрические параметры ударника ( $m$ ,  $D$ ,  $S$ ) с его минимальной скоростью ( $v^*$ ), вызывающей инициирование взрывчатого превращения.

2. Эмпирические зависимости охватывают диапазоны параметров удара: по скорости удара — приблизительно  $5 \div 80$  м/с (более одного порядка), по массе ударника — от 2 г до 4 кг (более трех порядков), по диаметру индентора —  $8 \div 29$  мм (более трех раз).

3. Полученные зависимости могут быть использованы при практическом анализе исходов воздействия на взрывчатое вещество, при построении адекватных физических моделей инициирования и их верификации.

Авторы выражают благодарность Ю. Б. Базарову, А. В. Кудашову, А. В. Шишканову, И. Н. Порошину, И. В. Олейникову, А. Н. Тю-

рину, Л. Л. Кочкину, А. М. Груздеву, М. Л. Тяпину за помощь в проведении экспериментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Седов С. Ю., Мицура М. Н.** Динамический масштабный эффект при низкоскоростных взрывчатых превращениях // XVII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: ВНИИЭФ, 2015. — С. 157–162.
2. **Belov G. V., Gushanov A. R., Isheyev D. M., Khvorostin V. N., Volodina N. A.** Numerical simulation of experiments on low-velocity impact on an octogen-based HE with taking account of the explosive transformation initiation kinetics // Book of Abstr., 7th Int. Meeting on New Models and Hydrocodes for Shock Waves Processes in Condensed Matter. — Lisbon-monte Estoril, Portugal, 2008. — P. 37.
3. **Физика взрыва** / под ред. К. П. Станюковича. — М.: Наука, 1975.
4. **Chidester S. K., Green L. G., Lee C. G.** A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low-pressure impacts // 10th Symp. (Int.) on Detonation. — Boston, Massachusetts, 1993. — P. 786.
5. **Green L. G., Dorough G. D.** Further studies on the ignition of explosives // 4th Symp. (Int.) on Detonation. — Silver Spring, Maryland, 1965. — P. 477.
6. **Сагомоян А. Я.** Проникание. — М.: МГУ, 1974.
7. **Джонсон У., Меллор П.** Теория пластичности для инженеров. — М.: Машиностроение, 1979.
8. **Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Дякин Е. П., Екимчев С. Н., Жиёмбетов А. К., Зималин В. С., Олейников И. В., Тилькунов В. А., Шишканов А. В., Шустова Н. И.** Влияние скорости удара на параметры взрыва образцов флегматизированного октогена // XI Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: ВНИИЭФ, 2009. — С. 51–54.
9. **Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Васенин С. Н., Колмаков О. В., Костюков Е. Н., Кудашов А. В., Тюрин А. Н., Шишканов А. В., Шустова Н. И.** Влияние предварительного механического повреждения и пористости ВВ на условия инициирования и параметры взрыва при ударе // XVII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: ВНИИЭФ, 2015. — С. 128–134.
10. **Степанов Г. В.** Расчет глубины внедрения недеформируемого шара в массивную преграду // Проблемы прочности. — 1969. — № 3. — С. 78–81.
11. **Клейс И. Р., Кангур Х. Ф.** Экспериментальное и расчетное определение глубины повреждений от удара сферического индентора // Трение и износ. — 1987. — Т. 8, № 4. — С. 605–613.
12. **Милейко С. Т., Кондаков С. Ф., Голофаст Е. П.** Об одном случае пробивания // Проблемы прочности. — 1979. — № 12. — С. 69–71.
13. **Кондаков С. Ф., Саркисян О. А.** Влияние температуры на сопротивление пробиванию металлических преград // Проблемы прочности. — 1980. — № 9. — С. 69–71.

*Поступила в редакцию 01.11.2018.*

*После доработки 27.03.2019.*

*Принята к публикации 17.04.2019.*