

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ТОНКОСТЕННОМ КОНТЕЙНЕРЕ С ВЗРЫВЧАТЫМ ВЕЩЕСТВОМ. I. УДАР ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ С ПЛОСКИМ ТОРЦОМ

Хенхо Шин, Вунг Ли\*

Центр разработки наземных систем, Агентство оборонных исследований, П.Я. 35-1, Тэджон, 305-600, Республика Корея, shinh@unitel.co.kr

Численно исследовано взаимодействие ударных волн, которое могло бы вызвать детонацию взрывчатого вещества (Composition В), содержащегося в тонкостенном контейнере при ударе по нему цилиндрическим ударником. Для нахождения скорости выделения энергии взрывчатого вещества использовалась модель Forest Fire. После удара волны разрежения, распространяющиеся от периферии элемента и со стороны поверхности раздела оболочка — взрывчатое вещество, догоняют ударные фронты, движущиеся по взрывчатому веществу и ударнику. При высокой скорости ударника прошедшая ударная волна возбуждает детонацию у поверхности раздела оболочка — взрывчатое вещество. При средних значениях скорости ударника скорость выделения энергии из ударно-сжатого объема взрывчатого вещества такова, что эффекты, связанные с этим, преобладают над эффектами, вызванными волнами разрежения, и приводят к возбуждению детонации после того, как ударная волна проходит некоторое расстояние во взрывчатом веществе. Обнаружено, что существует диапазон минимальных скоростей ударника, при которых воздействие волн разрежения преобладает над выделением энергии, и в результате детонация возбуждается не за фронтом ударной волны, движущейся по взрывчатому веществу, а только после отражения от нижней пластины из материала с высоким импедансом. Это означает, что при исследовании отклика взрывчатого вещества, заключенного в оболочку из материала с высоким импедансом, необходимо принимать во внимание эффекты, связанные с взаимодействием ударной волны со стенками контейнера.

Ключевые слова: ударная волна, ударник с плоским торцом, взрывчатое вещество в оболочке, модель Forest Fire, детонация взрывчатого вещества.

## ВВЕДЕНИЕ

Заряды взрывчатых веществ (ВВ) должны быть достаточно мощными, чтобы генерировать сильные ударные волны или ускорять оболочки либо их фрагменты до высоких скоростей, и в то же время — быть малочувствительными при ударе по ним осколком даже с такой высокой скоростью, как 2540 м/с [1]. В связи с этим большое значение имеет надежное предсказание отклика ВВ на удар с высокой скоростью, т. е. ответ на вопрос, возникнет детонация или нет в зависимости от предполагаемого назначения устройства [2]. Это особенно важно при проектировании боеголовок, хранении военного снаряжения, анализе вопросов безопасности [1] и действия систем с активной защитой брони [3]. Критерием крити-

ческого инициирования обычно служит пороговая скорость ударника, которая может вызвать детонацию ВВ. Изучению инициирования ВВ ударником посвящено много экспериментальных [4–6], аналитических [7] и расчетных [8–10] работ, но большинство из них касается чувствительности к удару либо полностью открытого ВВ, либо закрытого только со стороны поверхности удара. Для ВВ, окруженного оболочкой со всех сторон, в литературе имеется совсем немного данных. К ним можно отнести результаты экспериментов [11–15] по ударному инициированию ВВ, заключенных в толстые ( $\approx 10$  мм) металлические оболочки, с толщиной ВВ, сравнимой с поперечным размером контейнера. В таких толстых контейнерах при возникновении детонации интенсивная реакция ВВ поддерживается при пониженной пороговой скорости удара в течение большего времени, чем в случае с открытым ВВ [11]. Этот эффект интерпретировался как

\*Hyunho Shin, Woonge Lee, Ground Systems Development Centre, Agency for Defence Development, P.O. Box 35-1, Daejeon, 305-600, Republic of Korea.

результат наличия оболочки, а именно: толстые стенки контейнера удерживали непрореагировавшие части ВВ в контакте с реагирующим объемом вопреки растущему внутреннему давлению. Однако взаимодействие проходящих ударных волн с боковыми стенками или нижней пластиной в работах [11–15] не изучалось.

При исследовании того, как взаимодействие ударных волн со стенками оболочки влияет на ударное инициирование ВВ в кассете, наиболее точные данные могут дать эксперименты. Однако такой подход является весьма дорогостоящим, а иногда и очень трудным в реализации (например, исследование детонации ВВ в контейнере с помощью импульсной рентгенографии). Численное моделирование, требующее меньших затрат, может обеспечить то понимание процесса, которое трудно достигнуть при рассмотрении только экспериментальных данных.

Цель данной работы — численное исследование взаимодействия ударных волн в ВВ, помещенном в стальную тонкостенную оболочку (толщина стенок 2 мм), по которой производится удар по нормали ударником — цилиндрическим стержнем с плоским торцом из вольфрамового сплава. Влияние тонкостенной оболочки на предотвращение разлета ВВ меньше по сравнению с толстостенными контейнерами, в то время как возможность взаимодействия ударных волн из-за наличия оболочки, по-видимому, остается еще весьма значительной. В этом смысле данная работа поможет выяснить, какой механизм играет главную роль в инициировании ВВ, помещенного в оболочку, и обеспечивает корректный подход для интерпретации предыдущих экспериментальных данных [11–15].

Примером ВВ в тонкостенном контейнере (толщина стенок  $\approx 2$  мм) может быть кассета с реагирующим веществом (активная кассета) [16] для системы активной броневой защиты [17], в которой толщина ВВ намного меньше поперечных размеров кассеты. Чувствительность активной кассеты по отношению к инициированию ударом весьма важна для обеспечения функционирования и безопасности систем активной броневой защиты [3]. Поскольку взаимодействие ударных волн в активной кассете прямо связано с механизмами возбуждения детонации ВВ, то понимание этого взаимодействия могло бы дать необходимую информацию для конструирования активных кассет.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На рис. 1 схематически показано поведение ударной волны, движущейся в инертной твердой среде и в реагирующем материале. Рассмотрим случай, когда ударная волна, имеющая первоначально прямоугольную форму, движется в инертной среде (рис. 1, *a*). Скорость ударной волны  $u_s$  зависит от давления в ней и плотности среды перед фронтом, в то время как скорость волны разрежения  $u_R$  контролируется массовой скоростью, ударным давлением и плотностью среды позади и впереди фронта. Так как волна разрежения движется в материале с более высокой плотностью (уже ударно-сжатом), ее скорость выше скорости ударной волны [18]. Следовательно, волна разрежения догоняет ударный фронт, что меняет форму ударной волны. В результате прямоугольная волна становится похожей на зуб пилы с быстрым спадом давления за фронтом (см. рис. 1, *a*). Когда движущаяся ударная волна (сжимающее напряжение) переходит через границу раздела со средой с меньшим ударным импедансом  $K = \rho u_s$  (где  $\rho$  — плотность), то отраженная от границы волна является волной разрежения, в то время как прошедшая — волной сжатия, поскольку массовая скорость возрастает при переходе через границу раздела [19].

В случае, когда ударная волна с достаточным давлением движется по твердому гетерогенному ВВ (см. рис. 1, *b*), она взаимодействует с неоднородностями плотности, генерируя многочисленные «горячие точки» за ударным фронтом [20, 21]. В этих «горячих точках» начинается быстрая химическая реакция, контролируемая давлением [22] или скоростью горения зерен [23], энергия передается ударному фронту, движущемуся вперед со скоростью  $u_s$ . Если скорость выделения энергии достаточна, чтобы компенсировать действие волны разрежения, то ударная волна не затухает, а, наоборот, усиливается до тех пор, пока не вызовет детонацию ВВ [24]. В точке возбуждения детонации волна сжатия, возникающая в результате химического выделения энергии, догоняет ударный фронт и затем ведет его со скоростью  $u_D$ , как видно из рис. 1, *b*. Зона впереди точки Чепмена — Жуге является зоной химической реакции, в то время как позади этой точки находится зона продуктов детонации.

При численном моделировании взаимодействия ударной волны с ВВ образование «го-

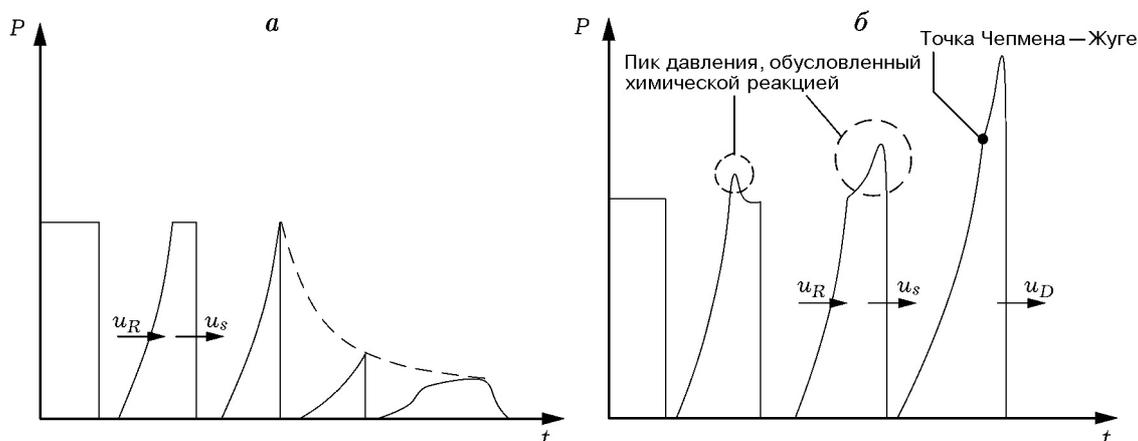


Рис. 1. Поведение проходящей ударной волны в не реагирующей твердой среде (а) и в реагирующем материале (б)

рячих точек» и последующее разложение ВВ описываются эволюционным уравнением, содержащим ряд эмпирических констант. В модели Forest Fire [25] основная особенность процесса моделируется на основе экспериментально обнаруженной зависимости расстояния, которое проходит ударная волна в ВВ до возникновения детонации, от ее начального давления: чем больше давление ударной волны, тем меньше пробег до возникновения детонации [26]. Поэтому скорость реакции задается рядом по степеням давления [22]. В различных подходах к заданию эволюционного уравнения [27, 28] модель Forest Fire [25] включена в ряд одно-, дву- и трехмерных гидродинамических компьютерных программ и использовалась для решения различных задач, включая обтекание угла при сложных геометрических условиях, расчет критического диаметра и т. д. [8–10, 22]. Хотя эта модель и рассматривает ударный скачок как простую плоскую волну [29], ее полезность и прогнозирующие возможности были неоднократно продемонстрированы и описаны [22, 30]. В данной работе эта модель используется для исследования физических явлений, происходящих при движении ударной волны в ВВ, находящемся в тонкостенном контейнере.

## 2. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Численный расчет проводился с использованием конечно-разностного гидродинамичес-

кого кода Hull\* в двумерной осесимметричной эйлеровой прямоугольной сетке ( $0,1 \times 0,1$  мм), обусловленной симметрией задачи. Рис. 2 показывает, как моделировалась реальная геометрия. В действительности трехмерная геометрия (см. рис. 2, а) была упрощена до двумерной осесимметричной (см. рис. 2, б). Как видно из рисунка, диск из ВВ (Comp В, массовое содержание:  $\approx 55\%$  гексогена,  $\approx 45\%$  ТНТ) диаметром 56 мм и толщиной 7 мм заключен в стальную оболочку с толщиной стенок 2 мм, образуя, таким образом, активную кассету. Длина цилиндрического элемента 24 мм, диаметр 12 мм. Скорость удара варьировалась от 1200 до 1800 м/с. Началом координат служил центр круговой поверхности, по которой происходило соударение ударника с верхней пластиной. Во всех расчетах в начальный момент времени ударник располагался на расстоянии 1 мм от поверхности мишени (при  $t = 0$ ,  $x = 0$ ) и двигался по направлению к активной кассете. Предполагалось, что воздух, ударник, оболочка и ВВ находились при давлении 1 атм (101325 Па), что учитывалось в уравнениях состояния этих материалов. Гравитационный эффект в расчетах не учитывался.

Материалы в конденсированной фазе (ударник, оболочка, ВВ) описывались уравнением состояния Ми — Грюнайзена [31] с учетом прочностных свойств, а продукты детонации и воздух — уравнением состояния

\*Программа разработана фирмой Orlando Technology, Inc., Shalima, Florida.

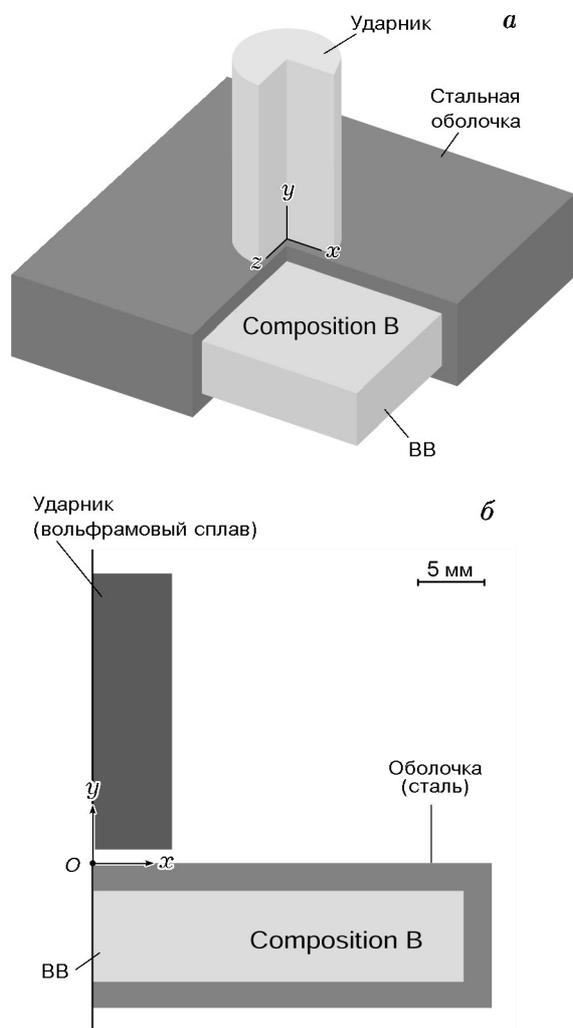


Рис. 2. Схема постановки задачи:

*a* — реальная трехмерная геометрия с разрезом, *б* — упрощенная осесимметричная постановка для численного моделирования

Джонса — Уилкинса — Ли [32] и уравнением состояния политропического газа [32] соответственно. Как отмечалось выше, для описания скорости выделения энергии во взрывчатом веществе использовалась модель Forest Fire [22, 25].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Удар при высокой скорости ударника

Рис. 3 иллюстрирует поведение ВВ, заключенного в оболочку, при ударе по нему стержнем со скоростью 1800 м/с. На рисунке

справа от оси симметрии показаны области, представляющие тип материала, а слева нанесены изобары гидростатического давления в этих материалах. Через 0,85 мкс импульс давления, сформировавшийся на поверхности раздела ударника — верхняя пластина, продвигается вниз и приближается к поверхности раздела верхняя пластина — ВВ. Из сравнения рис. 3, *б* с рис. 3, *а* видно, что область давления, ограниченная изобарой 48 ГПа, уменьшается в горизонтальном (радиальном) направлении к центральной оси из-за действия волны разрежения, возникающей на периферии ударника (отмечена как  $r_1$ ). В момент времени  $t = 1,05$  мкс (см. рис. 3, *б*) ударный скачок входит в ВВ, инициируя детонацию за поверхностью раздела верхняя пластина — ВВ, и затем распространяется в установившемся режиме (см. рис. 3, *в, г*), превращая весь реагирующий материал в продукты детонации.

В момент возникновения детонации (см. рис. 3, *б*) нижний контур зоны высокого давления (изобара 48 ГПа) сдвигается вверх по сравнению с предыдущим шагом по времени. Это связано с тем, что ударный импульс, отразившись волной разрежения от материала с низким импедансом (поверхность раздела верхняя пластина — ВВ), движется вверх: только часть волны сжатия проходит в ВВ. Эта отраженная волна разрежения ( $r_2$ ) показана на рис. 3, *б* как более широкая, по сравнению с предыдущим временным шагом (см. рис. 3, *а*), область изобар между поверхностью раздела верхняя пластина — ВВ и нижней частью изобары 32 ГПа.

В области, удаленной от центральной оси, эта отраженная волна ( $r_2$  на рис. 3, *б*) деформирует изобары и делает их вогнутыми. Согласно одномерной теории [19] при прохождении границы раздела материалов с различным импедансом отношение давления в прошедшей волне ( $p_t$ ) к давлению в падающей волне ( $p_i$ ) определяется выражением

$$\frac{p_t}{p_i} = \frac{2K_2}{K_1 + K_2}, \quad (1)$$

где  $K$  — ударный импеданс, индексы 1 и 2 относятся к стальной оболочке и ВВ соответственно. Если взять для расчета подходящие значения характеристик материалов (для стальной оболочки  $\rho = 7900$  кг/м<sup>3</sup>,  $u_s = 4600$  м/с, для ВВ  $\rho = 1700$  кг/м<sup>3</sup>,  $u_s = 2900$  м/с), то окажется, что только 23,9 % ударного давления пе-

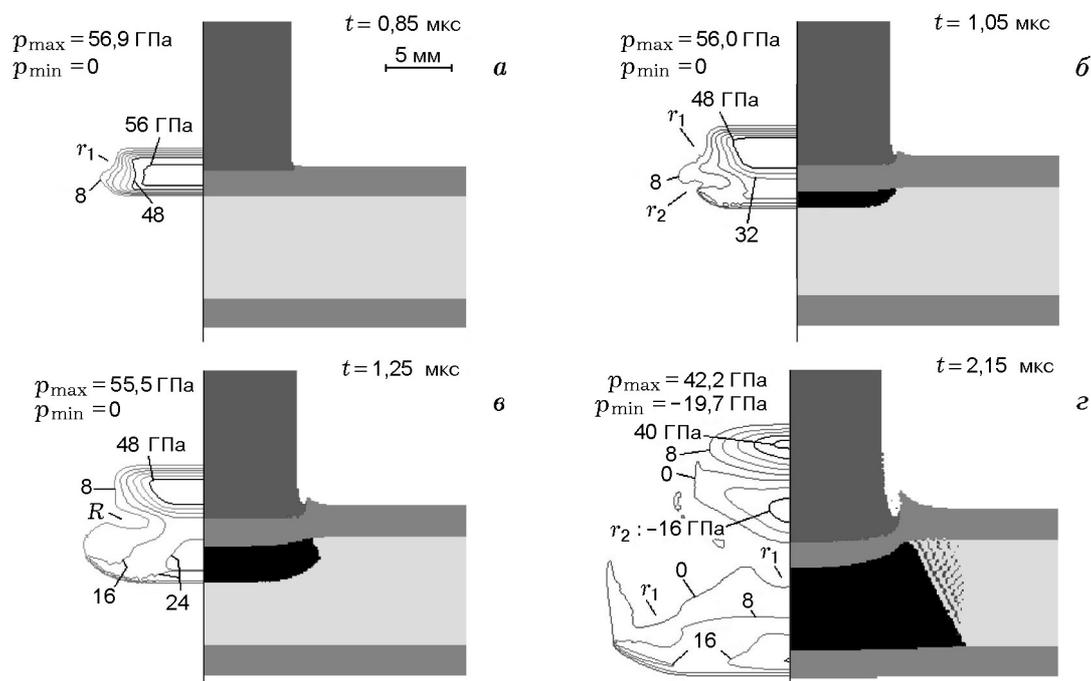


Рис. 3. Развитие детонации в контейнере с ВВ в различные моменты времени при ударе стержнем с плоским торцом со скоростью 1800 м/с

редается из верхней пластины в ВВ, в то время как оставшаяся часть отражается волной разрежения ( $r_2$  на рис. 3,б).

Волны разрежения  $r_1$  и  $r_2$ , по-видимому, смешиваются к моменту времени  $t = 1,15$  мкс (отмечены  $R$  на рис. 3,в), и начиная с 1,25 мкс появляются два заметных контура давления, т. е. волна разрежения делит область высокого давления на две части: одна расположена в ударнике, другая — в ВВ. Волна разрежения  $r_2$ , возникшая на поверхности раздела верхняя пластина — ВВ, догоняет движущийся вперед фронт в элементе и позднее формирует в нем область растяжения (см. рис. 3,г). Волна разрежения  $r_1$ , появившаяся на периферии ударника, входит в область, занятую ВВ, и догоняет движущийся фронт детонации (см. рис. 3,г).

### 3.2. Удар при средней скорости ударника

На рис. 4 показано, как развивается детонация при ударе по ВВ в оболочке ударником со скоростью 1375 м/с. Продукты детонации не ведут ударный фронт (см. рис. 4,а), и поэтому ударная волна не может сразу перейти в детонационную. Детонация не возникает непосредственно за верхней пластиной, так как

давления, передаваемого из верхней пластины в ВВ, недостаточно по сравнению с ударом при скорости 1800 м/с (см. рис. 3). Однако давление в ударной волне усилилось по сравнению с моментом вхождения волны в ВВ, но пройденного расстояния оказалось недостаточно для возникновения детонации. Позднее зона с продуктами горения появляется в небольшой круговой области, ограниченной изобарами 24 ÷ 32 ГПа (ср. рис. 4,б и рис. 4,а).

Давление во вновь образовавшейся области сильно возрастает по сравнению с предыдущим временным шагом, и, соответственно, волна химической реакции ведет и усиливает ударный фронт (см. рис. 4,в,г), как это видно по четкой границе, разделяющей сгоревшее и несгоревшее ВВ. Таким образом, случаи детонации, возникающей после пробега ударной волной некоторого расстояния по ВВ в относительно тонком контейнере (см. рис. 4), и инициирование детонации непосредственно за верхней пластиной (см. рис. 3), описанные в данной работе, согласуются с результатами работ, в которых исследовались толстые слои ВВ, покрытые или не покрытые верхней пластиной [8–10].

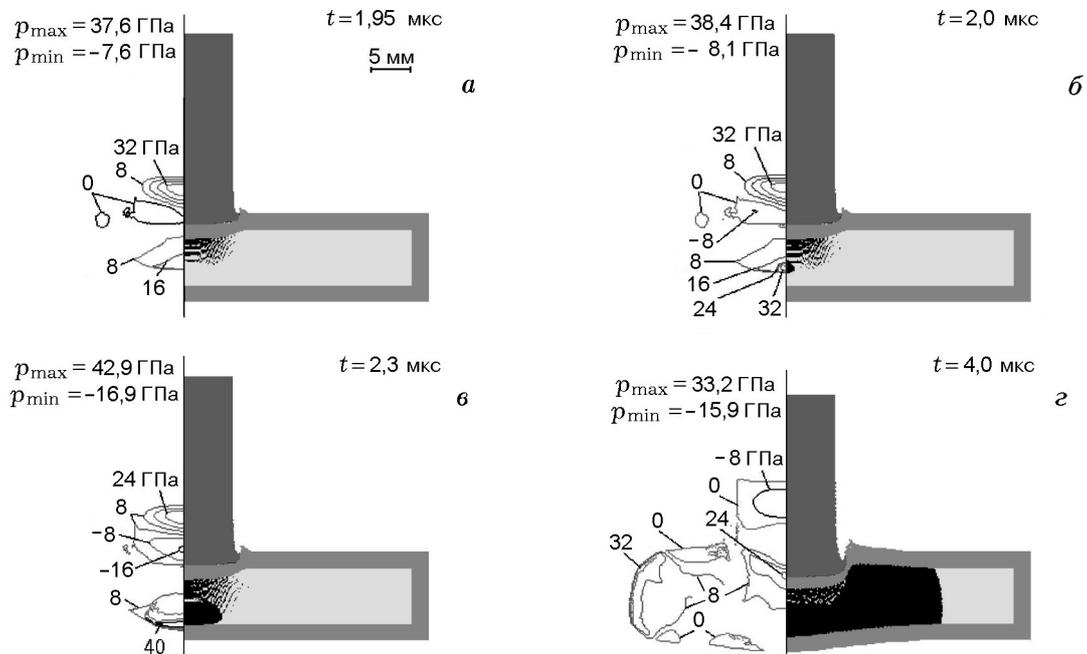


Рис. 4. Развитие детонации в контейнере с ВВ в различные моменты времени при ударе стержнем с плоским торцом со скоростью 1375 м/с

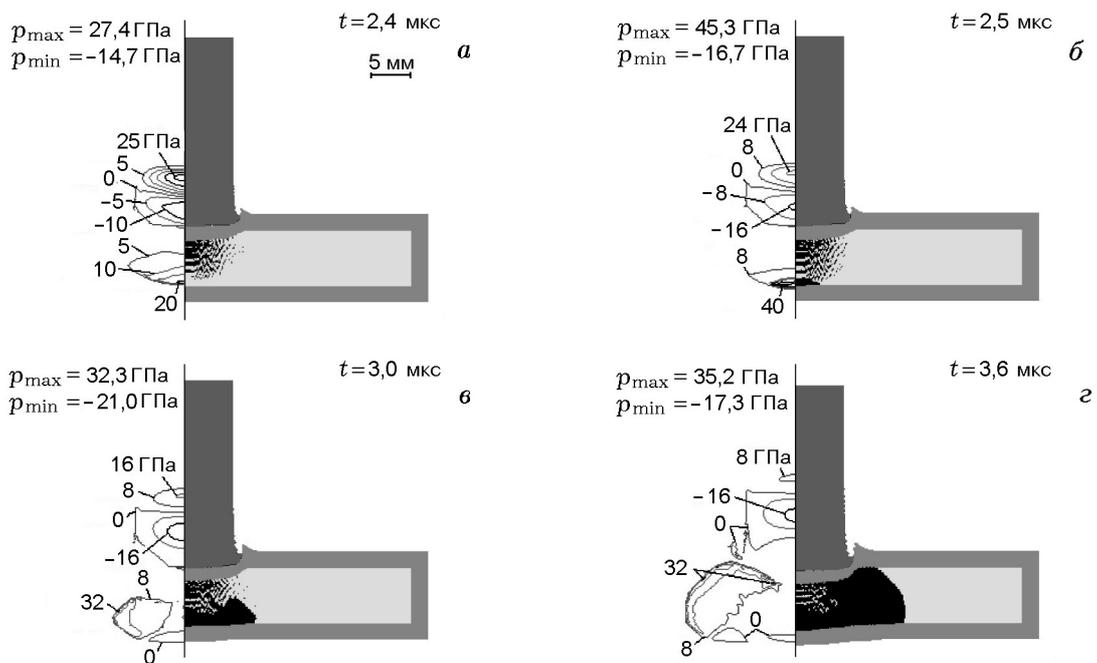


Рис. 5. Развитие детонации в контейнере с ВВ в различные моменты времени при ударе стержнем с плоским торцом со скоростью 1200 м/с

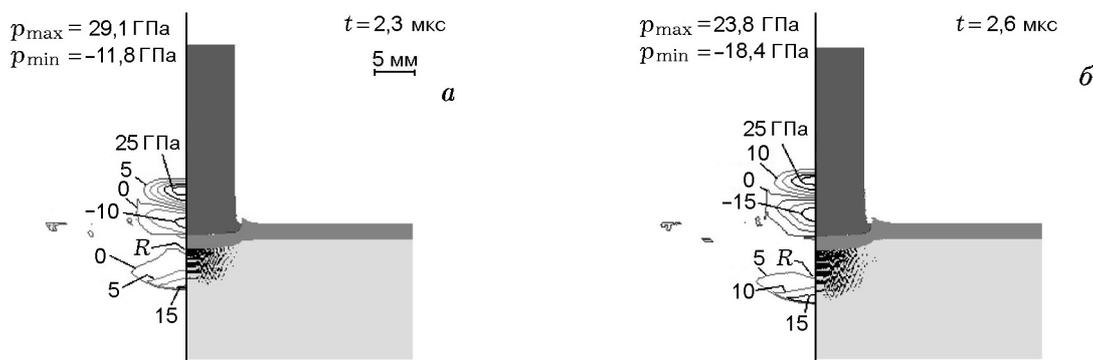


Рис. 6. Развитие детонации в отсутствие нижней пластины в различные моменты времени при ударе стержнем с плоским торцом со скоростью 1200 м/с

### 3.3. Удар при минимальной скорости ударника, инициирующей детонацию

При дальнейшем уменьшении скорости элемента до 1200 м/с детонация не возбуждается до тех пор, пока УВ почти не достигнет нижней пластины контейнера (рис. 5, *a*). Тем не менее детонация может возникнуть после отражения УВ от нижней пластины (рис. 5, *b*) и будет развиваться дальше (рис. 5, *в, г*).

Для того чтобы понять, как влияет нижняя пластина на возникновение детонации, моделировалась постановка с тем же самым ВВ и при той же скорости удара, но в отсутствие нижней пластины. Результат показан на рис. 6. Толщина ВВ при этом была увеличена до 15 мм, чтобы обеспечить достаточный пробег ударной волны по ВВ. Волна разрежения ( $R$  на рис. 6) догоняет ударный фронт в ВВ. Для того чтобы выяснить, усиливается детонационная волна или затухает, контролировался уровень давления на ударном фронте по мере того, как он проходил частицы в центральной области. Результат показан на рис. 7. Координаты частиц вдоль направления  $x$  фиксировались на расстоянии 0,5 мм (эйлеровы), в то время как координаты вдоль направления  $y$  менялись с учетом вертикального движения поверхности раздела верхняя пластина — ВВ. Как видно из рис. 7, давление на ударном фронте растет вдоль оси  $y$  до момента времени  $t \approx 2,1$  мкс, затем оно уменьшается. Спад давления означает затухание детонации, т. е. влияние волны разрежения от ударной поверхности ( $R$  на рис. 6) превалирует над скоростью выделения химической энергии из ВВ. Поскольку в модельной постановке, показанной

на рис. 6, где нижняя пластина отсутствует, детонация не возникает, то в расчете, представленном на рис. 5, детонация, несомненно, вызвана наличием нижней пластины.

Возникновение детонации в нижней части активной кассеты можно объяснить, используя одномерный анализ, аналогично тому, как это сделано в п. 3.1. Отношение давления в отраженной волне ( $p_{ref}$ ) к давлению в падающей волне ( $p_i$ ) согласно [19] вычисляется по формуле

$$\frac{p_{ref}}{p_i} = \frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2}. \quad (2)$$

Если взять те же значения характеристик материалов, что и выше (для стальной оболочки  $\rho = 7900$  кг/м<sup>3</sup>,  $u_s = 4600$  м/с, для исходного ВВ  $\rho = 1700$  кг/м<sup>3</sup>,  $u_s = 2900$  м/с), то отношение суммарного давления  $p_i + p_{ref}$  к давлению в падающей волне  $p_i$  должно быть 1,761. Это означает, что в ближней от нижней пластины окрестности давление на ударном скачке возрастает на 76,1 %. Таким образом, детонация в нижней части кассеты, очевидно, возникает в результате наложения падающей и отраженной волн из-за наличия нижней пластины. Отметим, что, при отражении ударной волны от нижней пластины возникает скачок давления: от  $\approx 20$  ГПа (см. рис. 5, *a*) до 45,3 ГПа (см. рис. 5, *b*), но отношение суммарного давления к падающему, примерно равное 2,27, несколько выше, чем оценка в одномерном приближении. Это обусловлено тем, что увеличение давления за счет химической реакции (детонация) в одномерном анализе не учитывается. Отметим также, что детонация, связанная с наличием

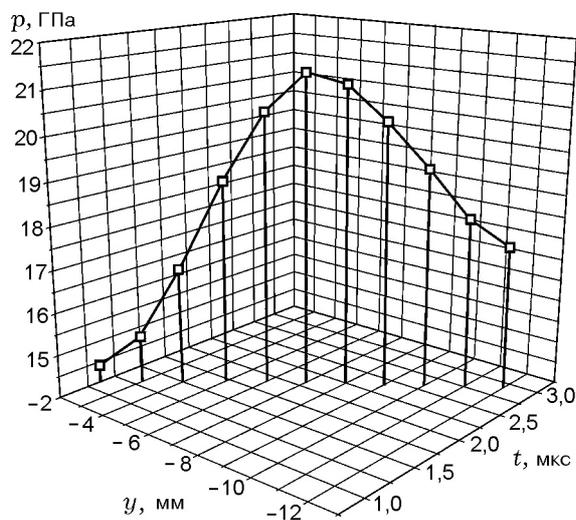


Рис. 7. Зависимость амплитуды ударного фронта в системе, показанной на рис. 6, от пройденного расстояния и времени

ем нижней пластины, возникает на центральной оси траектории элемента, поскольку сферическая ударная волна сначала входит в центральную область.

Физическая значимость результатов анализа удара стержнем с плоским торцом по контейнеру с ВВ состоит в том, что инициирование детонации может происходить в любом месте по вертикали вдоль траектории ударной волны в ВВ в зависимости от скорости удара. Как схематически показано на рис. 8, при высокой скорости удара детонация может возбуждаться прошедшей ударной волной сразу за верхней пластиной (А на рис. 8) (механизм I). При средней скорости удара детонация возникает в объеме ВВ (В на рис. 8) из-за усиления ударной волны после пробега по ВВ (механизм II). Если детонация возникает при минимальной скорости удара, то ВВ детонирует в области, которая расположена вблизи нижней пластины (С на рис. 8), в результате суперпозиции падающей (механизм II) и отраженной (механизм III) ударных волн. Все возможные точки возникновения детонации при ударе располагались на центральной оси траектории ударника.

Полученные результаты свидетельствуют, что детонационный отклик ВВ, заключенного в толстую оболочку, описанный в [11–15], может быть связан с отражением ударной волны от стенок контейнера в дополнение к тому, что стенки удерживают непрореагировавшее ВВ. Столь резкое увеличение чувст-

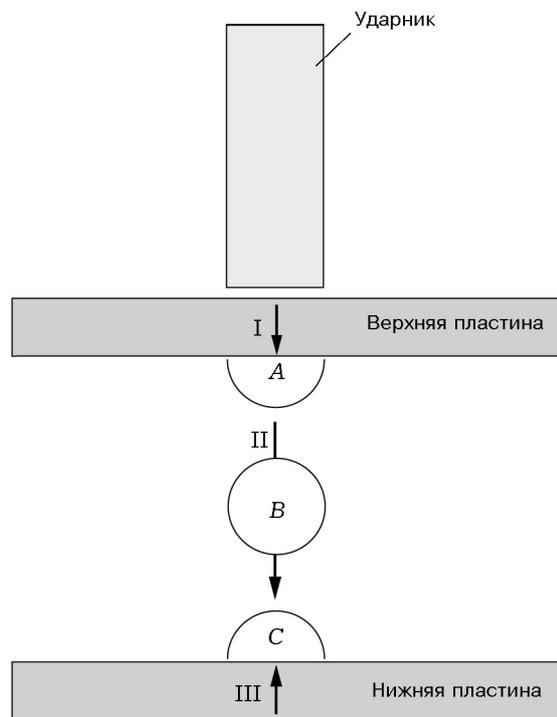


Рис. 8. Траектории распространения ударной волны (I–III) и точки возникновения детонации (A, B, C)

вительности кассеты с ВВ к ударному инициированию, полученное в данной работе, является, главным образом, следствием отражения ударной волны, так как способность тонкой (2 мм) стенки активной кассеты сопротивляться внутреннему давлению детонирующего ВВ должна быть относительно слабой по сравнению с контейнерами с более толстыми (10 мм) стенками.

Кроме того, в отдельных расчетах исследовалось влияние боковых стенок. Их отсутствие не оказало какого-либо заметного влияния на отражение ударной волны и возбуждение детонации возле нижней пластины. Это показывает, что, скорее, отражение ударной волны от стенки активной кассеты играет основную роль в возбуждении детонации, чем окружение его боковыми стенками. Подобная ситуация реализуется и в случае ВВ в толстых контейнерах [11–15]. Следовательно, при анализе ударной чувствительности ВВ, находящегося в оболочке с высоким импедансом, необходимо учитывать эффект взаимодействия ударной волны с боковыми или нижней стенкой контейнера, так как это увеличивает вероятность возбуждения детонации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе модели Forest Fire для скорости реакции ВВ численно исследованы различные режимы ударного возбуждения детонации ВВ, заключенного в стальную оболочку. Из параметрического исследования влияния скорости удара цилиндрического стержня с плоским торцом, выполненного из тяжелого вольфрамового сплава, сделаны следующие выводы.

После того, как сформируются ударные волны в верхней пластине и ударнике, на поверхности раздела верхняя пластина — ВВ и на периферии ударника возникают волны разрежения. Эти волны делят ударно-сжатый до высокого давления объем на две части: одна находится в ударнике, другая — в ВВ. Затем они догоняют движущиеся вперед ударные фронты, расположенные в ударнике и ВВ соответственно. Ударный фронт, прошедший в ВВ, значительно усиливается не только за счет пробега по ВВ, но и в результате отражения от нижней пластины с высоким импедансом и последующей суперпозиции отраженной и падающей волн.

При высокой скорости удара ударный фронт, прошедший в ВВ из верхней пластины, возбуждает детонацию у поверхности раздела верхняя пластина — ВВ. При средней скорости удара волна разрежения догоняет ударный фронт, но выделение энергии из ударно-сжатого объема превалирует, что приводит к инициированию детонации после пробега ударной волной некоторого расстояния в ВВ. Существует диапазон минимальных скоростей удара для возникновения детонации, в котором влияние волны разрежения на ударный фронт преобладает над химическим выделением энергии в ударно-сжатом объеме. В результате детонация возбуждается не из-за пробега ударной волны по ВВ, а исключительно из-за наличия нижней пластины.

Из результатов, приведенных выше, следует, что при исследовании возможной детонации ВВ, находящегося в контейнере с высоким импедансом, необходимо учитывать эффект взаимодействия ударной волны с боковыми или нижней стенкой контейнера, так как это увеличивает вероятность возбуждения детонации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Naval Surface Warfare Center. Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions. Military Standard No. MIL-STD-2105B, Dept. of Defense, Indian Head, Maryland, 1994.
2. Held M. Initiation of covered high explosives has many facets // Proc. Third European Armoured Fighting Vehicle Symp. Shrivenham, UK, 1998.
3. U.S. Army Test and Evaluation Command. Typical Reactive Armor Safety Tests. Test Operations Procedure No. TOP-2-2-623. Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1993.
4. Bahl K. L., Vantine H. C., Weingart R. C. The shock initiation of bare and covered explosives by projectile impact // Proc. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, Arlington, Virginia, 1981. P. 325–335.
5. Eldh D., Persson B., Ohlin B., et al. Shooting test with plane impact surface for determining the sensitivity of explosives // Explosivstoffe. 1963. V. 5. P. 97–103.
6. Griffiths N., Laidler R. M., Spooner S. T. Some aspects of the shock initiation of condensed explosives // Combust. Flame. 1963. V. 7. P. 347–352.
7. James H. R., Haskins P. J., Cook M. D. Prompt shock initiation of cased explosives by projectile impact // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1996. V. 21. P. 251–257.
8. Lawrence W., Starkenberg J. The Effects of the Failure Diameter of an Explosive on Its Response to Shaped Charge Jet Attack. Army Research Laboratory Report No. ARL-TR-1350. Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1997.
9. Borg R. A. J., Jones D. A. Numerical Simulation of Projectile Impact Experiments Using the Forest Fire Reaction Rate Model. Defence Science and Technology Organisation Report No. DSTO-TR-0325. Canberra, Australia, 1996.
10. Chou P. C., Liang D., Flis W. J. Shock and shear initiation of explosive // Shock Waves. 1991. V. 1. P. 285–292.
11. Held M. Reaction thresholds in unconfined and confined charges by shock load // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2000. V. 25. P. 107–111.
12. James H. R., Haskins P. J., Cook M. D. Effect of case thickness and projectile geometry on the shock initiation threshold for a given explosive // AGARD Conference Proceedings. 1992. V. 511. P. 18/1–18/15.
13. Cook M. D., Haskins P. J., James H. R. Projectile impact initiation of explosive charges // Proc. Ninth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, Arlington, Virginia, 1989. P. 1441–1450.
14. Held M. Test set-up for instrumented initiation tests // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2000. V. 25. P. 49–53.
15. Sumrall T. S. Large-scale fragment impact sensitivity test results of a melt castable, general purpose, insensitive high explosive // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1999. V. 24. P. 30–36.

16. **Held M.** Protective Arrangement Against Projectiles, Particularly Hollow Explosive Charges / US patent. N 4,368,660. 1983.
17. **Held M., Maysless M., Rototaev E.** Explosive reactive armour // 17th Intern. Symp. on Ballistics / C. V. Niekerk (Ed). Midrand, South Africa, 1998. P. 33–46.
18. **Boslough M. B., Asay J. R.** Basic principles of shock compression // High-Pressure Shock Compression of Solids / J. R. Asay, M. Shahinpoor (Eds). New York: Springer-Verlag, 1993. P. 7–42.
19. **Meyers M. A.** Dynamic Behaviour of Materials. New York: John Wiley and Sons, Inc. 1994.
20. **Johansson C. H., Persson P. A.** Detonics of High Explosive. London: Academic Press, 1970.
21. **Langer G., Eisenreich N.** Hot spots in energetic materials // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1999. V. 24. P. 113–118.
22. **Mader C. L.** Numerical Modelling of Explosives and Propellants, 2nd edition. New York: CRC Press, 1998.
23. **Howe P., Frey R., Taylor B., Boyle V.** Shock initiation and critical area concept // Proc. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, ACR-221, Arlington, Virginia, 1976. P. 11–19.
24. **Cooper P. W., Kurowski S. R.** Introduction to the Technology of Explosive. New York: VCH Publishers Inc., 1996.
25. **Mader C. L., Forest C. A.** Two-Dimensional Homogeneous and Heterogeneous Detonation Wave Propagation. Los Alamos Scientific Laboratory Report No. LA-6259. Los Alamos, New Mexico, 1976.
26. **Ramsay J. B., Popolato A.** Analysis of shock wave and initiation data for solid explosives // Proc. Fourth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, Arlington, Virginia, 1965. P. 233–238.
27. **Lee E. L., Tarver C. M.** Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids. 1980. V. 23. P. 2362–2372.
28. **James H. R., Lambourn B. D.** A continuum based reaction growth model for the shock initiation of explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2001. V. 26, P. 246–256.
29. **Leiber C.-O.** Physical model of explosion phenomena — physical substantiation of Kamlet's complaint // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2001. V. 26. P. 302–310.
30. **Lundstrom E. A.** Evaluation of Forest Fire Burn Model of Reaction Kinetics of Heterogeneous Explosives. Naval Weapons Center Report No. NWC-TP-6898. China Lake, CA, 1988.
31. **Bakken L. H., Anderson P. D.** An Equation of State Handbook. Sandia National Laboratory Report No. SCL-DR-68-123, Albuquerque, NM, 1969.
32. **Lee E. L., Finger M., Collins W.** JWL Equation of State Coefficients for High Explosives. Lawrence Radiation Laboratory Report No. UCID-16189, University of California, Livermore, California, 1973.

*Поступила в редакцию 29/VII 2002 г.*