

Постановка численного эксперимента для изучения воздействия потока поражающих элементов на заряд взрывчатого вещества

77-30569/330645

03, март 2012

авторы: Маркова М. В., Соловьев В. С.

УДК 623.4.08

МГТУ им. Н.Э. Баумана

sm4@sm.bmstu.ru

Казалось бы, взаимодействие взрывчатых веществ (ВВ) с высокоскоростным поражающими элементами (ПЭ) - неоднократно исследованный процесс. Созданы различные критерии и методики оценки возбуждения детонации и других процессов в толще заряда, но, тем не менее, например, во время испытаний ВМС США, во время которых боеприпасы (БП) нагружаются ПЭ массой 16 г, реальные результаты регулярно не совпадают с результатами оценки иницирующей способности ПЭ по зависимости Джейкобса-Рослунда, а именно: БП детонирует, когда расчеты не говорят о такой возможности [1]. Дело в том, что большинство методик оценки иницирующей способности, даже такие подробные, как [2], учитывающие форму ПЭ и размещение ВВ относительно него, создавались для случая взаимодействия БП с единичным ПЭ, в то время как в реальности ПЭ оказывается два и более. Можно предположить, что ударно-волновые процессы, вызванные действием ПЭ на БП, в случае двух и более ПЭ не будут протекать независимо, поскольку будет наблюдаться взаимодействие ударных волн, вызванных каждым из ПЭ.

Особо стоит отметить сложнейший случай иницирования ВВ, заключенного в прочную оболочку. Механизм и развития взрывчатого превращения для ВВ в оболочках изучен мало. Интенсивность реакции обычно качественно определяется в эксперименте по эффектам, сопровождающим процесс. Выделяют следующие виды реакции:

1. Послойное горение - форма взрывного превращения, генерируемая зажиганием путем теплопередачи от разогретого при пробитии ударника; скорость распространения 1...103 мм/с.

2. Локальный взрыв - затухающий процесс, при котором взрывное превращение осуществляется в той части объема, которая ограничена зоной воздействия. Локальный взрыв является следствием срыва реакции за фронтом УВ или переходным процессом при нестационарном горении. В месте ударно-волнового нагружения наблюдается разрушение оболочки.

3. Низкоскоростной взрыв (низкоскоростная детонация) - незатухающий процесс, распространяющийся со скоростью звука в ВВ и с амплитудой около 0,7...1,0 ГПа. В реакцию вступает приблизительно 20 % ВВ, оболочка дробится на крупные фрагменты.

4. Взрыв (детонационно-подобный взрыв) - ударно-волновой процесс, который вследствие ограниченного объема заряда может ускориться, но не перейти в детонацию, или же может затухнуть из-за срыва реакции разложения в волне разгрузки за счет разрушения оболочки. В этом случае отсутствуют непрореагировавшие остатки ВВ, оболочка дробится на крупные и мелкие фрагменты.

5. Детонация - стационарный процесс, протекающий с максимально возможной для данного ВВ скоростью. Наблюдается детонационный спектр дробления оболочки.

Чтобы классифицировать процессы точнее и лучше понять механизмы инициирования ВВ в оболочке, необходимы более тонкие измерения, в частности, параметров распространяющихся в заряде и в его оболочке волн, что крайне затруднительно в натурном эксперименте. Тогда на помощь приходит эксперимент численный. Так, в частности, в работе [3] на основе численного моделирования взаимодействия ПЭ с БП показано, что традиционный критерий инициирования, основанный на выражении $P^2t = const$, где P – давление в УВ, а t – длительность воздействия, применим и в случае ВВ в оболочке.

Тем не менее, при переходе от инициирования единственным ударником к большему их числу возникает масса иных сложностей, даже если заряд ВВ открыт, поскольку волновые процессы, порождаемые каждым ударником, взаимодействуют друг с другом; в частности, возможно нерегулярное отражение волн, а также влияние первой проходящей по заряду волны на его чувствительность. Отследить волновые процессы в реальном заряде представляет собой непростую задачу; из опубликованных работ, затрагивающих эту тему, можно назвать приведенный в книге Ч. Мейдера [4] эксперимент по наблюдению за взаимодействием детонационных волн в заряде.

Более доступно для изучения наблюдение за волновыми процессами в ходе численного эксперимента. При этом, в отличие от реального эксперимента, в численном известны все параметры ВВ и ПЭ в любой момент времени. Так, численное

моделирование позволило авторам [1] и [5] расширить зависимость Джейкобса-Рослунда на случай взаимодействия двух ПЭ с зарядом ВВ.

Для состава В, закрытого стальным экраном толщиной 0,762 см, поражаемого одновременно кубическими ударниками со стороной 1,27 см, было получено следующее уравнение для зависимости критической скорости ударников от расстояния между ними [1]:

$$V^*(s) = [V_{JR}^2 - V_{JR}^1] \exp\left(-\left(\frac{d}{T}\right)^2 \cdot \frac{s}{C}\right) + V_{JR}^1,$$

где V_{JR}^1 – скорость по уравнению Джейкобса-Рослунда для ударника, характеризующегося размером d ; V_{JR}^2 – критическая скорость для соударения двух ПЭ одновременно; s – безразмерное расстояние между ПЭ; A_p – площадь взаимодействия; C , T – параметры, используемые в уравнении Джейкобса-Рослунда.

Уравнение Джейкобса-Рослунда имеет вид:

$$V_c = \frac{A}{\sqrt{d \cdot \cos \theta}} \cdot (1 + B) \cdot \left(1 + \frac{CT}{d}\right),$$

где V_c – критическая скорость ПЭ, от соударения с которым ВВ детонирует; A – экспериментальная постоянная, определяющая чувствительность ВВ; d – критический диаметр ПЭ; θ – угол соударения; B – экспериментальный коэффициент, зависящий от формы ПЭ; C – коэффициент защитных свойств экранирующей пластины; T – толщина экранирующей пластины.

Для квадратного сечения ударника ($A_p = d^2$) формула приводится к виду:

$$V^*(s) = A(B + 1) \frac{1}{\sqrt{d}} \left\{ -\exp\left[-\left(\frac{d}{T}\right)^2 \cdot \frac{s}{C}\right] \cdot \left[0.159 + C \frac{T}{d} (0.405)\right] + 1 + C \frac{T}{d} \right\},$$

где s – безразмерное расстояние между ударниками; A , B , C , T – параметры, используемые в уравнении Джейкобса-Рослунда.

Уравнение получено из численного моделирования [1] взаимодействий для ударников массой 3,9 и 16,2 г. Справедливость его показывается также для ударников массой 7,8 г.

После обработки результатов численного моделирования получено уравнение, применимое в случае детонации, которую вызывает соударение стальных кубических фрагментов с открытым зарядом ВВ или же с зарядом, закрытым стальным экраном [5].

$$V_2(\delta, t_d) = V_1(\infty, t_d) \left\{ 1 + \frac{K_w}{[1 + 2K_R\delta + K_T(\delta - K_V t_d)]^2} \right\}^{-1},$$

где

$K_T = K_C$, если $\delta - K_V \cdot t_d \geq 0$; $K_T = -K_C$, если $\delta - K_V \cdot t_d < 0$;

$V_2(\delta, t_d)$ – критическая скорость соударения двух ПЭ на расстоянии δ и с временной задержкой t_d ;

$V_1(\infty, t_d)$ – критическая скорость соударения одного ПЭ;

δ – расстояние между ПЭ в безразмерном виде (отношение расстояния к ширине ПЭ);

t_d – временная задержка в безразмерном виде (отношение размерной временной задержки к (d/C_E) , где d – критический размер ПЭ (ширина, у кубического), C_E – скорость звука в ВВ);

K_w, K_R – константы упрочнения и диссипации, соответственно;

K_V, K_C, K_D – константы выборки, схождения и расхождения, соответственно.

Построенные по данной формуле графические зависимости критической скорости инициирования детонации от δ для случая соударения двух кубических поражающих элементов с зарядом ВВ приведены на рисунке 1.

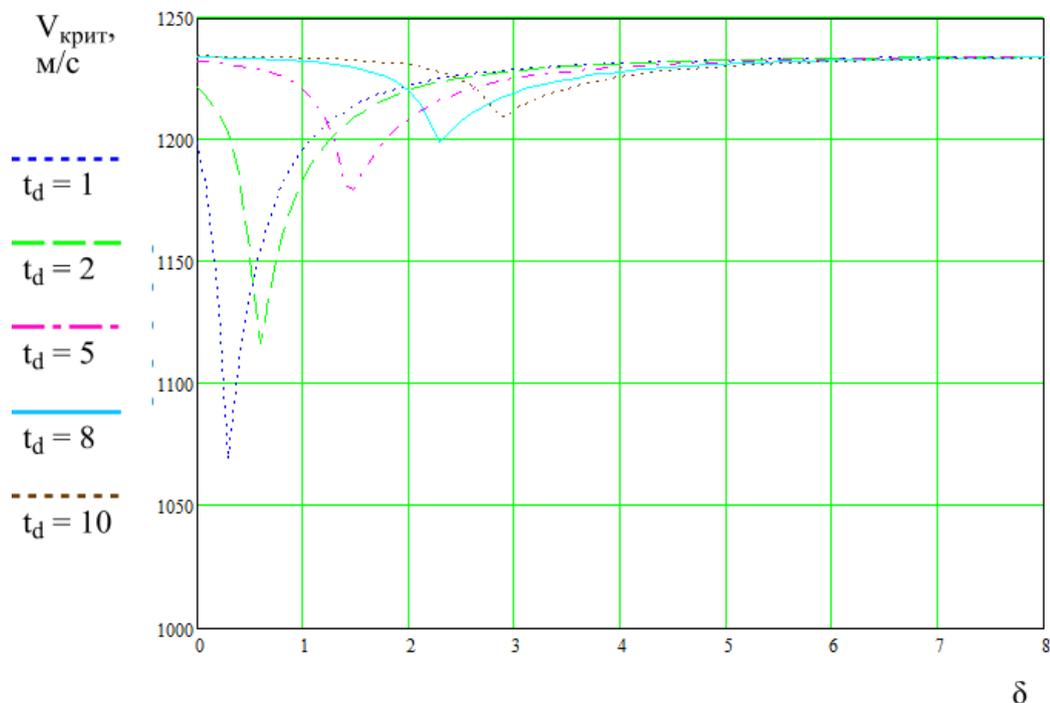


Рис. 1. Зависимость критической скорости инициирования детонации для случая соударения двух кубических поражающих элементов с зарядом ВВ состава: ТНТ – 30 %, октоген – 45 %, АІ – 20 %, флегматизатор – 5 %.

Однако, как видно из рис. 1, полученные зависимости применимы лишь в узком диапазоне управляющих параметров, таких, как тип ВВ, конфигурация экспериментальной сборки (ВВ: открытое, экранированное, заключенное в прочную оболочку), материал, форма, размеры (относительные и абсолютные) и масса ПЭ, расстояние и временной промежуток между соударениями.

Представляется логичным попытаться получить не просто подобные упомянутым выше частные зависимости, а сведения о более фундаментальных физических процессах, лежащих в основе тех или иных реальных результатов. Так, например, группа авторов [6] по итогам аналитических выкладок пришла к выводу, подтвержденному результатами численного моделирования, о том, что при равной кинетической энергии потока ПЭ вероятность детонации ВВ выше в том случае, если линейные размеры единичного ПЭ меньше, поскольку в этом случае объемная скорость передачи энергии ПЭ заряду ВВ будет выше. Однако, опубликованная ими работа ничего не сообщает о процессах, происходящих во время взаимодействия вызванных соударениями ПЭ ударных волн в толще вещества.

Таким образом, представляется возможным очертить круг вопросов, слабо освещенных в опубликованной литературе, и в первую очередь они будут связаны не столько с определением конкретных критических скоростей и параметров ПЭ, сколько с проблемой взаимодействия ударных волн в заряде ВВ. Это позволит нам глубже понять реальные физические процессы, на основе чего в дальнейшем будут строиться исследования критериев инициирования ВВ потоком ПЭ. Для изучения взаимодействия ударных волн в заряде ВВ было выбрано численное моделирование, поскольку, в отличие от натуральных экспериментов, оно позволяет повторять эксперимент многократно без особых финансовых затрат, тонко варьировать параметры эксперимента, а также получать подробную информацию о состоянии ВВ в любой точке в каждый момент времени, что довольно затруднительно в натуральных экспериментах.

Численное моделирование производилось в пакете Autodyn, хорошо себя зарекомендовавшем при изучении подобных процессов [7, 8].

Моделировалось соударение шарообразных элементов из нержавеющей стали с открытым зарядом ВВ октоген/тротил 70/30. Характеристики веществ брались из стандартной библиотеки, прилагаемой к AUTODYN [9]. Все компоненты представлены в лагранжевых координатах, что облегчает постановку граничных условий и ускоряет расчет.

Возникновение детонации в ВВ учитывалось при достижении характерных давления детонации и скорости фронта образующейся детонационной волны, а также согласно тому, что характеризующий в модели Ли-Тарвера полноту протекания реакции параметр F (отношение массы перешедшего в газообразное состояние ВВ к полной массе ВВ) принимал значение 1.

Задача решается в двумерном приближении, поскольку для определения влияния изменения различных параметров ударника (скорость, расстояние между точками соударения и временной промежуток между ними) требуется множество прогонов задачи, что фактически исключает возможность проводить расчет в трех измерениях из соображений сохранения рационального количества реального времени, требуемого на один прогон.

Исходя из тех же рациональных соображений, было необходимо подобрать такой размер ячейки расчетной сетки, чтобы обеспечить компромисс между временными затратами на один прогон и адекватностью физической картины происходящего. По результатам тестовых прогонов была выбрана удовлетворительная сетка в 15 ячеек на 1 см.

Путем варьирования скорости элемента были определены критические величины, при которых в заряде конечной длины гарантированно возникала детонация. За критическую скорость принималась впервые достигнутая при последовательном увеличении на определенную величину такая скорость, при которой наблюдается выраженный переход к детонации.

Наиболее адекватна реальности в случае единичного соударения осесимметричная постановка задачи, моделирующая соударение шарообразного ударника с цилиндрическим зарядом ВВ. В данном случае в силу симметрии возможно при счете задавать лишь «четверть» экспериментальной конфигурации, что опять же существенно ускоряет расчет.

Для варианта пробития несколькими (двумя) ПЭ осесимметричная постановка задачи теряет всякий смысл. В рамках двумерного описания остается вариант с плоскостной симметрией, когда фактически от пробития двумя шарообразными ПЭ переходят к пробитию двумя цилиндрами бесконечной длины. Формально в AUTODYN в случае плоскостной симметрии "толщина" расчетной модели принимается равной единице.

Возникает вопрос, насколько адекватно использование такого подхода для определения критической скорости инициирования. Для этого были проведены сравнительные расчеты для единичного ПЭ в двух различных по симметрии постановках

и выявлено подобие критических скоростей. В случае плоскостной симметрии они всегда были в $1641/1100 = 1,49$ раза ниже, чем для осевой. Физика этого явления понятна, поскольку при плоскостной симметрии реализуется проникание бесконечномерного цилиндрического ударника в соответствующий заряд ВВ в стесненных условиях. Разгрузка может осуществляться только в двух направлениях, в отличие от полноценного развития течения при проникании конечного ударника сферической формы, где возмущения распространяются по всем трем координатам и таким образом существенно снижают иницирующую способность ударника.

Чтобы удостовериться в том, что основной вклад в изменение картины вносит иная физика проникания, а не разница масс ударника, рассчитаем массу ударника радиусом $r = 0,63$ см для случая плоскостной симметрии (цилиндр с основанием диаметром 1,26 см и высотой, равной единице):

$$m_{\text{пл}} = (\pi \cdot r^2) \cdot \rho = 9.81 \text{ г.}$$

Отсюда получаем радиус шара той же массы:

$$r_{\text{шар}} = (m_{\text{пл}} \cdot 3 / (7.864 \pi))^{1/3} = 0.668 \text{ см.}$$

Аналогично вычислим радиус цилиндрического ударника с той же массой, что у исходного сферического:

$$r_{\text{цил}} = (m_{\text{шар}} / (7.864 \pi))^{1/2} = 0.577 \text{ см.}$$

Результаты проведенных численных расчетов с ударниками рассчитанных радиусов свидетельствуют, что данное небольшое различие по массе далеко не так существенно, как тот факт, что при плоскостной симметрии иная физика проникания ПЭ. Коэффициент подобия скоростей сохраняется.

Чтобы выяснить адекватность физической картины в случае плоскостной симметрии, встал вопрос сравнить двумерный расчет с результатами решения трехмерной задачи, в которой непосредственно изучалось бы взаимодействие двух шарообразных ударников с зарядом ВВ конечных размеров. Однако на этом пути встретились технические трудности, связанные с постановкой и численным решением трехмерных задач [10].

Тем не менее, удалось добиться удовлетворительной связи результатов двумерных и трехмерных расчетов для идентичных конфигураций:

- картина иницирования одиночным шарообразным ударником в решении трехмерной задачи практически целиком совпала с таковой в решении двумерной задачи.
- прогнозируемая критическая скорость одновременно летящих шарообразных ударников в 1,5 раза больше скорости ударников-цилиндров.

Принимая определенные допущения, можно сказать, что и в дальнейшем переход в детонацию будет идти подобно в случае использования меньших величин для ширины зоны реакции.

Таким образом, можно сделать вывод о допустимости применения плоскостной симметрии для двумерного расчета соударения двух ПЭ с зарядом ВВ.

Литература

1. Kuhns L., Wilson L.T. Determining detonation threshold for multiple fragment impacts // WWW: <http://sherpa.sandia.gov/9231home/pdfpapers/LTWilson.pdf> (дата обращения 10.11.2008).
2. В.А. Пырьев, В.С. Соловьев. Механизмы инициирования при простреле энергетических материалов, заключенных в оболочку // Методические указания по проблемам эффективности вооружений, трансфера технологий двойного назначения, обеспечения экологической безопасности окружающей природной среды. Сборник трудов. Вып. №6. М.: Российская инженерная академия, секция «Инженерные проблемы стабильности и конверсии», 1998. С. 83-90.
3. Touati D. et al. Numerical Prediction Of The Initiation Of Confined Heterogeneous Explosives By Fragment Penetration // 23rd International Symposium On Ballistics, 2007. С. 145-152.
4. Mader Ch.L. Numerical Modeling of Explosives and Propellants. Honolulu: CRC Press, 2005. 544 с.
5. Vavrick D.J. Analysis for the critical velocity for detonation from multi-fragment impacts on bare and composite plate covered H-6 explosive // Химическая физика. 2001. Т.20, №10. С. 14-20.
6. Vlad Georgevich, Philip Pincosy, Jay Chase. High explosive detonation threshold sensitivity due to multiple fragment impacts // 21st International Symposium on Ballistics, 2004. URL: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/303923.pdf> (дата обращения 01.11.2011).
7. Davison D. Three-Dimensional Analysis of the Explosive Initiation Threshold for Side Impact on a Shaped Charge Warhead // Insensitive Munitions and Energetic Technology Symposium, Tampa, Florida, October 1999. URL: <http://www.shocktrans.com/DownloadableFiles/STI.InsensitiveMunitions.1997.pdf> (дата обращения 01.11.2011).
8. Terblanche C.J., Mostert F.J. Base-Initiated Shaped Charges // 21th International Symposium on Ballistics, Australia, 2004. URL: <http://hsrlab.gatech.edu/AUTODYN/papers/paper165.pdf> (дата обращения 01.11.2011).

9. Autodyn: Explosive Initiation Users Manual (Lee-Tarver ignition and growth) // Century Dynamics, 2005. URL:

http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/autodyn/autodyn_archive/leetar_manual.pdf (дата обращения 01.11.2011).

10. Соловьев В.С., Маркова М.В., Марков И.В. Прогнозирование критической инициирующей скорости ударника с помощью пакета прикладных программ AUTODYN // Сборник трудов третьей Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России. Москва, 22-25 сентября 2010 г.» – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 208.

Setup of numerical simulation of interaction between an explosive charge and several high-speed penetrators

77-30569/330645

03, March 2012

Markova M.V., Soloviev V.S.

Bauman Moscow State Technical University

sm4@sm.bmstu.ru

The authors present a review of works dealing with the problem of shock explosive initiation; this review covered shock pulses administered by a single high-speed penetrator or by a flow of several penetrators. Expressions describing particular cases of interaction between an explosive charge and two high-speed penetrators are included in the article. Feasibility of numerical simulation was asserted to be the principal research technique for studying such high-speed processes. Different numerical setups using the AUTODYN 2D and 3D hydrocode are considered. Reasons behind planar symmetry used in a two-dimensional setup are included in the article. The authors show good agreement between the results obtained using two-dimensional setup with planar symmetry and results obtained during three-dimensional numerical runs.

Publications with keywords: [high explosive](#), [detonation](#), [numerical simulation](#), [penetrator](#), [shock pulse explosive initiation](#), [hydrocode](#), [AUTODYN](#)

Publications with words: [high explosive](#), [detonation](#), [numerical simulation](#), [penetrator](#), [shock pulse explosive initiation](#), [hydrocode](#), [AUTODYN](#)

References

1. Kuhns L., Wilson L.T. *Determining detonation threshold for multiple fragment impacts*. Available at: <http://sherpa.sandia.gov/9231home/pdfpapers/LTWilson.pdf>.
2. Pyr'ev V.A., Solov'ev V.S. Mekhanizmy initsirovaniia pri prostrele energeticheskikh materialov, zakliuchennykh v obolochku [Mechanisms of initiation during the streaming of energetic materials enclosed in a shell]. *Trudy Ros. Inzhenernoi Akademii. Sekts. "Inzhenernye Problemy Stabil'nosti i Konversii"* [Proc. Rus. Acad. of Engineering. Sec. "Engineering Problems of Stability and Conversion"]. 1998, no. 6, pp. 83-90.
3. Touati D., Tivon G., Peles S., Alfo A., Bank L., Shvarts A., Peretz D. Numerical prediction of the initiation of confined heterogeneous explosives by fragment penetration. *23rd Int. Symp. on Ballistics*, Tarragona, Spain, April 16-20, 2007, pp. 145-152.

4. Mader Ch.L. *Numerical Modeling of Explosives and Propellants*. Boca Raton, CRC Press, 2005. 544 p.
5. Vavrick D.J. Analysis for the critical velocity for detonation from multi-fragment impacts on bare and composite plate covered H-6 explosive. *Khimicheskaya Fizika*, 2001, vol. 20, no. 10, pp. 14-20.
6. Georgevich V., Pincosy Ph., Chase J. High explosive detonation threshold sensitivity due to multiple fragment impacts. *21st Int. Symp. on Ballistics*, Adelaide, Australia, April 19-23, 2004. Available at: <http://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/303923.pdf>. Accessed Nov. 01, 2011.
7. Davison D. Three-Dimensional Analysis of the Explosive Initiation Threshold for Side Impact on a Shaped Charge Warhead. *Insensitive Munitions and Energetics Technology Symp.* Tampa, Florida, Oct. 1997. Available at: <http://www.shocktrans.com/DownloadableFiles/STI.InsensitiveMunitions.1997.pdf>. Accessed Nov. 01, 2011.
8. Terblanche C.J., Mostert F.J. Base-Initiated Shaped Charges. *21st Int. Symp. on Ballistics*, Adelaide, Australia, April 19-23, 2004. Available at: <http://hsrlab.gatech.edu/AUTODYN/papers/paper165.pdf>. Accessed Nov. 01, 2011.
9. *AUTODYN: Explosive Initiation Users Manual (Lee-Tarver Ignition & Growth)*, 2005. Available at: http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/autodyn/autodyn_archive/leetar_manual.pdf. Accessed Nov. 01, 2011.
10. Solov'ev V.S., Markova M.V., Markov I.V. Prognozirovaniye kriticheskoi initsiiruiushchei skorosti udarnika s pomoshch'iu paketa prikladnykh programm AUTODYN [Prediction of the critical initiating projectile velocity using the software package AUTODYN]. "*Budushchee mashinostroeniia Rossii*". *Trudy 3 Vseros. konf. mol. uchenykh i spets.* ["The Future Engineering of Russia". Proc. 3rd All-Rus. Conf. of Young Sci. and Spec.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010, p. 208.