

Список литературы

1. A. Kossoy, E. Koludarova. Specific features of kinetics evaluation in calorimetric studies of runaway reactions // J. Loss Prev. Process Ind., v.8, № 4, 1995.
2. А.И. Бенин, И.В. Малинина, В.И. Рипачев. Программная система «Кинетика-1» для построения кинетического описания химических реакций в конденсированной фазе. Автоматизация разработки технологических процессов // Л.: ГИПХ, 1984.
3. Методы создания кинетических моделей, учитывающих влияние давления. Методические рекомендации. ЗАО «Химинформ», Санкт-Петербург, 2017 г., 11 с.
4. А.А. Коссой, И. Шейман. Применение кинетически основанных приближений для моделирования термического взрыва // С.- Петербург: ГИПХ, 2003, 34 с.
5. D.A. Frank-Kamenetskii. Diffusion and heat exchange in chemical kinetics // New York: Plenum Press, 1969.
6. A.G. Merzanov, F.I. Dubovitski. Quasi-stationary theory of thermal explosion of self-accelerating reactions // J. Phys. Chem, 1960, Vol. 34, №10. p. 2235.
7. Моделирование теплового взрыва в твердом веществе, претерпевающим плавление. Методические рекомендации. ЗАО «Химинформ», Санкт-Петербург, 2013 г, 13 с.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЗАЗОРОВ НА ПОРОГ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ

*С.Ю. Седов, Е.А. Степанов, В.Г. Симаков, А.И. Кондрашенко,
В.Б. Вершинин, З.В. Танаков, П.И. Левашов, Е.В. Ботов, В.Н. Хворостин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Опыты типа "Stiven Test" широко известны в литературе по моделированию взрывных явлений, см. [1]. В РФЯЦ-ВНИИЭФ проводятся аналогичные исследования по изучению взрывных превращений при низкоскоростных ($10\text{ м/с} \leq V \leq 100\text{ м/с}$) соударениях с металлическим ударником. В ИФВ проведена серия экспериментов по изучению инициирования взрывчатых превращений во взрывчатом веществе (ВВ) на основе октогена при ударе снарядом массой 2.7 кг с закругленной головной частью. Объектом испытаний являлись плоские пашки из ВВ диаметром 120 мм, высотой 14 мм и 30 мм, установленные в экспериментальную сборку. Проведены эксперименты с различными толщинами ВВ и наличием степени свободы (зазорами между ВВ и корпусом сборки). Экспериментальные исследования проводились с использованием взрывного ударного стенда, работающего на энергии бризантных ВВ с использованием технологии проведения экспериментов "Stiven Test" [1].

В ходе экспериментов измерялись:

- скорости ударника;
- давление и деформации в образце ВВ и корпусе в динамическом режиме;
- характеристики деформации (глубины вмятин, смещение характерных точек) образца ВВ и корпуса после воздействия при отсутствии взрыва.

Полученные данные затем использовались в расчетах критериев взрыва по комплексу МИД методики Д (ИТМФ) [2]. Расчеты проводились в двумерной осесимметричной постановке с учетом упруго-пластических свойств вещества. Основная цель расчётов – получение значений φ_0 критерия

начала *низкоскоростного режима взрывчатых превращений* (НСР ВП). Критерий φ_0 с используемой моделью идеальной упругопластичной среды ВВ здесь рассматривается как мажорантный.

1 Описание экспериментов

Основной особенностью тестов Стивена является то, что ВВ толщиной 1-3 см на основе октогена помещается в металлический корпус, так что на процесс развития взрыва существенно влияют отраженные от корпуса волны сжатия и сдвига. Для таких случаев масштабный фактор в виде объема механически нагруженной области задан размерами самой конструкции, а не является свободным динамическим параметром.

В экспериментах использовались плоские шашки из состава на основе октогена диаметром 120 мм, высотой 14 мм и 30 мм, установленные в экспериментальную сборку. Шашки имели следующие параметры:

- шашка высотой 14 мм (масса 325 г, плотность 1,887 г/см³);
- шашка высотой 30 мм (масса 642 г, плотность 1,883 г/см³).

Сборка представляла собой металлическую конструкцию, аналогичную применяемой в тесте Стивена [1]. Конструкция сборки во всех экспериментах одинаковая, за исключением центрирующего фланца, высота которого менялась в зависимости от высоты шашки. Конструктивно-компоновочная схема сборки приведена на рисунке 1. Основные элементы конструкции:

- опорная плита диаметром 250 мм и толщиной 19 мм;
- центрирующий фланец;
- фторопластовое кольцо (внутренний диаметр 120 мм);
- верхняя крышка толщиной 3,3 мм;
- прижимное кольцо.

Опорная плита соединялась с центрирующим фланцем с помощью болтового соединения. Внутрь фланца вставлялось фторопластовое кольцо и шашка из ВВ, после чего они закрывались верхней крышкой с помощью прижимного кольца. Сборка крепилась к мишенной камере с помощью болтов. В качестве разгоняемого объекта использовался цилиндрический ударник массой 2.7 кг, диаметром $\varnothing 64$ мм и длиной 190 мм, наконечник – сферический диаметром 44 мм. Разгон ударника осуществлялся давлением продуктов взрыва ВВ, подрываемого в замкнутом объеме взрывной камеры. Ударник после вылета из разгонного отсека установки с заданной скоростью соударялся с экспериментальной сборкой. Фотография шашки, установленной в сборку, приведены на рисунке 2. В проведенной серии экспериментов с целью увеличения времени регистрации сигналов датчики закрывались стальной пластиной толщиной 0,5 мм. На рисунке 2 показан также ударник массой 2.7 кг. Фотографииборок, установленных на мишенной камере, показаны на рисунке 3.

В таблице 1 приведены данные по семи проведенным экспериментам. Основные результаты экспериментов таковы:

1. В образце ВВ толщиной 14 мм зафиксирован интенсивный взрывной процесс при скорости соударения $V=25,8$ м/с.
 2. В образце ВВ толщиной 30мм зафиксирован интенсивный взрывной процесс при скорости соударения $V=35,8$ м/с. При скорости соударения $V=26,3$ м/с произошла деформация образца без взрывного процесса.
 3. При повторных нагружениях деформированного в опыте (см. п.2) образца со скоростями соударения $V=28$ м/с, $V=33$ м/с взрывного превращения не зафиксировано.
- Погрешность измерения скорости ударника в экспериментах составляла ± 5 %.

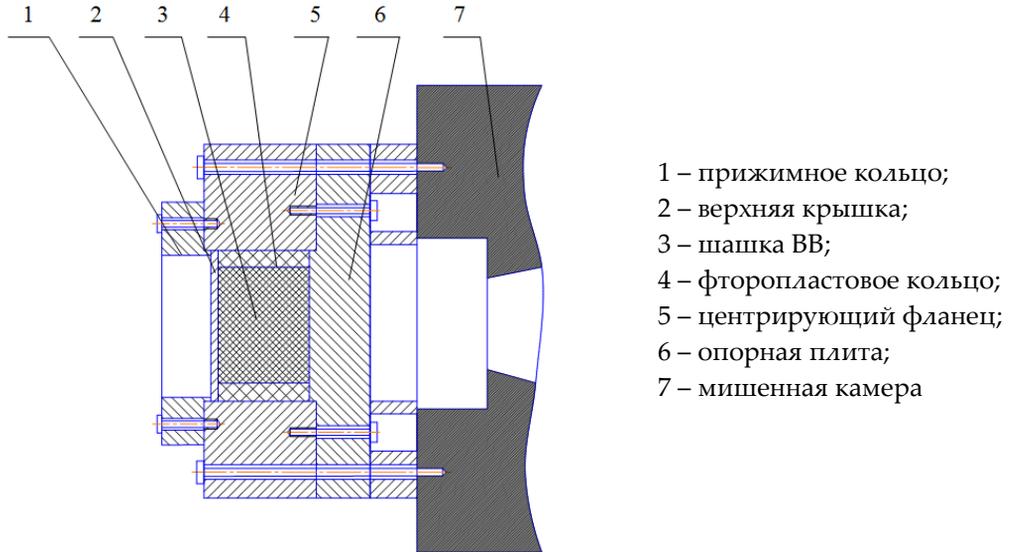


Рисунок 1. Конструктивно-компоновочная схема сборки



а) Экспериментальная сборка с шашкой $t=14$ мм



б) Ударник

Рисунок 2. Фотографии шашки и ударника



а) Шашка $t=14$ мм



б) Шашка $t=30$ мм

Рисунок 3. Фотографии сборок, установленных на мишенной камере

Таблица 1. Таблица данных для семи проведенных экспериментов

№ опыта	h пашки (мм)	Масса ударника (кг)	Скорость ударника (м/с)	Взрыв/не взрыв
1	14	2,7	25,8	Взрыв
2	30	2,7	26,3	Не взрыв
3*	30	2,7	28	Не взрыв
4*	30	2,7	33	Не взрыв
5*	30	2,7	53	Взрыв
6	30	2,7	42	Взрыв
7	30	2,7	36,8	Взрыв

*- повторные воздействия на экспериментальную сборку после опыта №2

2. Описание постановки расчетов

Проведены расчёты по комплексу МИД методики Д [2] с варьированием величины зазоров и скоростей ударника. Получены зависимости от времени четырех критериев взрыва φ_0 , Π , Π_{int} и Ψ (по поводу критериев взрыва см. [3]).

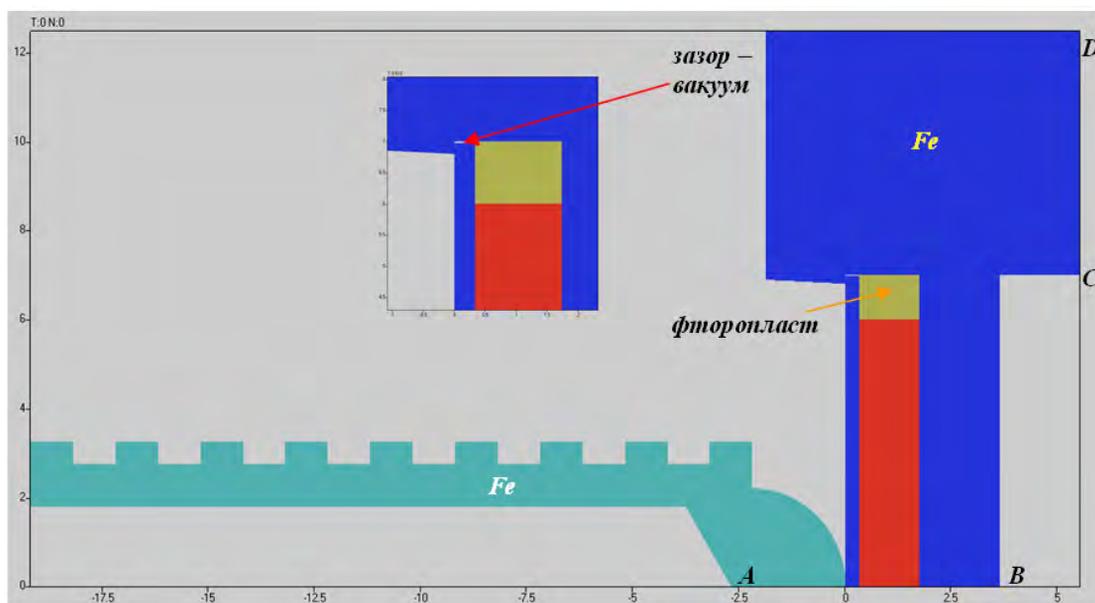


Рисунок 4. Начальная геометрия расчетов

Система представляет собой стальной снаряд длиной 19,2 см, масса 2,7 кг, ударяющий с заданной начальной скоростью по образцу ВВ. Образец ВВ представляет собой диск радиусом $R=6$ см, толщиной $h=1,4$ см, помещенный в стальной корпус. Радиус прижимающей крышки был задан чуть меньше внутренних размеров стального контейнера, в расчёте образовавшийся зазор толщиной 0,025 см представляет собой вакуум.

3. Описание критериев начала взрыва, реализованных в методике Д [2]

Критерий φ_0

Расчет φ_0 (см. также [3]) проводился так:

1) При условиях:

$\dot{\varphi}_0 > \dot{\varphi}_{0cr}$, и при $0 \leq \varphi_0 < \varphi_{0cr}$, и при $p \geq 0$

$$\frac{d\varphi_0}{dt} = G(p, \rho, E, \varepsilon, \dot{\varphi}_0, \tau_0), \quad \text{где } G - \text{ скорость генерации дефектов.}$$

На рисунке 8 показан критерий Ψ , наблюдается падение значения Ψ . Это падение Ψ происходит в момент разворота скорости ударника. Смена знака скорости ударника происходит после $t=700$ мкс.

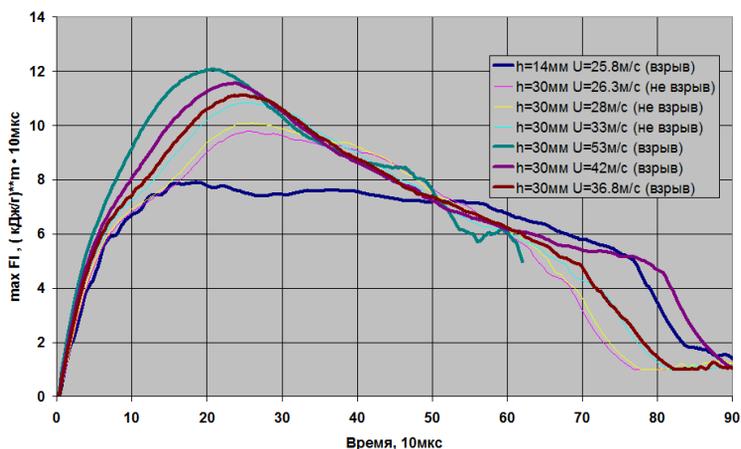


Рисунок 5. Зависимости от времени $\max(\varphi)$, расчёты без зазора

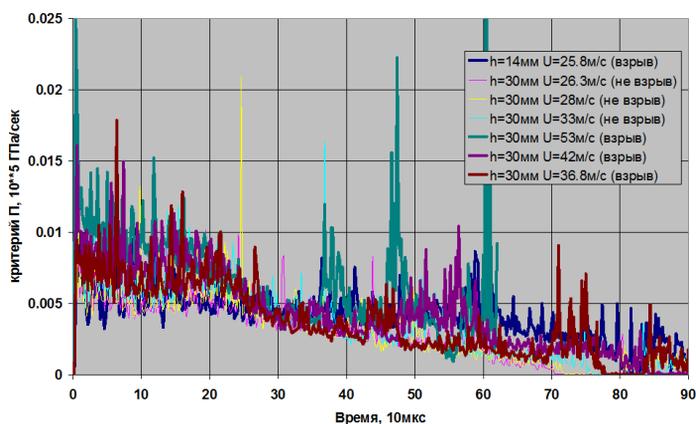


Рисунок 6. Зависимость от времени максимального значения критерия Партома П

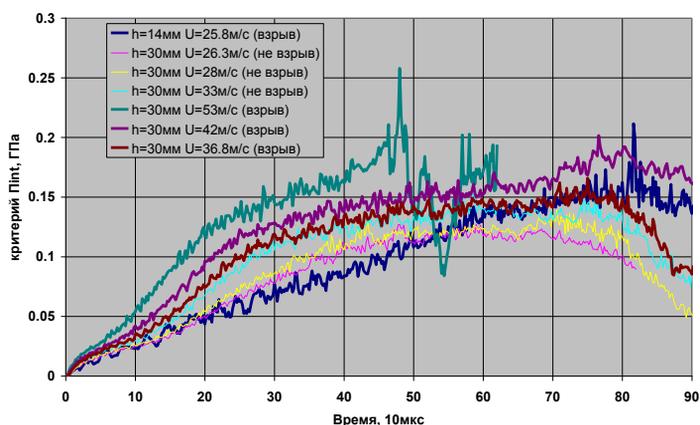


Рисунок 7. Зависимость максимального значения Π_{int} от времени

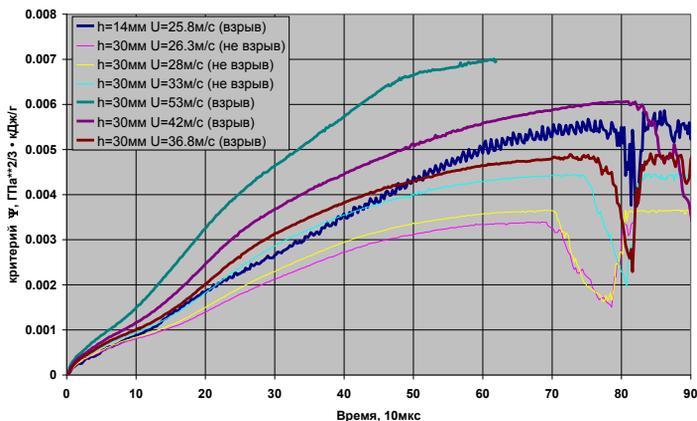


Рисунок 8. Зависимость максимального значения Ψ от времени

В опыте 4 со скоростью ударника $U=33\text{м/сек}$ зарегистрировано отсутствие взрыва шашки ВВ. Внешний вид сборки после проведения опыта приведен на рисунке 9. Произошло механическое повреждение верхней крышки сборки и шашки ВВ. Вмятина от ударника – диаметр 36 мм, глубина 11 мм.

На рисунке 10 приведён фрагмент расчёта "h=30мм U=33м/сек" на момент времени 810 мкс. В расчёте на этот момент ударник полностью развернулся – начался отскок. Расчётное повреждение верхней крышки сборки и шашки ВВ таково: вмятина от ударника диаметром 40 мм, глубиной 14 мм. Это, примерно на 10%, выше, чем в эксперименте.



Рисунок 9. Фотография сборки после проведения опыта со скоростью ударника $U=33\text{м/сек}$

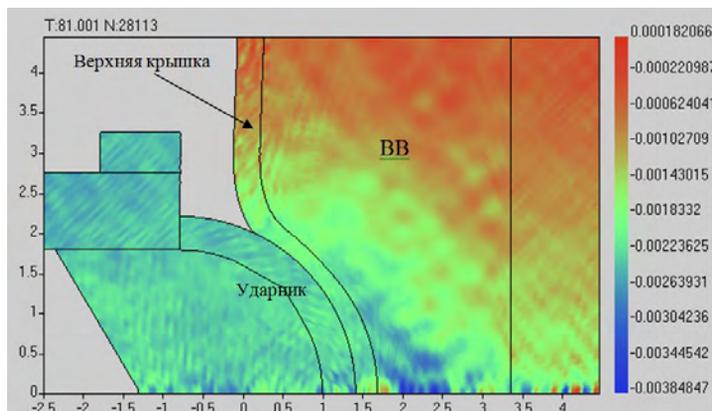


Рисунок 10. Расчёт h=30мм U=33м/сек, t=810 мкс. Повреждение верхней крышки сборки и шашки ВВ. Поле x-компоненты скорости

Сводные результаты семи проведенных расчетов представлены в таблице 2. Критерий Партома Π не приводится из-за его сильно немонотонного поведения.

Таблица 2. Максимальные значения критериев в расчетах без зазора.

№ опыта	h пашки (мм)	Плотность ВВ, г/см ³	Скорость ударника (м/с)	Максимум критерия φ_0	Максимум критерия Π_{int}	Максимум Критерия Ψ
1	14	1,887	25,8	7,91	0,21	0,0058
2	14	1,887	24,5	7,89	-	-
3	30	1,883	26,3	9,78	0,12	0,0034
4	30	1,883	28	10,09	0,13	0,0037
5	30	1,883	33	10,83	0,14	0,0044
6	30	1,883	53	12,07	0,25	0,007
7	30	1,883	42	11,56	0,2	0,006
8	30	1,883	36,8	11,12	0,16	0,0049

Как видно из представленной таблицы критерий φ_0 меняется от 7.91 до 12.07, демонстрируя зависимость от толщины пашки ВВ; критерий Π_{int} ведет себя немонотонно, также как и критерий Ψ . То есть для прогнозов взрывобезопасности наиболее предпочтительным является критерий φ_0 .

5. Результаты расчетов опытов с зазорами

Для изучения влияния зазора между фторопластом и ВВ (см. рис. 11) на возникновение взрыва были проведены расчеты с пашкой высотой 14мм и зазорами 1 и 2мм с различными скоростями ударника. Расчетная сетка, начальные и граничные условия, а также параметры уравнений состояния веществ, были взяты как и в расчетах без зазоров. Результаты расчетов представлены ниже.

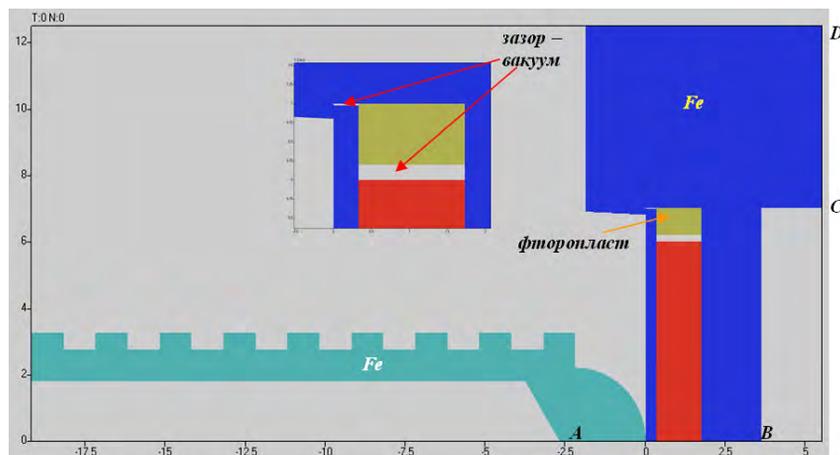


Рисунок 11. Начальная геометрия расчетов с зазором

На рисунке 12 представлены кривые зависимости от времени величины $\max(\varphi)$, полученные в расчётах с зазором. Пунктиром отмечены линии, соответствующие зазору 2 мм. Некоторые кривые имеют второй локальный максимум. При анализе результатов расчётов было замечено, что в соответствующие моменты времени на поведение критериев влияет разрушение среды.

В расчетах с зазорами по критерию Партома и критерию Ψ были получены сильные осцилляции. Скачки значения максимумов в этом случае наблюдаются на берегах зазора в момент его закрытия. Поэтому данные по эти критериям в случае зазоров не приводятся. Сводные результаты проведенных расчетов с зазорами представлены в таблице 3.

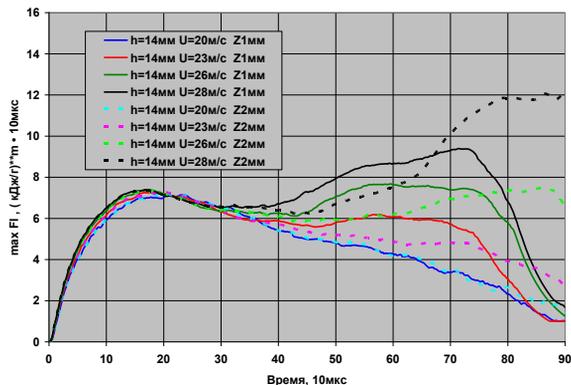


Рисунок 12. Зависимости от времени величины $\max(\varphi_0)$. Расчёты с зазором между фторопластовым кольцом и ВВ

Таблица 3 – Максимальные значения критерия φ_0 в расчетах с зазором

№ расчета	Величина зазора (мм)	Скорость ударника (м/с)	Максимальное значение критерия φ_0
1	1	20	7,15
2	1	23	7,25 (6,18)
3	1	26	7,37 (7,67)
4	1	28	7,39 (9,38)
5	2	20	7,18
6	2	23	7,26
7	2	26	7,34 (7,47)
8	2	28	7,37 (12)

Отметим здесь, что в таблице для первого максимального значения критерия φ_0 времена его достижения характерны для расчетов без зазора. В скобках показаны величины второго максимума критерия φ_0 . Поля скорости деформаций $\dot{\gamma}$ достигает максимальных значений **0.033** и **0.047** для расчетов без зазора и с зазором соответственно на время 570 мкс. Наличие зазоров приводит в данном случае к интенсификации сдвигов из-за течения разрушенного ВВ. Такая ситуация приводит к появлению второго максимума у критерия (второй максимум для времени больше 300 мкс при анализе взрывоопасной ситуации не учитывался).

Анализ результатов расчетов

Лучшие результаты по гладкости численного решения показал первый критерий φ_0 , в то время как критерий Партома вел себя наименее монотонно. Поэтому далее рассмотрим только критерий φ_0 . В таблице 4 представлены сводные расчеты критерия φ_0 .

Видно, что от величины зазора 1 мм или 2 мм результат зависит слабо. Тем не менее, наличие самого зазора достаточно существенно. Критерий меняется от величины 7.91 для ситуации без зазора при скорости ударника 25.8 м/с до 7.34 при скорости ударника 26 м/с с зазором 2 мм. Итак, наличие зазора позволяет ВВ разгрузиться, пластически течь в зазор, уменьшая напряжения в ВВ. Представленный материал позволяет сделать следующие выводы:

- В расчетах по методике Δ на основе упругопластической модели наличие зазоров несколько уменьшает взрывоопасность ситуации при механическом нагружении.
- Толщина ВВ больше влияет на величину критерия φ_0 , чем наличие зазора. Величина критерия растет при увеличении толщины ВВ.

Таблица 4 – Максимальные значения критерия φ_0 в расчетах

№ расчета	h пашки (мм)	Величина зазора (мм)	Скорость ударника (м/с)	Максимум критерия φ_0
1	14	0	25,8	7,91
2	14	0	24,5	7,89
3	30	0	26,3	9,78
4	30	0	28	10,09
5	30	0	33	10,83
6	30	0	53	12,07
7	30	0	42	11,56
8	30	0	36,8	11,12
9	14	1	20	7,15
10	14	1	23	7,25 (6,18)
11	14	1	26	7,37 (7,67)
12	14	1	28	7,39 (9,38)
13	14	2	20	7,18
14	14	2	23	7,26
15	14	2	26	7,34 (7,47)
16	14	2	28	7,37 (12)

Отметим, что по результатам экспериментов в образце ВВ толщиной 14 мм без зазора зафиксирован интенсивный взрывной процесс при скорости соударения $V=25,8$ м/с. В соответствующем этому опыту численному расчету значение максимума критерия φ_0 составило 7.91. В опыте с зазором со скоростью соударения $V=26$ м/с взрывного превращения не зафиксировано. В соответствующем этому опыту численном расчете значение максимума критерия φ_0 составило значение 7.37 (т.е.<7.91). Но и второй максимум критерия в расчете с зазором равен 7.67, т.е. лежит ниже взрывного значения критерия в расчете без зазора.

Расчет опыта без зазоров со скоростью $V=24.5$ м/с, для которого взрыва не было, дал значение $\varphi_0 =7.89$. Можно сделать заключение, что наличие зазора уменьшает взрывоопасность. Отметим, что порог взрыва у φ_0 сильно зависит от толщины пашки ВВ.

Заключение

Представлены результаты экспериментов (ИФВ) и расчеты критериев взрыва в комплексе МИД методики Д (ИТМФ). Рассматриваемые критерии имели мажорантный характер, так как пороги взрыва зависели от толщины пашки ВВ. Лучшие результаты по гладкости численного решения показал критерий φ_0 , в то время как критерий Партома вел себя наименее монотонно. На основе расчетов сделано заключение, что наличие зазора уменьшает величину критерия φ_0 .

Отметим, что в расчетах опытов зафиксирован эффект сильного сжатия области ВВ на оси при ударе ударника со скоростями $u=34$ м/сек и $u=46.5$ м/сек. Он соответствовал ситуации “взрыв” в опытах. Ситуация объясняется тем, что реализуются большие интенсивности напряжений, превышающие порог текучести материала ВВ. При анализе результатов было замечено, что на возможность развития взрыва оказывает большое влияние степень разрушения среды.

Отметим, что:

- в расчетах Д на основе идеальной упругопластической модели, как и в экспериментах, наличие зазоров уменьшает взрывоопасность ситуации при механическом нагружении для одной и той же толщины слоя ВВ в контейнере;
- толщина ВВ сильнее влияет на величину критерия φ_0 , чем наличие зазора. Величина критерия растет при увеличении толщины ВВ.

Список литературы

1. D.J.Idar, R.A.Lucht, J.W.Straight, R.J.Scammon, R.V.Browning, J.Middleditch, J.K.Dienes, C.B.Skidmore, G.A.Duntain "Low amplitude insult project: PBX-9501 high explosives violent reaction experiments", Los Alamos National Laboratory. Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, CO, Aug.31-Sept.4, 1998, P.101.
2. Дмитриев Н.А., Дмитриева Л.В., Малиновская Е.В., Софронов И.Д. Методика расчета нестационарных двумерных задач газовой динамики в лагранжевых координатах //Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики /Под ред. К.И.Бабенко. М.:Наука, 1979, С.175-200.
3. С.Ю.Седов, О.М.Величко, О.В.Денисова, А.С.Кривонос, А.М.Вялых Расчеты на основе вязкоупругой модели критериев начала взрыва при низкоскоростном воздействии на взрывчатый состав на основе октогена //Труды международной конференции XV Харитоновские научные чтения. Саров:РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.С.246-253.
4. Yehuda Partom. A threshold criterion for impact ignition//12th International symposium on Detonation. San Diego, California, 2002. N. 0950.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА С РАЗНОЙ ДИСПЕРСНОСТЬЮ

М.С. Никифорова, Е.Н. Костюков, С.А. Вахмистров

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Известно, что деформация и разрушение структурно-неоднородных материалов сопровождается генерацией акустического излучения. Физические механизмы этого излучения связаны с динамической локальной перестройкой внутренней структуры материала. Изучение этого явления, называемого акустической эмиссией (АЭ), дает ценные сведения о закономерностях деформирования и разрушения материалов, которые необходимы для прогнозирования предельных состояний материала по результатам предварительного нагружения деталей из ВВ без разрушения. Характер разрушения деталей из ВВ предопределяется совокупностью некоторых факторов. Во-первых, при изготовлении изделий из ВВ, имеющих в своем составе полидисперсный наполнитель, существует вероятность того, что распределение различных его фракций по объему изделия будет неравномерным, а это, в свою очередь, может привести к различию физико-механических свойств материала по объему детали. Во-вторых, разница в физико-механических характеристиках будет зависеть и от присущей всем деталям из такого состава дефектности в виде пор и контактных границ между частицами или гранулами исходного сырья, размеры и несовершенства которых так или иначе связаны с дисперсностью наполнителя [1].

В связи с этим цель данного этапа работ заключалась в исследовании взаимосвязи параметров акустической эмиссии и структуры деталей, изготовленных на основе октогена с различным соотношением массовых долей крупной и мелкой фракций, в условиях испытания на растяжение.

В качестве модельного материала при проведении исследований был использован пластифицированный октоген, из которого методом прессования изготавливали детали. Общее соотношение массовых долей октогена и пластификатора для всех деталей сохранялось постоянным. Изменение дисперсности состава осуществлялось за счет изменения соотношения массовых долей крупной фракции октогена (обозначенной здесь А) и октогена мелкой фракции (Б). На рисунке 1 представлено распределение кристаллов по фракциям. Количественное содержание октогена разных фракций определялось соотношением А/Б % - 100/0, 50/50, 0/100. Т.о. исследования