

УДК 544.45

DOI: 10.15372/PMTF202315283

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ КОЛЬЦЕВЫМ СОСТАВНЫМ ЗАРЯДОМ

Ц.-Б. Ли, В.-Б. Ли, С.-М. Ван

Нанкинский университет науки и технологий, Нанкин, Китай

E-mails: 13182990306@163.com, njustlwb@163.com, 202xm@163.com

Исследуются характеристики ударной волны, генерируемой зарядом, состоящим из внутреннего слоя фугасного взрывчатого вещества, среднего слоя недетонирующего материала и внешнего слоя алюминизированного взрывчатого вещества. Изучено влияние наличия оболочки и режимов инициирования заряда на максимальные избыточное давление и импульс заряда. С использованием программы AUTODYN разработан численный метод вычисления пространственного распределения избыточного давления ударной волны. Показано, что различие результатов численных расчетов, полученных с использованием предложенного метода, и экспериментальных данных не превышает 16,9 %. С увеличением расстояния от заряда различие значений избыточного давления на различных азимутах уменьшается. По мере удаления от центра заряда профиль ударной волны приобретает сферическую форму. Установлено, что избыточное давление составного заряда с оболочкой в радиальном направлении больше, чем в осевом направлении, и быстро уменьшается с увеличением расстояния. Азимут, соответствующий максимальному избыточному давлению для заряда без оболочки, равен  $75^\circ$ , для заряда с оболочкой —  $110^\circ$ . Показано, что энергия составного заряда при инициировании внутреннего слоя меньше, чем при одновременном инициировании внутреннего и внешнего слоев.

**Ключевые слова:** ударная волна, составной заряд, избыточное давление, импульс, эксперимент

**Введение.** Оценка динамической реакции конструкций, подвергающихся взрывным нагрузкам, зависит от точности определения их характеристик [1]. Современные рекомендации, в частности UFC 3-340-01 (USACE 2002) и UFC 3-40-02 (USACE 2014), обычно используются для оценки взрывных нагрузок, создаваемых сферическим зарядом. В последнее время разработан ряд усовершенствованных конструкций зарядов, характеристики взрывной нагрузки которых существенно отличаются от характеристик традиционных сферических и цилиндрических зарядов. Широко используется многослойный кольцевой заряд [2–4], состоящий из различных слоев взрывчатых веществ (ВВ) с различной скоростью детонации и слоя недетонирующего материала, при наличии которого уменьшается или увеличивается энергия детонации. Для получения различных значений выходной энергии используется заряд с различными режимами инициирования. Результаты исследования характеристик взрывной волны комбинированного заряда могут быть использованы для прогнозирования взрывных нагрузок боевого заряда.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11972018) и Китайского фонда поддержки постдокторов (грант № 2021M701710).

© Ли Ц.-Б., Ли В.-Б., Ван С.-М., 2024

Распределение взрывной нагрузки составного заряда имеет более сложный характер, чем распределение взрывной нагрузки одиночного заряда, а наличие слоя недетонирующего материала может оказывать существенное влияние на взрывные характеристики составного заряда. Использование в заряде инертного материала влияет на взаимодействие детонационных волн, генерируемых внутренним и внешним слоями ВВ, а применение химически активного материала позволяет увеличить тепловыделение заряда в результате реакции, происходящей при разлете ВВ, при этом компенсируются потери энергии, вызванные наличием слоя недетонирующего материала.

В работах [5, 6] исследовано влияние режимов инициирования на величину избыточного давления многослойного составного заряда и установлено, что максимальное значение избыточного давления достигается при одновременном инициировании внутреннего и внешнего слоев (далее — одновременное инициирование), промежуточное значение — при инициировании внешнего слоя и минимальное значение — при инициировании внутреннего слоя (далее — внутреннее инициирование). В [7] проведено сравнение мощности взрыва и осколков составного заряда, заключенного в спиральный и гибридный корпуса. Установлено, что для заряда в гибридном корпусе значения скорости осколков и избыточного давления при различных режимах инициирования существенно различаются.

С появлением доступных программных пакетов (AUTODYN, LS-DYNA), позволяющих выполнять численное моделирование, проведены исследования характеристик взрыва сферических и цилиндрических зарядов [8–14], в том числе пространственного распределения избыточного давления ударной волны по различным азимутам [8] и на различных расстояниях от взрыва [10], влияния геометрии заряда [11], режимов инициирования [12] и наличия оболочки на энерговыделение заряда [13, 14]. Для многослойного составного заряда масса ВВ и режим инициирования оказывают существенное влияние на процессы распространения детонационной волны и выделения энергии при детонации, от которых существенно зависит давление в ударной волне [15–17]. Ранее в основном исследовались характеристики составных зарядов с малым удлинением. Влияние различных ограничений и режимов инициирования на характеристики ударной волны исследовано недостаточно.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования характеристик ударной волны, создаваемой многослойным зарядом. Проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных.

**1. Численная модель.** На рис. 1 представлено поперечное сечение исследуемого составного заряда с оболочкой. Конструкция заряда включает внутренний слой ВВ (диаметр 30 мм, длина 200 мм), слой полимерного наполнителя (внутренний диаметр 30 мм, толщина 15 мм, длина 200 мм), внешний слой ВВ (диаметр 65 мм, толщина 15 мм, длина 200 мм), корпус из стали марки Ст. 45, представляющий собой цилиндрическую оболочку и две торцевые крышки. В соответствии с параметрами фугасной бомбы [18] толщина оболочки цилиндра принята равной 10 мм. Внутренний и внешний заряды представляют собой ВВ ЖН-2 (RDX (гексоген) — 95 %, DNT (динитротолуол) — 3 %, CZ (циркон) — 2 %) и алюминизированное ВВ (RDX (гексоген) — 76 %, Al — 20 %, wax (воск) — 4 %), которые были изготовлены методом прессования. Исследовались два режима инициирования: 1) детонация только внутреннего слоя ВВ (внутреннее инициирование); 2) детонация внутреннего и внешнего слоев ВВ (одновременное инициирование). Для исследования влияния структуры заряда было проведено моделирование одиночного цилиндрического тротилового заряда с одной и той же эквивалентной массой при двух режимах инициирования.

**1.1. Вычислительная модель и параметры материала.** Для исследования ударной волны, характеризующейся высокой частотой, узкой шириной импульса и быстрым затуханием, на этапе генерации ударной волны размер сетки был выбран достаточно мелким. Поскольку максимальное исследуемое расстояние от центра заряда составляет 4 м, исполь-

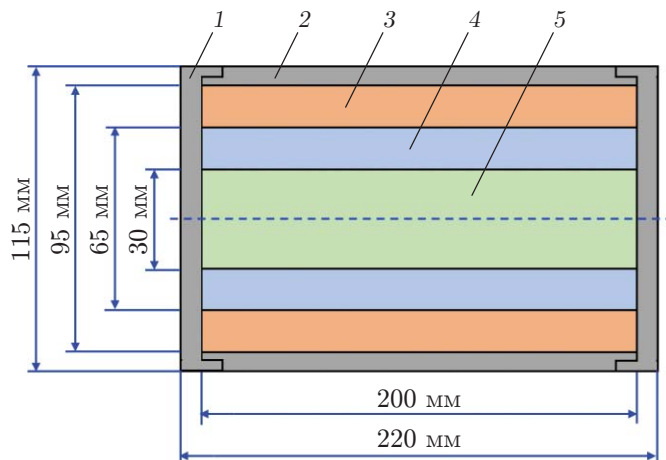


Рис. 1. Схема составного заряда с защитным слоем недетонирующего материала:  
1 — торцевая крышка, 2 — цилиндрическая оболочка, 3 — внешний слой ВВ, 4 — слой недетонирующего материала, 5 — внутренний слой ВВ

зование трехмерной модели не гарантирует точности расчетов. Поэтому была разработана двумерная модель распространения ударной волны с использованием программного пакета AUTODYN.

При исследовании распространения ударной волны на небольшом расстоянии от центра заряда решалась осесимметричная задача (рис. 2,а). С помощью решателя Эйлера — Годунова создавалась воздушная зона размером  $1,0 \times 0,5$  м, заполненная ВВ и недетонирующим материалом. На рис. 2,а плоскость  $y = 0$  является плоскостью симметрии. При моделировании предполагалось, что вне области  $x = 1$  м,  $y = 0,5$  м распространяется воздушная ударная волна.

При моделировании ударной волны на большом расстоянии от центра заряда рассматривалась область размером  $8 \times 4$  м (рис. 2,б). В этой области располагались 57 гауссовых точек на расстояниях 1, 2, 4 м от центра заряда. Азимут точек 38, 57 и 76 считался равным  $\alpha = 0^\circ$ , азимут остальных точек увеличивался в направлении против часовой стрелки с интервалом  $10^\circ$ .

Процесс моделирования включал два этапа (рис. 3). На первом этапе моделировались распространение взрывной детонационной волны и ее взаимодействие с оболочкой (см. рис. 3,а). Из результатов проведенных ранее экспериментов следует, что через 60 мкс с момента инициирования заряда оболочка полностью разрушается и не влияет на последующее распространение ударных волн. Начиная с этого момента влияние оболочки не учитывалось, а расчет завершался при достижении ударной волной границы расчетной области (см. рис. 3,б).

Затем с учетом результатов расчета, полученных на первом этапе, моделировалось распространение ударной волны на расстоянии от центра заряда  $R = 4$  м (см. рис. 3,в) и вычислялось избыточное давление в ударной волне, приходящей в различные гауссовы точки (см. рис. 3,г).

Для внутреннего и внешнего слоев ВВ необходимо использовать различные уравнения состояния в соответствии с режимом инициирования. Для описания детонации и реакции ВВ ЖН-2 использовалось уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли [16]

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega E_0}{\bar{V}}, \quad (1)$$

где  $p$  — давление в продуктах детонации;  $\bar{V} = \rho_0 / \rho_1$  — удельный объем;  $\rho_0, \rho_1$  — плот-

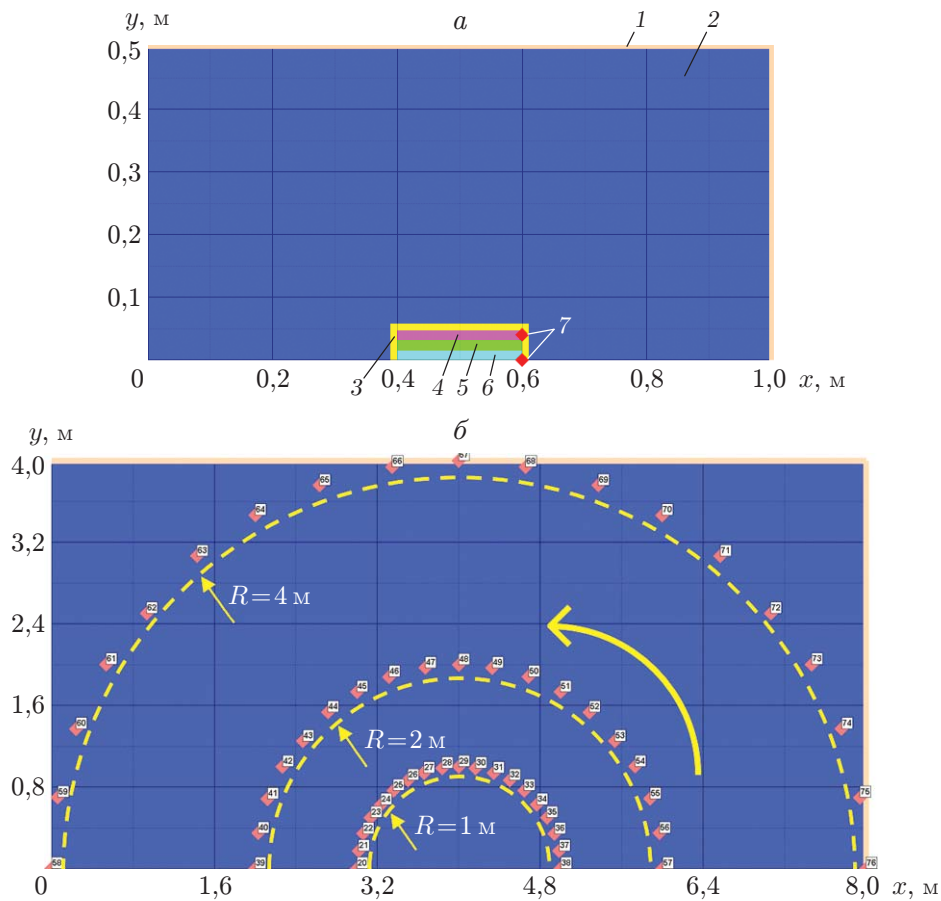


Рис. 2. Области моделирования ударной волны при ее распространении на различных расстояниях от точки инициирования заряда:

*a* — схема заряда и области распространения ударной волны, *б* — расположение гауссовых точек в расчетной области; 1 — вакуум, 2 — воздух, 3 — сталь марки Ст. 45, 4 — алюминизированное ВВ, 5 — полиуретан, 6 — ВВ ЖН-2, 7 — точки инициирования

ность ВВ и продуктов детонации соответственно;  $E_0$  — внутренняя энергия в единице объема;  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  — константы. Для описания реакции воспламенения алюминизированного ВВ используется уравнение состояния [17]

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^b \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1 - \lambda)^c \lambda^d \rho^y + G_2(1 - \lambda)^e \lambda^g \rho^z, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — химическая активность ВВ;  $t$  — время;  $I$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $g$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — константы. При одновременном инициировании обоих ВВ их поведение описывается уравнением Джонса — Уилкинса — Ли. Кроме того, для описания поведения полимера использовалось уравнение состояния, приведенное в работе [19], а для описания деформирования оболочки — модель Джонсона — Кука [20]. Значения констант, входящих в уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли, приведены в табл. 1 [17].

В уравнении (1) состояния для непрореагировавшего алюминизированного ВВ использовались следующие значения параметров:  $A = 40,66$  Мбар,  $B = -1,339$  Мбар,  $R_1 = 7,2$ ,  $R_2 = 3,6$ ,  $\omega = 0,9$ ,  $E_0 = 0,000\,91$  Гэрг/мм<sup>3</sup>.

В уравнении (2) при описании реакции воспламенения алюминизированного ВВ используемые параметры имели следующие значения:  $I = 7 \cdot 10^{11}$ ,  $b = 0,667$ ,  $a = 0$ ,  $x = 20$ ,  $G_1 = 6500$ ,  $c = 0,667$ ,  $d = 0,111$ ,  $y = 1$ ,  $G_2 = 200$ ,  $e = 0,333$ ,  $g = 1,0$ ,  $z = 3$ .

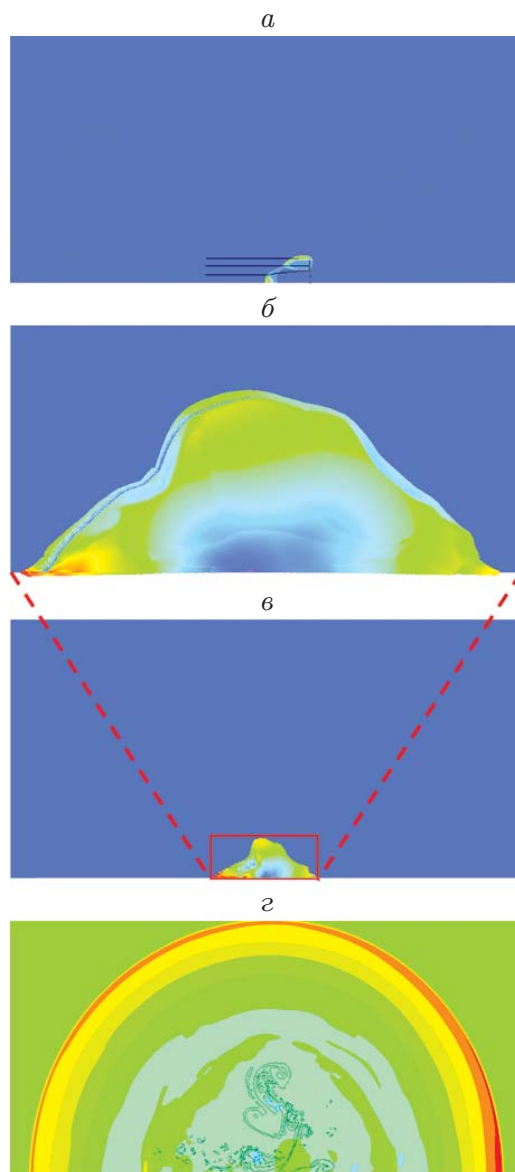


Рис. 3. Этапы моделирования распространения ударной волны:

*a* — распространение ударной волны на небольшом расстоянии от центра заряда, *б* — достижение ударной волной границы расчетной области, *в* — достижение ударной волной границы расчетной области (масштабирование), *г* — распространение ударной волны на большом расстоянии от центра заряда

Таблица 1

Значения параметров в уравнении состояния Джонса — Уилкинса — Ли

ВВ	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , м/с	$A$ , Мбар	$B$ , Мбар	$R_1$	$R_2$	$\omega$
ЛН-2	1,700	8425	8,524	0,1802	4,6	1,3	0,38
Алюминизированное	1,823	8270	7,520	0,1200	4,4	1,3	0,33

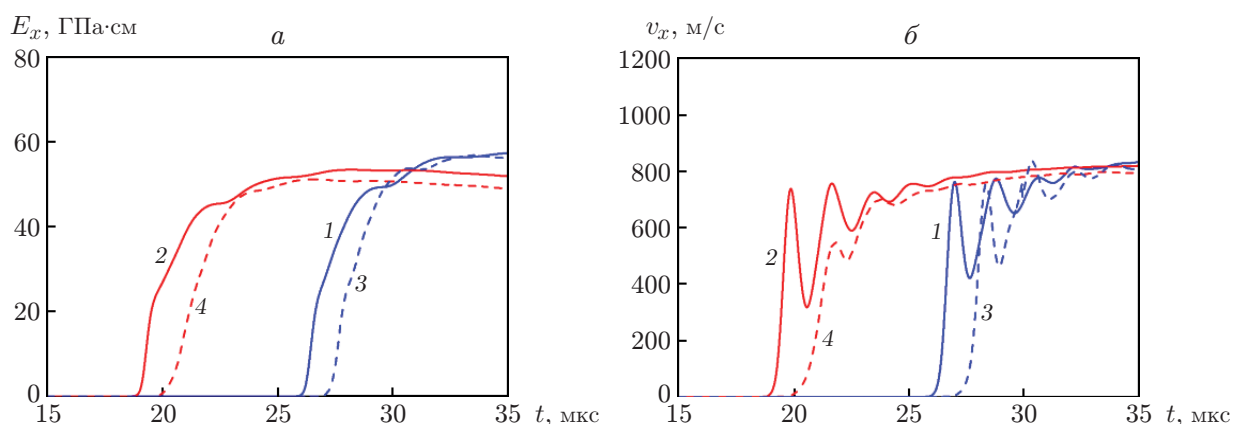


Рис. 4. Результаты расчета реакции оболочки, полученные с использованием двумерной (1, 2) и трехмерной (3, 4) моделей:

$a$  — работа ударной волны, затраченная на деформирование оболочки,  $b$  — скорость расширения оболочки; 1, 3 — первая гауссова точка, 2, 4 — вторая гауссова точка

При использовании двумерной модели для описания распространения взрывной ударной волны, создаваемой оболочечными составными зарядами, результаты расчетов могут не соответствовать реальному процессу, что в основном обусловлено моделированием разрушения оболочки. Поэтому для исследования влияния взаимодействия детонационной волны с оболочкой на формирование ударной волны в воздухе были разработаны двумерная и трехмерная модели, в которых размер ячейки расчетной сетки полагался равным 1 мм. Первая и вторая гауссовы точки выбраны на внутренней поверхности цилиндрической оболочки на расстояниях от торцевой крышки, равных 5 и 15 см соответственно. Различие значений работы  $E_x$ , затраченной на деформирование оболочки, и максимальной скорости ее расширения  $v_x$  составляет 5,8 и 3,2 % соответственно (рис. 4). Поведение кривых, полученных с использованием обеих моделей и приведенных на рис. 4, согласуется.

1.2. *Сходимость результатов численных расчетов, полученных с использованием сеток различного размера.* При моделировании распространения ударной волны использовались сетки с размерами ячеек  $l = 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$  мм. Полученные кривые избыточного давления при распространении ударной волны на небольшом расстоянии от центра заряда приведены на рис. 5,  $a$ .

Максимальные значения избыточного давления, вычисленные на сетках с размерами ячеек менее 1,0 мм, различались менее чем на 1,3 %. Поэтому сетки с размером ячеек 1 мм использовались при выполнении расчетов на следующем этапе. При моделировании распространения ударной волны на большом расстоянии от центра заряда использовались сетки с ячейками размером  $l = 5, 8, 10, 15, 20, 25$  мм. Полученные кривые избыточного давления приведены на рис. 5,  $b$ . Результаты численных расчетов, полученные на сетках с размером ячеек менее 10 мм, различаются менее чем на 1,2 %. Поэтому сетка с размером ячеек 10 мм использовалась в расчетах на данном этапе распространения ударной волны.

1.3. *Сравнение результатов численных расчетов и экспериментальных данных.* Проведены эксперименты по измерению избыточного давления при внутреннем и одновременном инициировании составного заряда.

На рис. 6 приведены зависимости избыточного давления от времени, полученные при численном моделировании и в эксперименте. Видно, что они хорошо согласуются. При внутреннем инициировании заряда время прихода ударной волны в различные точки, определенное в численных расчетах, незначительно меньше экспериментального. Это может

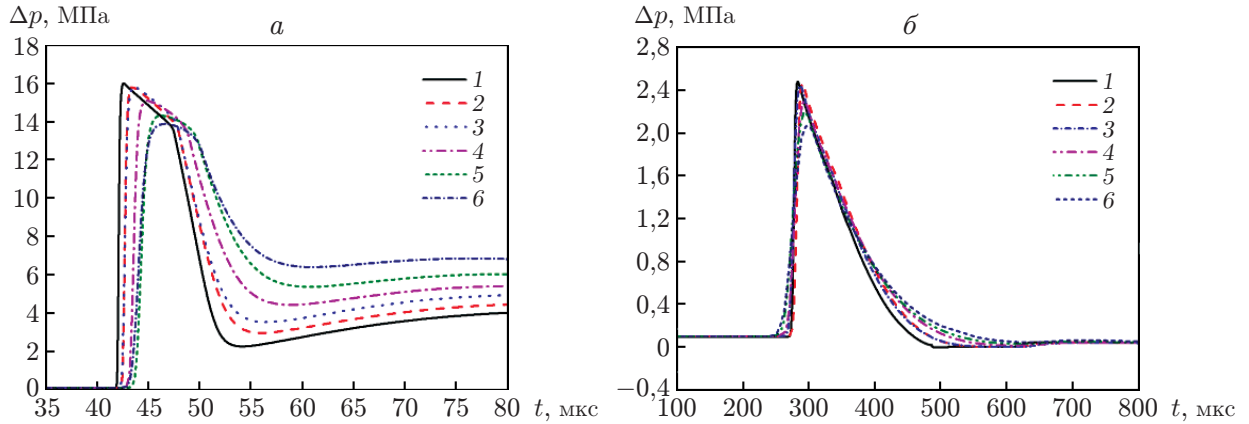


Рис. 5. Зависимости избыточного давления от времени при распространении ударной волны на различных расстояниях от центра заряда, вычисленные на сетках с ячейками различного размера:

*a* — ударная волна на небольшом расстоянии от центра заряда (1 —  $l = 0,5$  мм, 2 —  $l = 0,8$  мм, 3 —  $l = 1,0$  мм, 4 —  $l = 1,5$  мм, 5 —  $l = 2,0$  мм, 6 —  $l = 2,5$  мм), *б* — ударная волна на большом расстоянии от центра заряда (1 —  $l = 5$  мм, 2 —  $l = 8$  мм, 3 —  $l = 10$  мм, 4 —  $l = 15$  мм, 5 —  $l = 20$  мм, 6 —  $l = 25$  мм)

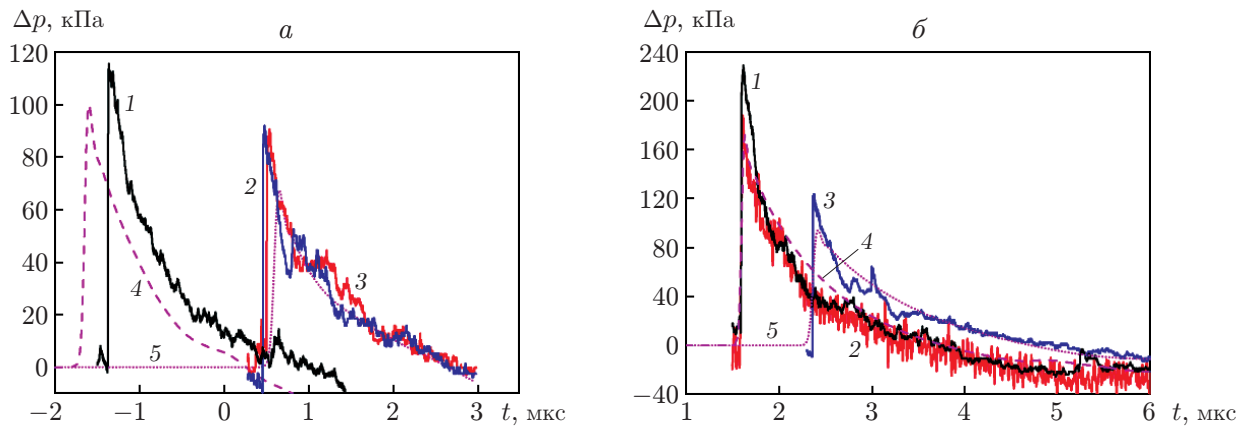


Рис. 6. Экспериментальные (1–3) и расчетные (4, 5) зависимости избыточного давления от времени при распространении ударной волны на различных расстояниях  $R$  от центра заряда:

*a* — внутреннее инициирование (1 —  $R = 2$  м (первая гауссова точка), 2 —  $R = 3$  м (первая гауссова точка), 3 —  $R = 3$  м (вторая гауссова точка), 4 —  $R = 2$  м, 5 —  $R = 3$  м); *б* — одновременное инициирование (1 —  $R = 2$  м (первая гауссова точка), 2 —  $R = 2$  м (вторая гауссова точка), 3 —  $R = 3$  м (первая гауссова точка), 4 —  $R = 2$  м, 5 —  $R = 3$  м)

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения избыточного давления и импульса

$R, \text{ м}$	Внутреннее инициирование						Совместное инициирование					
	$\Delta p_m, \text{ кПа}$		$\Delta, \%$	$i, \text{ кПа} \cdot \text{с}^{-1}$		$\Delta, \%$	$\Delta p_m, \text{ кПа}$		$\Delta, \%$	$i, \text{ кПа} \cdot \text{с}^{-1}$		$\Delta, \%$
	Рас- чет	Экспе- римент		Рас- чет	Экспе- римент		Рас- чет	Экспе- римент		Рас- чет	Экспе- римент	
2	99,9	106,8	6,5	0,062	0,072	13,9	172,0	186,6	7,8	0,116	0,108	−7,4
3	67,2	70,9	5,2	0,046	0,063	27,0	94,1	103,5	9,1	0,080	0,077	−3,9

быть обусловлено наличием опоры датчика и неровностями стенки, которые задерживают приход ударной волны. В табл. 2 приведены расчетные и экспериментальные значения избыточного давления и импульса. Различие  $\Delta$  между максимальными расчетными и экспериментальными значениями избыточного давления и импульса составляет менее 13,7 и 16,9 % соответственно, что подтверждает адекватность разработанной численной модели.

**2. Генерация и распространение детонационной и взрывной волн.** Исследовано влияние взаимодействия внутренней и внешней детонационных волн составного заряда на формирование и распространение ударной волны. Поскольку скорости детонации внутреннего и внешнего ВВ различны, совместное воздействие энергий детонации этих ВВ возможно после их инициирования, что, по-видимому, влияет на размер области детонационной реакции и на энерговыделение обоих ВВ.

Изолинии давления через 2, 10 и 18 мкс после инициирования приведены на рис. 7. Размеры  $x \times y$  областей, представленных на рис. 7 для этих моментов времени, равны  $22 \times 9$  мм,  $25 \times 12$  мм и  $30 \times 15$  мм соответственно. При внутреннем инициировании первым детонирует внутренний слой ВВ, имеющего большую скорость детонации, при этом возникает косая ударная волна в полиуретановом недетонирующем слое. Поскольку волновое сопротивление внутреннего слоя ВВ меньше по сравнению со слоем полиуретана, на границе этих слоев ударная волна преломляется. Затем ударная волна распространяется во внешний слой ВВ, в результате чего возникает детонационная волна. Различие моментов времени детонации заряда приводит к отставанию волнового фронта внешнего слоя от волнового фронта внутреннего слоя, что вызывает удлинение зоны реакции и уменьшение степени реакции внешнего заряда. При одновременном инициировании детонационные

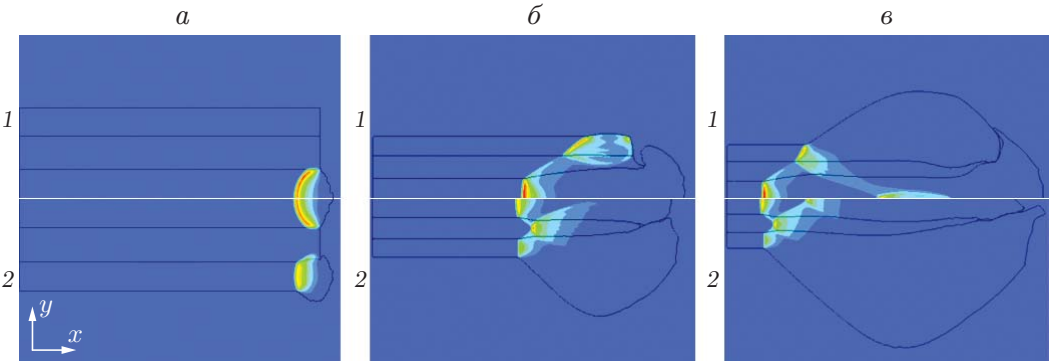


Рис. 7. Изолинии детонационного давления в различные моменты времени: *a* —  $t = 2$  мкс, *б* —  $t = 10$  мкс, *в* —  $t = 18$  мкс; 1 — внутреннее инициирование, 2 — одновременное инициирование



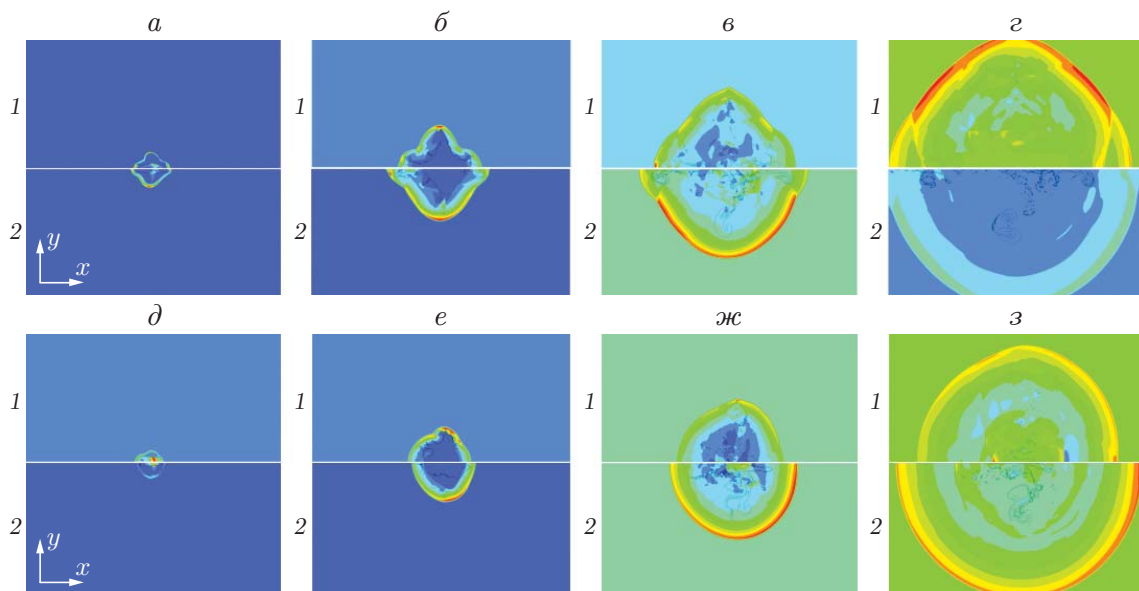


Рис. 8. Распространение ударной волны составного заряда без оболочки ( $a-g$ ) и с оболочкой ( $d-z$ ):

$a, d$  —  $t = 100$  мкс,  $б, е$  —  $t = 700$  мкс,  $в, ж$  —  $t = 2200$  мкс,  $г, з$  —  $t = 6000$  мкс; 1 — внутреннее инициирование, 2 — одновременное инициирование

волны, генерируемые внутренним и внешним зарядами, могут столкнуться внутри слоя недетонирующего материала, что приведет к значительному увеличению давления в области столкновения. В результате скорость выделения тепла и интенсивность взрывной волны увеличиваются.

Цилиндрический заряд генерирует ударную волну с несферическим профилем. Сферическая взрывная волна, распространяющаяся в воздухе, генерирует так называемые концевые и боковые волны, распространяющиеся в осевом и радиальном направлениях соответственно [7]. Через некоторое время две волны начинают взаимодействовать, генерируя несферическую волну, называемую мостиковой волной [7]. В результате ударная волна распространяется в различных направлениях. На рис. 8 показаны формы ударной волны, распространяющейся в воздухе, при различных режимах инициирования зарядов без оболочки и с оболочкой. Размер  $x \times y$  областей, представленных на рис. 8, составляет  $250 \times 125$  мм.

На небольшом расстоянии от заряда значения избыточного давления существенно различаются, что обусловлено сложностью структуры заряда. С увеличением расстояния различие уменьшается и профиль ударной волны постепенно принимает сферическую форму, аналогичную форме ударной волны для цилиндрического заряда.

Из результатов, приведенных на рис. 8,  $a-g$ , следует, что для составного заряда без оболочки при внутреннем инициировании в направлении под углом  $45^\circ$  распространяется мостиковая волна, аналогичная волне в случае одиночного цилиндрического заряда. Это свидетельствует о том, что наличие среднего слоя недетонирующего материала практически не влияет на возникновение и эволюцию концевой и боковой волн. При одновременном инициировании возникает мостиковая волна, распространяющаяся в направлениях, близких к направлениям под углами  $20$  и  $160^\circ$ , что обусловлено наличием многоочаговых детонационных волн, распространяющихся от торца заряда. Взаимодействие детонационных волн может привести к увеличению скорости распространения осевой ударной волны, в результате чего осевая и боковая волны будут располагаться ближе к концу. В отли-

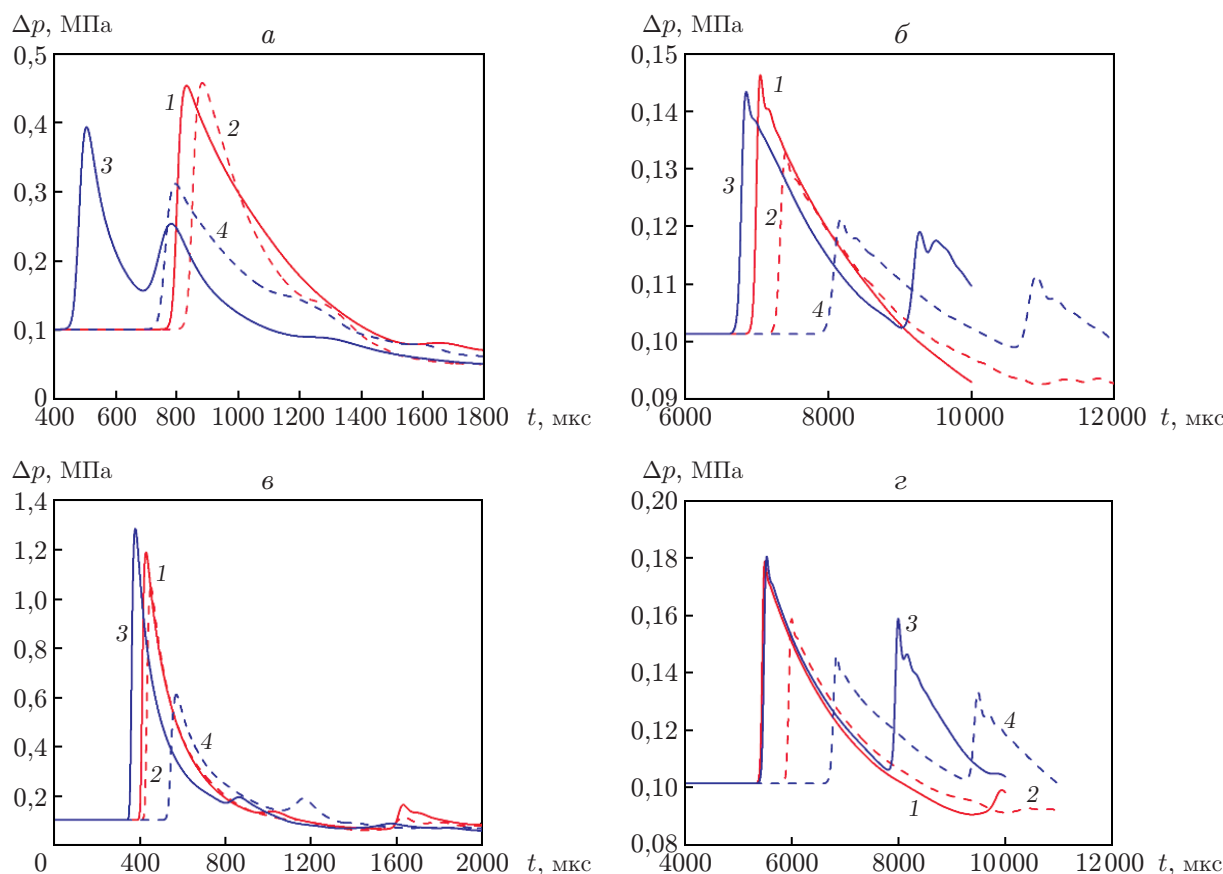


Рис. 9. Зависимости избыточного давления от времени на различных расстояниях от центра заряда при распространении ударной волны в двух азимутальных направлениях:

*а, б* — внутреннее инициирование, *в, г* — одновременное инициирование; *а, в* —  $R = 1$  м, *б, г* —  $R = 4$  м; 1, 2 —  $\alpha = 50^\circ$ , 3, 4 —  $\alpha = 140^\circ$ ; 1, 3 — составной заряд без оболочки, 2, 4 — заряд с оболочкой

чие от составного заряда без оболочки в заряде с оболочкой характер распространения ударной волны иной (см. рис. 8, д–з). Мостиковая волна отсутствует, вследствие избыточного давления наблюдается асимметрия течения. Наличие торцевой крышки оказывает существенное влияние на детонационную волну, которая распространяется с большей радиальной скоростью, при этом профиль волнового фронта принимает форму, близкую к эллиптической.

На рис. 9 приведены зависимости избыточного давления от времени при распространении ударной волны в двух азимутальных направлениях. На приведенных кривых имеется второй пик, меньший первого, что может быть обусловлено взаимодействием детонационных волн, распространяющихся от внутреннего и внешнего зарядов. Еще одна важная особенность кривых, приведенных на рис. 9, заключается в том, что при внутреннем инициировании ударная волна в большей степени диспергирована. Это обусловлено формой профиля ударной волны, которая при большей энергии инициирования близка к сферической.

**3. Влияние наличия оболочки на ударную волну.** Наличие оболочки может приводить к задержке возникновения ударной волны и уменьшению ее интенсивности. На границе между оболочкой и ВВ возникает отраженная ударная волна, что, по-видимому,

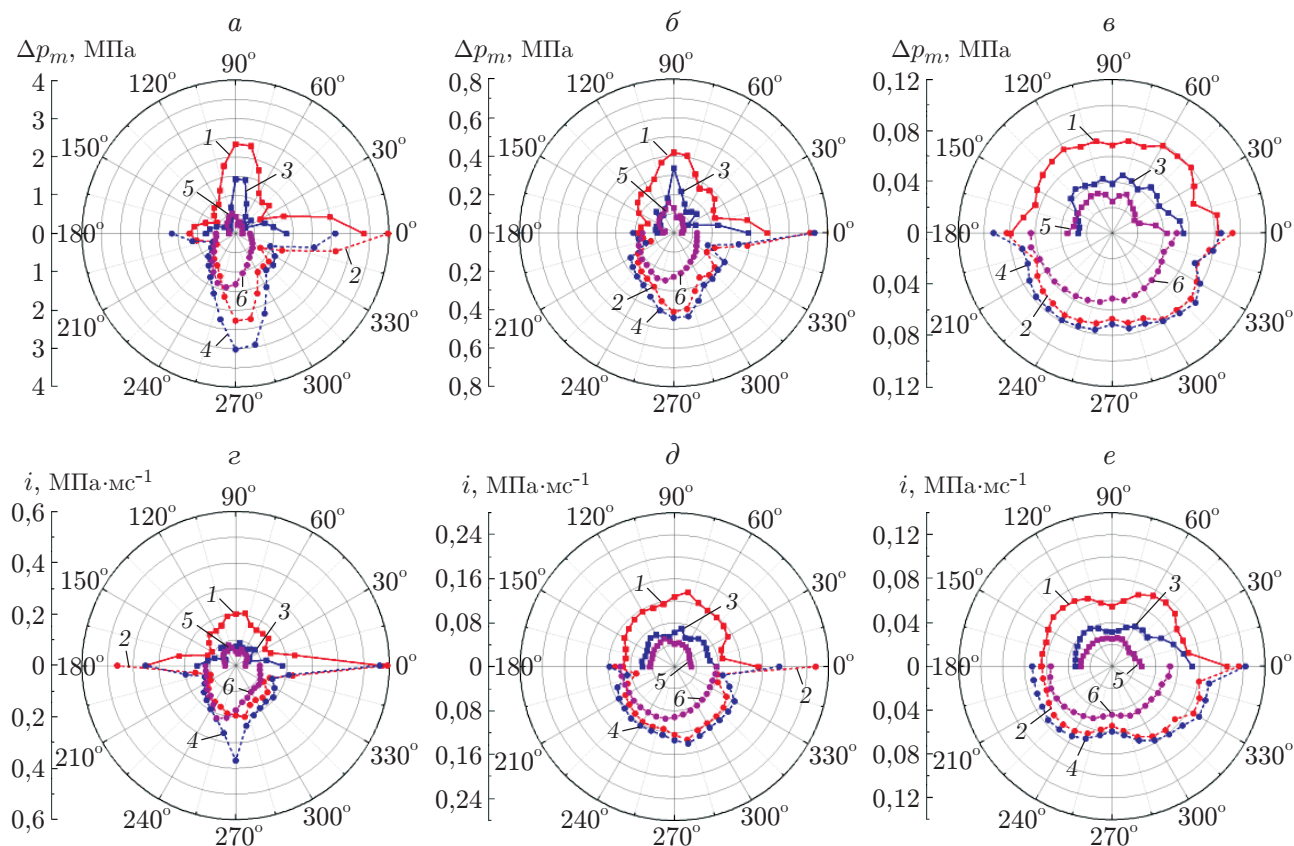


Рис. 10. Распределения по азимуту максимального избыточного давления ( $a-v$ ) и импульса ( $г-е$ ) на различных расстояниях от центра заряда при взрыве одиночного заряда (1, 2), составного заряда без оболочки (3, 4) и составного заряда с оболочкой (5, 6):

$a, г$  —  $R = 1$  м,  $б, д$  —  $R = 2$  м,  $в, е$  —  $R = 4$  м; 1, 3, 5 — внутреннее инициирование, 2, 4, 6 — одновременное инициирование

оказывает влияние на процессы распространения и воздействия детонационной волны. При разрушении оболочки поглощается энергия взрыва и изменяется интенсивность ударной волны.

На рис. 10 приведены круговые диаграммы избыточного давления и импульса для составного заряда без оболочки, составного заряда с оболочкой и одиночного заряда с эквивалентным зарядом. Диаграммы, полученные при одновременном инициировании, были повернуты на угол, равный  $180^\circ$ , для более наглядного представления различия процессов распространения ударной волны при двух режимах инициирования.

Распределения максимальных избыточного давления и импульса составного заряда, в отличие от одиночного, на различных азимутах более однородны, а форма профиля импульса ближе к полусфере. Следовательно, при наличии оболочки начальная скорость ударной волны и градиент давления на соседних азимутах уменьшаются, что обуславливает форму фронта ударной волны, более близкую к сферической. Также отсутствует вторичное взаимодействие осевых и радиальных ударных волн, что объясняет отсутствие мостиковой волны на рис. 8,  $д-з$ .

На рис. 10 видна асимметричность распределения избыточного давления. Значения максимальных избыточного давления и импульса в диапазоне  $\alpha = 90 \div 180^\circ$  существенно больше, чем в диапазоне  $\alpha = 0 \div 90^\circ$ . В случае одиночного заряда максимальные значения

избыточного давления и импульса имеют место на азимуте  $\alpha \approx 110^\circ$ , в отличие от составного заряда без оболочки, для которого эти значения имеют место на азимуте  $\alpha \approx 75^\circ$ . При детонации заряда на одном торце оболочка начинает разрушаться в окружном направлении вблизи этого торца, затем разрушение распространяется к противоположному торцу. Таким образом, отмеченное выше смещение положения максимума избыточного давления может быть обусловлено наличием оболочки вблизи точки инициирования.

Из приведенных на рис. 10 результатов следует, что распределение избыточного давления в ударной волне, распространяющейся от составного заряда, соответствует распределению избыточного давления в ударной волне, распространяющейся от одиночного заряда, характеризующегося более высоким осевым и радиальным давлением, а также более низким давлением при угле, приближенно равном  $45^\circ$ . Для составного заряда с оболочкой радиальное избыточное давление больше осевого на небольших расстояниях от центра заряда вследствие наличия торцевых крышек. При увеличении расстояния до  $R = 2$  м осевые значения избыточного давления и импульса становятся больше радиальных. Это означает, что радиальное избыточное давление для заряда с оболочкой уменьшается быстрее осевого. При внутреннем инициировании максимальные значения избыточного давления в ударной волне, распространяющейся от составного заряда без оболочки и с оболочкой, существенно различаются. При одновременном инициировании это различие уменьшается. Таким образом, при наличии оболочки различие энерговыделения заряда при двух режимах инициирования уменьшается.

**4. Влияние способа инициирования на ударную волну.** На рис. 11 приведены распределения избыточного давления и импульса при внутреннем и одновременном инициировании заряда. Форма кривых при двух режимах инициирования практически одинакова. Таким образом, режим инициирования практически не влияет на характер распределения избыточного давления (максимальные значения избыточного давления и импульса, положение мостиковой волны и т. д.) при различных азимутальных углах.

Для исследования энерговыделения составного заряда при двух режимах инициирования характеристики ударной волны, генерируемой зарядом, сравнивались с характеристиками ударной волны одиночного заряда с такой же эквивалентной массой. При этом избыточное давление вычислялось по эмпирическим формулам. Сложный характер распределения избыточного давления для составного заряда обуславливает большую погрешность при определении импульса. Поэтому рассчитывались только значения максимального избыточного давления. В соответствии с экспериментальными данными формула для вычисления максимального избыточного давления, возникающего при сферическом взрыве тротила в бесконечной воздушной среде, имеет вид [21]

$$\Delta p_m = 0,082 \frac{1}{\bar{R}} + 0,265 \frac{1}{\bar{R}^2} + 0,686 \frac{1}{\bar{R}^3}, \quad 1 \leq \bar{R} \leq 15, \quad (3)$$

где  $\bar{R} = R/\sqrt{W_t}$ ;  $W_t$  — масса заряда;  $R$  — расстояние от центра заряда. Для вычисления максимального избыточного давления, создаваемого ВВ, массу в тротиловом эквиваленте можно определить в соответствии с теорией ВВ, а затем рассчитать по формуле (1). Для исследуемого в данной работе составного заряда величина  $W_t$  определяется по формуле

$$W_t = \frac{Q_{v1}W_1 + Q_{v2}W_2}{Q_{vt}},$$

где  $Q_{v1}$ ,  $Q_{v2}$ ,  $Q_{vt}$  — количество теплоты при детонации внутреннего слоя ВВ, внешнего слоя ВВ и тротила соответственно. Для составного заряда эквивалентная масса ВВ  $m_1$  вычисляется по формуле

$$m_1 = m \left[ \frac{\alpha}{2 - \alpha} + \frac{2(1 - \alpha)}{2 - \alpha} \left( \frac{r_0}{r_{p0}} \right)^{2\gamma - 2} \right],$$

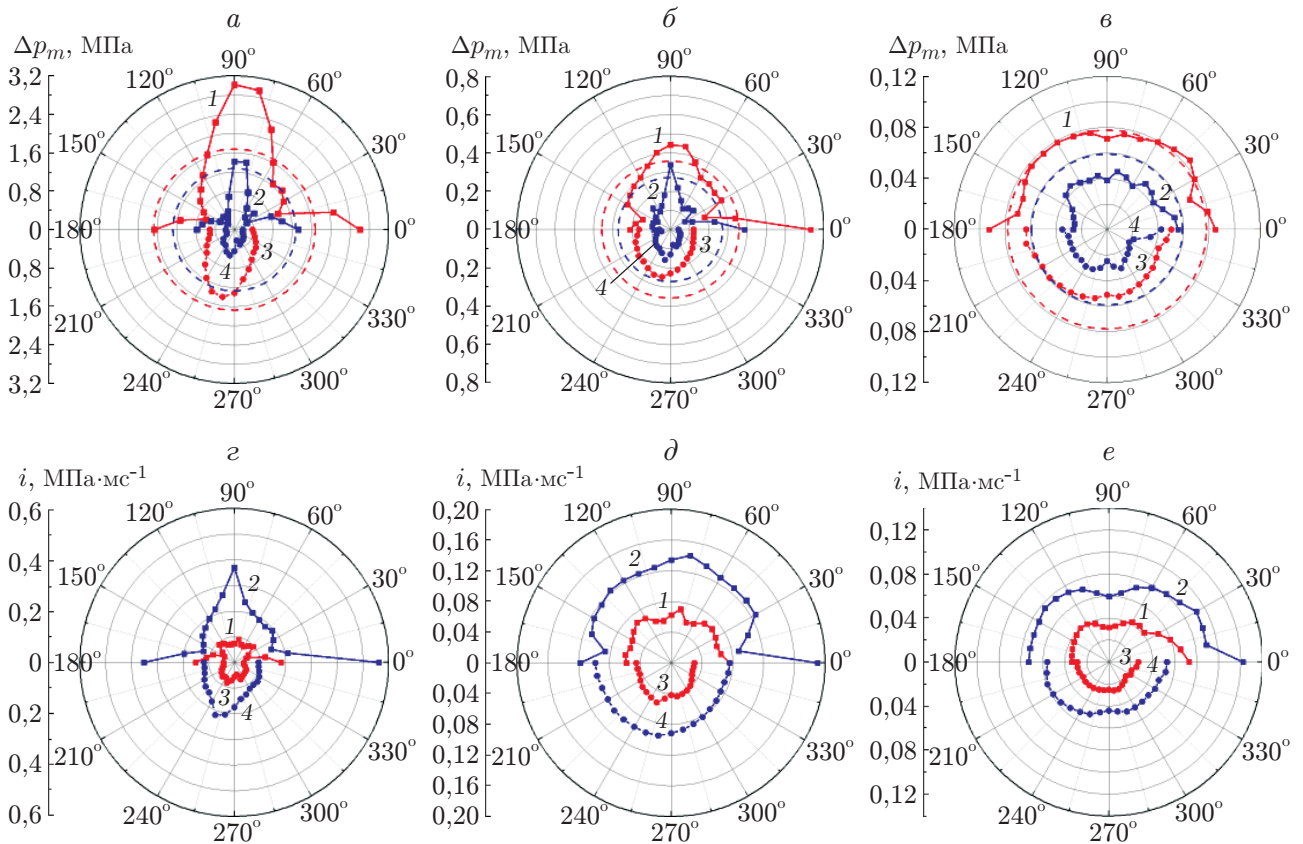


Рис. 11. Распределения по углу максимальных избыточного давления ( $a$ – $в$ ) и импульса ( $г$ – $е$ ) при различных режимах инициирования составных зарядов без оболочки (1, 2) и с оболочкой (3, 4) на различных расстояниях от центра заряда:  $a, г$  —  $R = 1$  м,  $б, д$  —  $R = 2$  м,  $в, е$  —  $R = 4$  м; 1, 3 — внутреннее инициирование, 2, 4 — одновременное инициирование

где  $m$  — общая масса ВВ;  $\alpha = m/(m + m_c)$ ;  $m_c$  — масса оболочки;  $r_0, r_{p0}$  — начальный радиус оболочки и радиус разрушенной оболочки;  $\gamma$  — коэффициент удельной теплоемкости воздуха, обычно принимаемый равным 1,4 [21]. Полученные теоретические результаты приведены также на рис. 11.

Из результатов, представленных на рис. 11, следует, что и для составного заряда без оболочки, и для составного заряда с оболочкой максимальные значения избыточного давления, полученные в результате численного моделирования, в целом меньше максимального значения избыточного давления, вычисленного по формуле (3). На большом расстоянии от центра заряда при одновременном инициировании максимальные теоретические значения близки к значениям, полученным в результате численного моделирования, а при внутреннем инициировании превышают их. Это обусловлено тем, что при внутреннем инициировании составного заряда недетонирующий материал поглощает энергию взрывной волны, в результате чего максимальное избыточное давление уменьшается, при одновременном инициировании поглощение компенсируется совместным воздействием энергий внутреннего и внешнего зарядов.

На рис. 12 приведена зависимость величины  $\beta$  (отношения максимального значения избыточного давления, полученного в результате численного моделирования, к значению, вычисленному по приведенным выше формулам) от азимутального угла. Для композитного заряда без оболочки максимальное избыточное давление в осевом и радиальном направ-

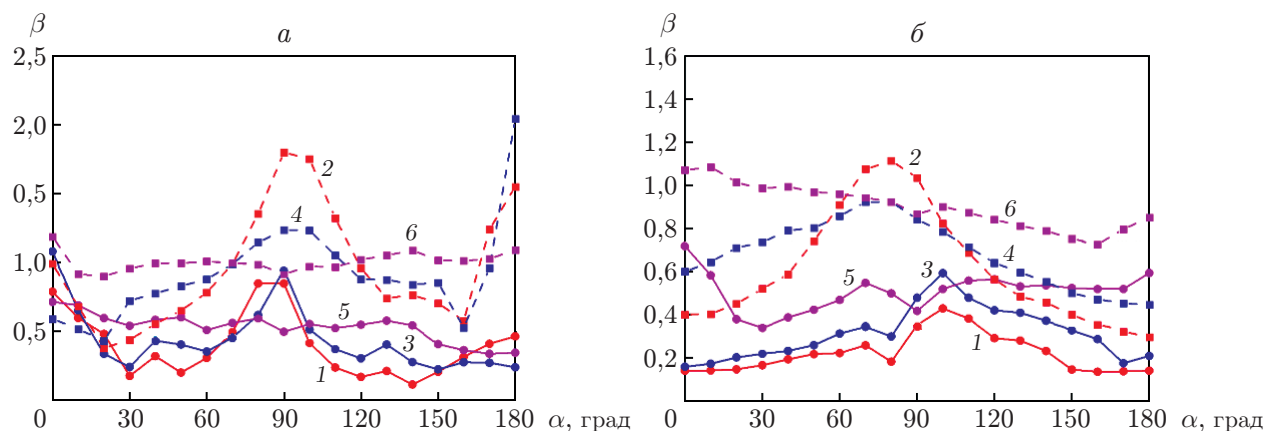


Рис. 12. Зависимость величины  $\beta$  от азимутального направления:  
 а — составной заряд без оболочки, б — составной заряд с оболочкой; 1, 2 —  $R = 1$  м,  
 3, 4 —  $R = 2$  м, 5, 6 —  $R = 4$  м; 1, 3, 5 — внутреннее инициирование, 2, 4, 6 —  
 одновременное инициирование

лениях больше, чем в направлении под углом  $45^\circ$ . С увеличением расстояния от центра заряда амплитуда колебаний кривой уменьшается и при  $R \approx 4$  м практически не меняется. В частности, значения  $\beta$ , полученные при численном моделировании при внутреннем инициировании заряда, в основном меньше теоретических значений, причем среднее значение равно  $\beta = 0,46$ . При одновременном инициировании значения  $\beta$ , полученные при численном моделировании, в основном больше теоретических значений, при этом среднее значение равно  $\beta = 0,96$ . Это свидетельствует о том, что в данном случае энерговыделение близко к энерговыделению заряда без оболочки с такой же эквивалентной массой заряда. Следует отметить, что на различных расстояниях  $R$  при азимутальных углах  $\alpha = 70, 120^\circ$  значения  $\beta$  практически одинаковы и близки к теоретическим значениям. Для составного заряда с оболочкой максимальное избыточное давление в радиальном направлении больше, чем для заряда без оболочки, при этом энерговыделение значительно меньше, его среднее значение равно  $0,35$  при внутреннем инициировании и  $0,73$  при одновременном инициировании.

**Заключение.** В работе предложен метод расчета составного заряда с использованием программы AUTODYN. Для проверки адекватности предложенного метода выполнен взрывной эксперимент. Исследовано влияние наличия оболочки и режимов инициирования на процесс распространения ударной волны. В частности, изучены распределения избыточного давления и импульса на различных азимутах и расстояниях от центра заряда.

Установлено, что для расчета избыточного давления на малом и большом расстояниях от центра заряда достаточно использовать сетки с размером ячеек, равным  $1$  и  $10$  мм соответственно. Значения максимального избыточного давления и импульса, полученные в результате моделирования, хорошо согласуются с экспериментальными значениями (различие результатов не превышает  $16,9\%$ ).

При внутреннем инициировании фронт детонационной волны, распространяющейся от внешнего заряда, отстает от фронта волны, распространяющейся от внутреннего заряда. При одновременном инициировании в среднем слое появляется вогнутая зона столкновения, что приводит к возникновению пересжатой волны детонации и значительному увеличению избыточного давления.

На небольших расстояниях от центра заряда избыточное давление составного заряда на различных азимутах существенно различается. С увеличением расстояния это различие уменьшается, а фронт ударной волны принимает сферическую форму.



В случае заряда с оболочкой отсутствует мостиковая волна, а распределение избыточного давления по различным азимутам является более равномерным. На малых расстояниях избыточное давление в радиальном направлении больше, чем в осевом, и с увеличением расстояния уменьшается. Максимальное избыточное давление имеет место на азимуте  $\alpha \approx 110^\circ$ . Для составного заряда без оболочки максимальное избыточное давление возникает на азимуте  $\alpha \approx 75^\circ$ .

При внутреннем инициировании недетонирующий материал поглощает значительное количество энергии взрывной волны, при этом максимальное избыточное давление уменьшается. При одновременном инициировании поглощение энергии волны компенсируется совместным воздействием энергий зарядов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Mohottige N. W., Wu C., Hao H.** Characteristics of free air blast loading due to simultaneously detonated multiple charges // Intern. J. Structur. Stability Dynamics. 2014. V. 14, N 4. 1450002.
2. **Trzciński W. A., Barcz K., Paszula J., et al.** Investigation of blast performance and solid residues for layered thermobaric charges // Propellants, Explosiv., Pyrotech. 2014. V. 39, N 1. P. 40–50.
3. **Maiz L., Trzciński W. A., Paszula J.** Semi-closed investigations of new aluminized thermobaric and enhanced blast composites // Propellants, Explosiv., Pyrotech. 2017. V. 42, N 8. P. 857–863.
4. **Li J., Li W., Yu J., et al.** Blast performance of layered charges enveloped by aluminum powder/rubber composites in confined spaces // Defence Technol. 2022. V. 18, N 4. P. 583–592.
5. **Hong X. W., Li W. B., Li W. B., et al.** Experimental study on explosion dispersion process of a multi-layer composite charge under different initiation modes // Defence Technol. 2020. V. 16, N 4. P. 883–892.
6. **Hong X. W., Li W. B., Wang X. M., et al.** Explosion temperature and dispersion characteristics of composite charges based on different non-detonative materials // Propellants, Explosiv., Pyrotech. 2018. V. 43, N 12. P. 1251–1262.
7. **Reynolds M., Huntington-Thresher W.** Development of tuneable effects warheads // Defence Technol. 2016. V. 12, N 3. P. 255–262.
8. **Gao C., Kong X. Z., Fang Q., et al.** Numerical investigation on free air blast loads generated from center-initiated cylindrical charges with varied aspect ratio in arbitrary orientation // Defence Technol. 2021. V. 8. P. 1–17.
9. **Langlet A., Souli M., Aquelet N., et al.** Air blast reflecting on a rigid cylinder: simulation and reduced scale experiments // Shock Waves. 2015. V. 25, N 1. P. 47–61.
10. **Zakrisson B., Wikman B., Häggblad H.-Å.** Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosions in air // Intern. J. Impact Engng. 2011. V. 38, N 7. P. 597–612.
11. **Xiao W., Andrae M., Gebbeken N.** Influence of charge shape and point of detonation of high explosive cylinders detonated on ground surface on blast resistant design // Intern. J. Mech. Sci. 2020. V. 181. 105697.
12. **Xiao W., Andrae M., Gebbeken N.** Effect of charge shape and initiation configuration of explosive cylinders detonating in free air on blast-resistant design // J. Structur. Engng. 2020. V. 146, N 8. 04020146.

13. **Wu C., Lukaszewicz M., Schebella K., Antanovskii L.** Experimental and numerical investigation of confined explosion in a blast chamber // J. Loss Prevent. Process Industr. 2013. V. 26, N 4. P. 737–750.
14. **Zuo J., Yang R., Ma X., et al.** Explosion wave and explosion fracture characteristics of cylindrical charges // Intern. J. Rock Mech. Mining Sci. 2020. V. 135, N 5. 104501.
15. **Artero-Guerrero J., Pernas-Sánchez J., Teixeira-Dias F.** Blast wave dynamics: The influence of the shape of the explosive // J. Hazard. Materials. 2017. V. 331. P. 189–199.
16. **Li J., Li W., Hong X., et al.** Blast wave characteristics of multi-layer composite charge: Theoretical analysis, numerical simulation, and experimental validation // Defence Technol. 2023. V. 19. P. 91–102.
17. **Hong X. W., Li W. B., Cheng W., et al.** Numerical simulation of the blast wave of a multilayer composite charge // Defence Technol. 2020. V. 16, N 1. P. 11–16.
18. **AUTODYN** theory manual (Revision 4.3). S. l.: Century Dynamics, Inc., 2009.
19. **AUTODYN** users manual. S. l.: ANSYS Inc., 2010.
20. **Wang H., Yan J., Li S., et al.** Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of 40CrNiMo steel // J. Nanjing Univ. Sci. Technol. 2022. V. 46, N 3. P. 367–372.
21. **Sui S. Y.** Terminal effect / S. Y. Sui, S. S. Wang. Beijing: Nat. Defense Indust. Press, 2000.

*Поступила в редакцию 3/IV 2023 г.,  
после доработки — 30/V 2023 г.  
Принята к публикации 25/IX 2023 г.*

---