

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРЕГУЛЯРНОГО ОТРАЖЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН КАК ВЕДУЩЕГО ФАКТОРА В ИНИЦИИРОВАНИИ ЗАРЯДА ВВ ПОТОКОМ ПОРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**М.В. Маркова, В.С. Соловьев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
e-mail: marjamarkova@list.ru

*Проведено обширное численное моделирование воздействия пары высокоскоростных поражающих элементов на открытый заряд ВВ. Описаны характерные особенности протекания ударно-волновых процессов, порождаемых взаимодействием вызванных поражающими элементами ударных волн в толще заряда. Показано, как могут быть связаны геометрические параметры данных процессов с переходом к детонации.*

**Ключевые слова:** поток поражающих элементов, взаимодействие ударных волн в твердом теле, численное моделирование.

## **NUMERICAL MODELING OF IRREGULAR SHOCK WAVE REFLECTION AS THE PRIMARY AGENT BEHIND DETONATION INITIATION IN AN EXPLOSIVE CHARGE SUBJECTED TO MULTIPLE HIGH-SPEED PROJECTILE IMPACT**

**M.V. Markova, V.S. Soloviev**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
e-mail: marjamarkova@list.ru

*The extensive numerical modeling of impact of a pair of high-speed projectiles upon an uncovered explosive charge is carried out. Specific features of shock wave processes caused by the interaction of the shock waves (generated by the high-speed projectiles) in the bulk of the explosive charge are described. A possible connection between geometric parameters of the processes and transition to detonation is outlined.*

**Keywords:** multiple projectile impact, shock wave interaction in solids, numerical modeling.

Для изделий, содержащих крупногабаритные заряды ВВ и отличающихся высоким коэффициентом наполнения по сравнению с малокалиберными боеприпасами, повышается вероятность оказаться под одновременным воздействием нескольких высокоскоростных поражающих элементов (ПЭ). Хотя уже созданы методики и критерии оценки возбуждения высокоскоростным ПЭ детонации и других процессов в толще заряда, большинство из них создавались для случая взаимодействия заряда с единичным ПЭ. В случае же поражения потоком ПЭ может наблюдаться взаимодействие ударных волн, вызванных каждым из ПЭ, что влияет на инициирующую способность поражающего фактора. До сегодняшнего дня проводилось крайне мало систематических исследований данного явления.

Среди работ, посвященных закономерностям взаимодействия одиночного ПЭ с ВВ и созданию критериев инициирования ВВ,

важное место занимают исследования российских ученых В.А. Пырьева и И.Ф. Кобылкина (воздействие на заряд кумулятивной струи) [1, 2].

Работы по изучению инициирования двумя ПЭ стали публиковаться зарубежными учеными в конце 90-х годов прошлого века [3–5]. В основном они посвящены модифицированию уравнения Джейкобса–Рослунда, используемого в вооруженных силах США для оценки критической скорости инициирования БП, для определенных частных случаев, откуда следует, что полученные зависимости применимы лишь в узком диапазоне управляющих параметров.

Таким образом, представляется возможным очертить круг вопросов, слабо освещенных в литературе, которые в первую очередь будут связаны не столько с определением конкретных критических скоростей и параметров ПЭ, сколько с изучением физического процесса взаимодействия ударных волн в заряде ВВ, на основе чего в дальнейшем будут строиться исследования критериев инициирования ВВ потоком ПЭ.

Все упомянутые зарубежные исследования проводились с применением методов численного моделирования, которое, в отличие от натурных экспериментов, позволяет повторять эксперимент многократно с минимальными финансовыми затратами, тонко варьировать параметры эксперимента, а также получать подробную информацию о состоянии ВВ в любой точке в каждый момент времени.

Основным инструментом данного исследования является пакет ANSYS AUTODYN, хорошо зарекомендовавший себя при решении подобных задач. При использовании конечно-разностных алгоритмов численно моделируются: ПЭ сферической формы массой  $m = 8$  г, диаметром  $d = 12,6$  мм из стали плотностью  $\rho_{ст} = 7,860$  г/см<sup>3</sup>, описываемый УРС Ми–Грюнайзена и моделью текучести Джонсона–Кука; заряд ВВ размером 30 см на 15 или 20 см, материал – распространенное за рубежом ВВ октол 70/30 плотностью  $\rho_{ВВ} = 1,804$  г/см<sup>3</sup>, описываемый кинетикой разложения ВВ Ли–Тарвера, в которой применяются два УРС: для непрореагировавшего ВВ – УРС Ми–Грюнайзена, основанное на ударной адиабате; для продуктов детонации – УРС JWL. Все элементы представлены в лагранжевых координатах.

Для адекватного моделирования поведения реагирующей среды необходимо установить значение предела текучести  $Y$ . Из амплитуды упругого предвестника в монокристаллах октогена  $Y = 260$  МПа [6]; для насыпного октогена наилучшее согласование численного моделирования с экспериментом по амплитуде волны получается при  $Y = 100$  МПа, но завышение его до 300 МПа не изменяет картины кардинально [7]. Таким образом, можно предположить, что

$Y = 200$  МПа, как в расчетах [8] (значение, рекомендуемое также документацией AUTODYN [9]), даст вполне реалистичные результаты.

Задача решается в двумерном приближении, поскольку для определения влияния изменения различных параметров ПЭ (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. Наиболее адекватна осесимметричная постановка двумерной задачи, моделирующая соударение единичного шарообразного ПЭ с цилиндрическим зарядом ВВ. Однако в случае нескольких (двух) ПЭ осесимметричная постановка задачи теряет всякий смысл. В рамках двумерного описания остается вариант с плоскостной симметрией, когда на заряд ВВ по своим образующим (в проекции на плоскость сечения вырождающимся в точку) воздействуют два цилиндра условно бесконечной длины. Ранее было показано, как именно данный переход влияет на количественные результаты по определению критической скорости: в случае плоскостной симметрии критическая скорость инициирования в 1,5 раза ниже, чем для осевой, что объясняется различиями в физике проникания, а не небольшой разностью масс фактически моделируемого ударника [10]. Также было показано приемлемое совпадение результатов двумерных и трехмерных расчетов [11].

В ходе исследования были рассмотрены случаи одновременного и разновременного соударения ПЭ с зарядом. Путем варьирования скорости элемента были определены критические величины, при которых в заряде конечной длины гарантированно возникает детонация. За критическую скорость принималась впервые достигнутая при последовательном увеличении на определенную величину такая скорость, при которой наблюдается выраженный переход к детонации. Возникновение детонации в ВВ учитывалось при достижении характерных значений давления детонации и скорости фронта образующейся детонационной волны, а также согласно тому, что параметр  $F$ , характеризующий в модели Ли–Тарвера полноту протекания реакции (отношение массы перешедшего в газообразное состояние ВВ к полной массе ВВ), принимал значение единицы.

При исследовании влияния расстояния между ПЭ на возбуждение детонации в заряде представляется целесообразным для поиска предельных значений разнесения рассматривать скорость ПЭ, наибольшую из тех, которые не вызывали детонации в случае единичного ПЭ, а именно 1020 м/с.

Обнаружено, что вплоть до расстояния  $2a$  между точками соударения ПЭ, превышающего 18 диаметров ПЭ, второй ПЭ оказывает влияние на критическую скорость инициирования ВВ, а именно: на достаточно большой глубине детонация возникает при меньшей скорости, чем в случае единичного ПЭ, в точке взаимодействия фронтов УВ. В первом приближении можно сказать, что чем меньше расстояние между точками соударения, тем меньше скорость ПЭ, приводящая к появлению детонации; однако наблюдаются некоторые флуктуации скорости и, в особенности, глубины  $l$  и времени  $t$  возникновения детонации (табл. 1).

Данные флуктуации связаны с реализацией численного алгоритма и порождены различной реакцией моделируемой среды на воздействие ПЭ в зависимости от координаты точки соударения ПЭ с зарядом ВВ, выраженной в долях ячейки расчетной сетки. Как показывают дополнительные тестовые расчеты, результаты которых приведены в табл. 2, в случае двух ПЭ модель среды наиболее восприимчива к точечному воздействию ПЭ в районе середины ячейки расчетной сетки. Так, в случае  $2a = 9d$  смещение точек соударения от центральной оси на половину шага сетки, равного приблизительно 0,0667 см, снижает время перехода к детонации с 87 до 58,5 мкс. В обратном случае, смещение на полшага к центральной оси при  $2a = 10d$  приводит к тому, что переход к детонации, ранее наблюдавшийся при  $t = 57,41$  мкс, не происходит в течение 100 мкс.

После определения критической скорости ПЭ для каждого расстояния между ними будем изменять при этой скорости временной промежуток между соударениями (скорости ПЭ остаются постоянными и равными). Для этого один ПЭ отодвигается от заряда на соответствующее расстояние.

Стоит вначале отметить следующее: в данном численном эксперименте, когда УВ от второго ПЭ проходит по ВВ, сжатому УВ от первого ПЭ, при достаточной скорости ПЭ детонация возникает при практически любом временном промежутке между соударениями, сразу же при попадании ПЭ в заряд. Это, видимо, противоречит приведенным в работе [12] экспериментальным данным об ударно-волновой десенсибилизации ВВ, но объясняется ограничениями использованной математической модели инициирования ВВ Ли–Тарвера. Таким образом, мы исключаем эти случаи из рассмотрения.

При скорости ПЭ  $v = 1000$  м/с была рассмотрена матрица вариантов от одновременного соударения до промежутка между ними в 10 мкс (плюс несколько дополнительных расчетов для 11 и 15 мкс) для расстояний между точками соударения от 1 до 10 диаметров ПЭ,

Результаты численного моделирования взаимодействия ПЭ с зарядом октола 70/30  
в плоскостной симметрии

Отношение расстояния $2a$ между точками соударения ПЭ с зарядом ВВ к диаметру ПЭ $d$ (единичный ПЭ)	$v_{\text{крит}}, \text{ м/с}$	Координата точки соударения $a/s$ , где $s$ — ширина ячейки расчетной сетки	$l, \text{ см}$	$t, \text{ мкс}$	Скорость ПЭ, при которой наблюда- лся отказ, м/с
1	1030	9,45	11,5	38,5	1020
2	550	9,45	10	36,59	545
3	870	18,9	13,5	46,59	860
4	920	28,35	12,5	42,48	910
5	960	37,8	16	55,58	950
6	980	47,25	15,3	53,6	970
7	980	56,7	15	52,54	970
8	990	66,15	16	57,15	980
9	1000	75,6	13	47,79	990
10	1000	85,05	23,5	87	990
11	1000	94,5	15,5	57,41	990
12	1010	103,95	22	79,5	1000
13	1010	113,4	20,5	75,68	1000
14	1020	122,85	16,3	62,5	1010
15	1020	132,3	16	63,5	1010
16	1020	141,75	19,7	76	1010
17	1020	151,2	22,7	86,51	1010
18	1020	160,65	21,3	84	1010
19	1030	170,1	—	—	1020
20	1020	179,55	19,3	82	1010
	1030	189			1020

и установлено, что инициирование ВВ (за вычетом описанных случаев попадания ПЭ в предварительно сжатую область, отмеченных в табл. 3 косым крестом) происходит и при максимальных значениях обоих параметров (см. табл. 3). Для этих вариантов 1000 м/с больше критической скорости для одновременного соударения двух ПЭ.

Вторая серия испытаний, результаты которых представлены в табл. 4, была проведена для ПЭ, летящих с критической скоростью возбуждения детонации, характерной для расстояния  $2a$  от  $1d$  до  $11d$ , с промежутками между соударениями от 1 до 10 мкс.

Из совокупности результатов можно сделать вывод, что в большинстве случаев для расстояния между точками соударения ПЭ  $2a < 11d$ ,

Таблица 2

**Влияние относительного расположения расчетных сеток в начальный момент времени на возникновение детонации**

Отношение расстояния $2a$ между точками соударения ПЭ с зарядом ВВ к диаметру ПЭ $d$	$v_{\text{крит}}$ , м/с	Координата точки соударения $a/s$ , где $s$ — ширина ячейки расчетной сетки	$l$ , см	$t$ , мкс
9	1000	85,05	23,5	87
9	1000	85,05+0,25	16,3	66
9	1000	85,05+0,5	16,0	58,5
9	1000	85,05+0,75	20,8	75,7
10	1000	94,5	15,5	57,41
10	1000	94,5 – 0,5	—	Не наблюдается в течение 100 мкс
11	1010	103,95	22	79,5
11	1010	103,95+0,5	14,7	55,5

Таблица 3

**Наличие (+) или отсутствие (–) детонации в численном эксперименте в зависимости от временного промежутка и расстояния между точками соударения ПЭ при скорости ПЭ 1000 м/с**

Отношение расстояния $2a$ между точками соударения ПЭ с зарядом ВВ к диаметру ПЭ $d$	Временной промежуток между соударениями $\Delta t$ , мкс											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15
1	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–		
2				+	+	+	+	+	+	×		
3				+	+	+	+	+		+		×
4				+	+	+	+	+	+		+	+
5				+	+	+	+	+	+		+	+
6				+	+	+	+	+	+		+	+
7				+	+	+	+	+		+		+
8				+	+	+	+	+		+	+	
10							+			+		

**Наличие (+) или отсутствие (-) детонации в численном эксперименте в зависимости от временного промежутка и расстояния между точками соударения ПЭ при скорости ПЭ, равной критической скорости для одновременного соударения ПЭ с зарядом ВВ**

Отношение расстояния $2a$ между точками соударения ПЭ с зарядом ВВ к диаметру ПЭ $d$	Временной промежуток между соударениями $\Delta t$ , мкс									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$1d$	+	+	+	x	x	x	x	x	x	x
$2d$	+	+	+	+	+	+	+	x	x	x
$3d$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$4d$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$5d$										+
$7d$										+
$8d$				+	+	+	+	+		+
$10d$							+			+
$11d$	-				-	-	-	-		-

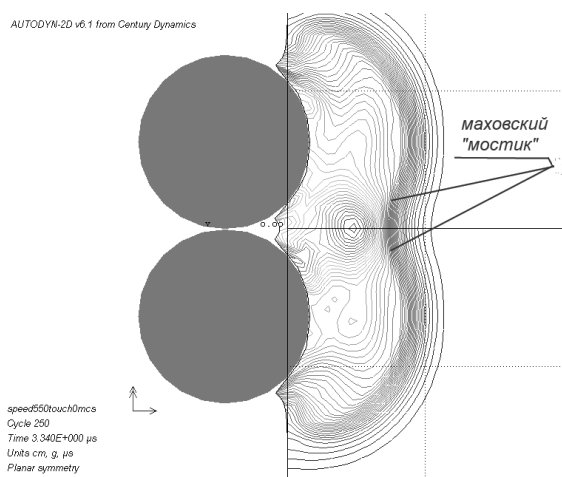
если скорость разновременного соударения ПЭ больше или равна критической скорости для одновременного соударения двух ПЭ, то даже при временном промежутке между соударениями около 10 мкс инициирование произойдет.

Переход УВ в детонационную происходит не случайно: точка возникновения детонации располагается на линии перемещения точки контакта фронтов УВ, вызванных соударениями ПЭ с зарядом.

Рассмотрим особенности картины ударно-волнового взаимодействия. Во-первых, следует отметить быстрый переход к нерегулярному отражению: например, уже при одновременном соударении ПЭ вплотную друг к другу (когда расстояние между точками соударения  $2a = 1d$ ) со скоростью 500 м/с при  $t = 3,34$  мкс наблюдается маховский “мостик” (рис. 1). Благодаря взаимодействию волн критическая скорость для двух ПЭ не равна критической скорости одного ПЭ удвоенной массы (550 м/с против более 700 м/с).

В работе [13] показано, что применение кинетики Ли–Тарвера для расчета взаимодействия УВ, порождающих зону нерегулярного отражения, дает хорошее согласование с экспериментом.

Именно нерегулярное отражение позволяет давлению в зоне взаимодействия волн расти и вызывать разложение ВВ, переходящее в детонацию, в то время как УВ, порожденные ПЭ, затухают с течением времени. На рис. 2 и 3 показаны значения амплитуды падающей волны и отношения амплитуд отраженной и падающей волн от времени для двух случаев расстояния между ПЭ. Амплитуда падающей волны

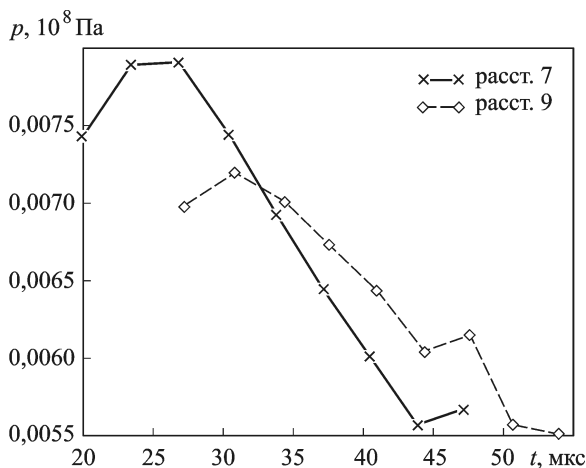


**Рис. 1. Нерегулярное отражение УВ**

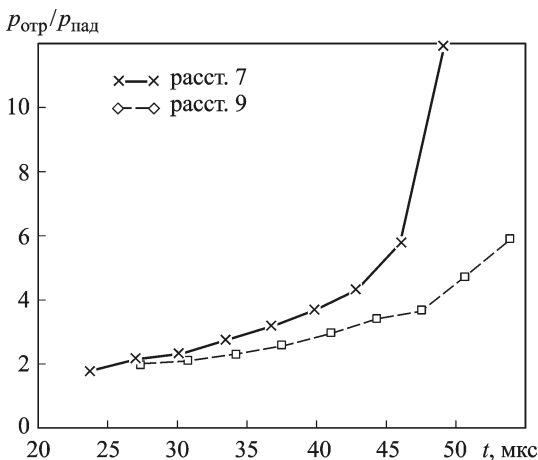
измеряется не вдоль оси внедрения ПЭ, а максимально близко к зоне взаимодействия, поскольку движение ПЭ, дополнительно сжимающего перед собой среду, вызывает “накачку” волны по оси внедрения ПЭ.

Во-вторых, можно выделить два типа развития ударно-волнового комплекса. На рис. 4 представлен переход к детонации при расстоянии между точками соударения ПЭ, равном 6 и 9 диаметрам ПЭ; если расстояние между ПЭ меньше или равно 6 его диаметрам, то образованная маховским “мостиком” УВ быстро набирает скорость относительно первичных (порожденных действием ПЭ) волн, а ее фронт заметно искривляется. Первичные волны в сравнении с ней затухают быстро. В случае большего расстояния между точками соударения ПЭ маховская волна дольше сохраняет относительную прямолинейность фронта, а первичные волны теряют меньше энергии (иными словами, при малых расстояниях волна быстрее уподобляется волне от единого источника).

**Рис. 2. Зависимость давления в падающей волне от времени для расстояний между точками соударения ПЭ с зарядом в 7 и 9 диаметров ПЭ при скорости ПЭ  $v = 1000$  м/с**







**Рис. 3.** Зависимость отношения давлений в отраженной и падающей волнах от времени для расстояний между точками соударения ПЭ с зарядом в 7 и 9 диаметров ПЭ при скорости ПЭ  $v = 1000$  м/с

Далее при увеличении расстояния между ПЭ наблюдается картина, подобная приведенной на рис. 5 и 6. Структура УВ становится видимо сложной, сочетающей пластическую волну и упругий предвестник [12]. Эти наблюдения также согласуются с результатами, полученными экспериментально для гранулированного октогена [14] и инертного аналога октогена (сахара) [15]. Отражение претерпевают все компоненты волны.

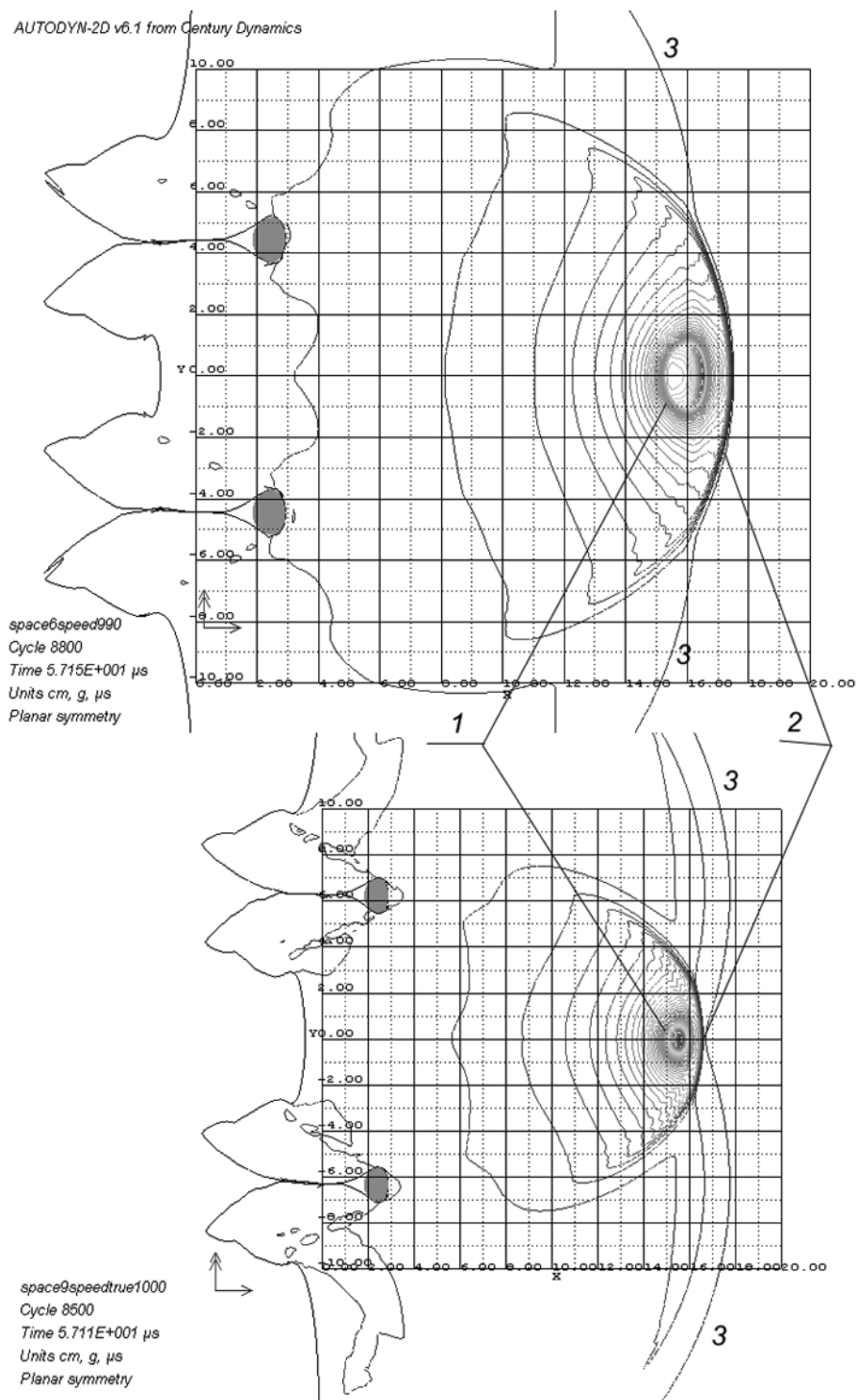
Хотя видимое влияние на форму фронта УВ оказывает движение среды, вызванное внедрением еще не окончательно затормозившего ПЭ, продолжающего свое движение, возможно представить идеальный фронт двумерной УВ окружностью с центром в точке соударения ПЭ с ВВ. Взаимное отражение волн можно рассматривать как отражение волны от жесткой стенки, расположенной по касательной к линии перемещения точки контакта фронтов взаимодействующих волн.

Чтобы получить уравнение движения точки пересечения фронтов основных УВ, требуется выразить  $D$  от времени, установив зависимость от времени изменения массовой скорости на фронте волны  $u(t)$  [16].

Запишем в общем случае точное теоретическое уравнение для движения точки контакта фронтов:

$$x = \frac{\left( \int_0^t D(t) dt \right)^2 - \left( \int_{\Delta t}^t D(t - \Delta t) dt \right)^2}{-4a},$$

$$y = \sqrt{\left| \left( \int_0^t D(t) dt \right)^2 - \left( \frac{\left( \int_0^t D(t) dt \right)^2 - \left( \int_{\Delta t}^t D(t - \Delta t) dt \right)^2 + 4a^2}{4a} \right)^2 \right|},$$



**Рис. 4.** Картина перехода к детонации при расстоянии между точками соударения ПЭ, равном:

*a* – 6 ( $t = 57,15$  мкс) и *b* – 9 ( $t = 57,11$  мкс) диаметрам ПЭ, для скорости ПЭ  $v = 1000$  м/с; 1 – детонационная волна; 2 – маховская волна; 3 – первичные УВ

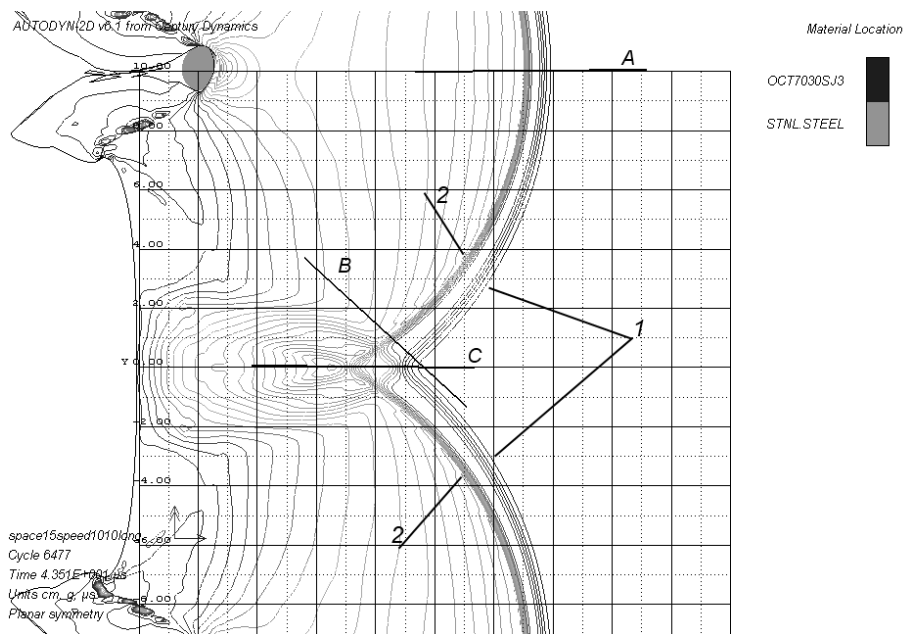


Рис. 5. Взаимодействие УВ при  $t = 43,51$  мкс и расстоянии между точками соударения ПЭ, равном 15 диаметрам ПЭ при скорости ПЭ  $v = 1010$  м/с: 1 – упругий предвестник; 2 – пластические волны

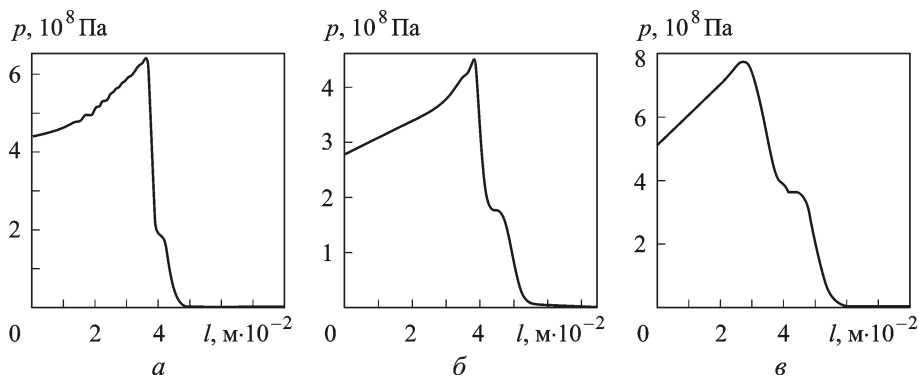


Рис. 6. Профили давлений для  $t = 43,51$  мкс и расстояния между точками соударения ПЭ, равного 15 диаметрам ПЭ при скорости ПЭ  $v = 1010$  м/с

где  $x, y$  — координаты;  $t$  — время;  $a$  — расстояние от начала координат до места соударения ПЭ с зарядом;  $D$  — скорость фронта волны;  $\Delta t$  — промежуток времени между соударениями ПЭ с ВВ.

Приведенное выражение имеет физический смысл при  $t \geq t_{\text{встр}}$ , где  $t_{\text{встр}}$  — момент встречи фронтов УВ. Этот момент определяется из уравнения

$$\int_0^{t_{\text{встр}}} D(t)dt + \int_{\Delta t}^{t_{\text{встр}}} D(t - \Delta t) dt = 2a.$$

Имея уравнение линии перемещения точки контакта фронтов волн, можно для любого момента времени  $t_0 > t_{\text{встр}}$  построить “жесткую стенку” — искомую касательную к данной линии в соответствующей точке и получить значения углов отражения УВ друг от друга, для чего необходимо также построить касательные к фронтам волн в данной точке.

Угловой коэффициент касательной к линии перемещения точки контакта равен

$$k_1 = f'(x_0) = \frac{y'_t(t_0)}{x'_t(t_0)}.$$

Угловой коэффициент касательной к окружности идеального фронта УВ равен  $k_2 = \frac{-(x_0 + a)}{y_0}$ , где  $x_0, y_0$  — координаты точки контакта фронтов.

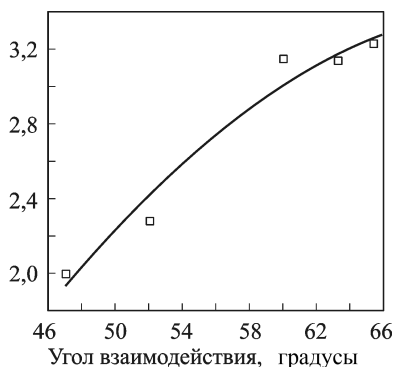
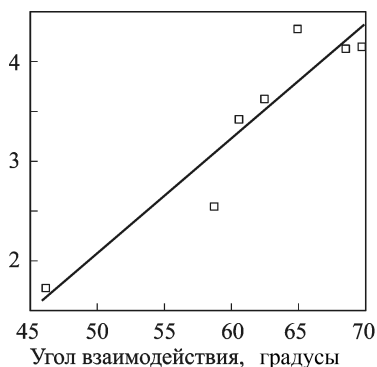
Отсюда можно найти тангенс угла взаимодействия волн — угла между двумя прямыми:

$$\text{tg } \theta = \frac{k_1 - k_2}{1 + k_2 k_1}.$$

Данный угол взаимодействия назовем “виртуальным”, поскольку строгий геометрический смысл он имеет лишь в случае идеального фронта УВ, а также при отсутствии перехода к нерегулярному отражению. Тем не менее, покажем, что данный угол может служить важной характеристикой системы “заряд–два ПЭ”.

Обработав, согласно полученной модели, результаты численного эксперимента, получаем зависимости роста давления в зоне взаимодействия волн от угла взаимодействия, представленные на рис. 7 для двух амплитуд падающей волны. С увеличением угла коэффициент отражения растет.

Рассмотрим виртуальные углы взаимодействия волн при  $2a = 1d$  (табл. 5): углы взаимодействия очевидно больше в случаях, где есть детонация. Таким образом, поскольку коэффициент отражения связан со значением угла взаимодействия, можно заключить, что чем больше



**Рис. 7. Коэффициент усиления амплитуды волн в зоне взаимодействия в зависимости от виртуального угла взаимодействия волн:**

*a* –  $p_{\text{пад}} = 6 \cdot 10^8$  Па; *б* –  $p_{\text{пад}} = 7 \cdot 10^8$  Па

Таблица 5

**Виртуальные углы взаимодействия ударных волн при  $t = 4 \dots 25$  мкс как индикатор вероятности перехода к детонации для  $2a = d$**

$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$	$\Delta t = 4$
Переход к детонации			
да	да	да	нет
65,1°	50,2°	33,0°	—
66,2°	51,6°	34,7°	5,4°
67,2°	52,7°	36,1°	6,6°
68,0°	53,7°	37,4°	10,8°
68,7°	54,6°	38,6°	13,7°
69,3°	55,4°	39°	16,0°
69,8°	56,1°	40,5°	17,9°
70,3°	56,7°	41,3°	19,5°
70,8°	57,3°	42,1°	20,9°
71,2°	57,8°	42,8°	22,1°
71,5°	58,3°	43,4°	23,2°
71,9°	58,6°	44,0°	24°
72°	59,1°	44,5°	25,1°
72,4°	59,4°	44,9°	25,8°
72,7°	59,7°	45,4°	26,6°
72,9°	60,1°	45,8°	27,2°

виртуальный угол взаимодействия для сравнимых амплитуд падающей волны, тем вероятнее произойдет переход к детонации.

Данные выводы можно учитывать при оценке эффективности и безопасности как существующих, так и разрабатываемых средств поражения и боеприпасов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пырьев В.А., Соловьев В.С. Механизмы инициирования при простреле энергетических материалов, заключенных в оболочку // Методические указания по проблемам эффективности вооружений: сб. трудов. Вып. № 6. М.: Российская инженерная академия наук, секция “Инженерные проблемы стабильности и конверсии”, 1998.

2. *Кобылкин И.Ф.* Возбуждение взрывных процессов при проникании высокоскоростных металлических кумулятивных струй в заряды ВВ // Оборонная техника. 1994. № 1–2. С. 45–52.
3. *Kuhns L., Wilson L.T.* Determining detonation threshold for multiple fragment impacts. URL: <http://sherpa.sandia.gov/9231home/pdfpapers/LTWilson.pdf>
4. *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.
5. *Vlad Georgevich, Philip Pincosy, Jay Chase.* High explosive detonation threshold sensitivity due to multiple fragment impacts // 21st International Symposium on Ballistics, 2004.
6. *Ralph Menikoff & Thomas D Sewell* (2002): Constituent properties of HMX needed for mesoscale simulations, *Combustion Theory and Modelling*, 6:1, 103–125.
7. *Ralph Menikoff* // Compaction wave profiles: Simulations of gas gun experiments. *J. Appl. Phys.* 90, 1754 (2001); doi: 10.1063/1.1385568
8. *Doolan C.J.* A Microstructure dependent reactive flow model for heterogeneous energetic materials. Technical Report. Systems Sciences Laboratory, Australia. February 2003. URL: <http://www.dsto.defence.gov.au/corporate/reports/DSTO-TR-1383.pdf>
9. *Autodyn*: Explosive initiation users manual (Lee-Tarver ignition and growth). Century Dynamics, 2005.
10. *Маркова М.В., Соловьев В.С.* Постановка численного эксперимента для изучения воздействия потока поражающих элементов на заряд взрывчатого вещества // Наука и образование: электронное науч.-техн. издание, 2012, 3. [электронный ресурс] <http://technomag.edu.ru/doc/330645.html>
11. *Соловьев В.С., Маркова М.В., Марков И.В.* Прогнозирование критической инициирующей скорости ударника с помощью пакета прикладных программ AUTODYN // Сб. трудов третьей Всерос. конф. молодых ученых и специалистов “Будущее машиностроения России”. Москва, 22–25 сентября 2010 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 208.
12. *Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н.* Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Физматлит, 2004. 376 с.
13. *Craig M. Tarver, Paul A. Urtiew, and William C. Tao.* Effects of tandem and colliding shock waves on the initiation of triaminotrinitrobenzene // *J. Appl. Phys.* 78, 3089 (1995); doi: 10.1063/1.360061.
14. *Keith A. Gonthier.* Predictions for weak mechanical ignition of strain hardened granular explosive // *J. Appl. Phys.* 95, 3482 (2004); doi: 10.1063/1.1650884.
15. *Wayne M. Trott, Melvin R. Baer, Jaime N. Castaneda, Lalit C. Chhabildas, and James R. Asay.* Investigation of the mesoscopic scale response of low-density pressings of granular sugar under impact // *J. Appl. Phys.* 101, 024917 (2007); doi: 10.1063/1.2427093.
16. *Маркова М.В., Соловьев В.С.* Учет неодновременности соударения поражающих элементов с зарядом взрывчатого вещества // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. Вып. 1–2. С. 36–40.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012