

УДК 51-71

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАТЕЛЬНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ВЗРЫВА

А. В. Петюков<sup>1,2</sup>, В. А. Пырьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва  
andre1524@bk.ru

<sup>2</sup>ФКП «НИИ «Геодезия», 141292 Красноармейск

Представлены результаты численного моделирования импульсного воздействия взрыва зарядов взрывчатого вещества на элементы конструкций. Проведена валидация численной методики с помощью известных экспериментальных данных, описывающих действие взрыва в ближней зоне. Выполнены дополнительные эксперименты по метанию взрывом стальных дисков. Решена задача о влиянии на импульс взрыва условий подрыва: наличие или отсутствие воздуха, дополнительных отражающих поверхностей.

Ключевые слова: ближняя зона действия, взрыв, ударная волна, продукты детонации, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20190414

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проявляется большой интерес к исследованию параметров взрыва в ближней зоне действия, которая характеризуется совместным воздействием на преграду высокоскоростного потока продуктов детонации (ПД) и ударных волн (УВ). В качестве примеров можно привести работы в области гидроакустики [1], исследования, связанные со снижением взрывного воздействия на объекты [2], а также с защитой от действия взрыва [3, 4].

В работе [5] экспериментальными методами изучались поля взрыва вблизи сферических зарядов взрывчатых веществ (ВВ). Были определены зависимости избыточного давления от относительного расстояния, ширины слоя воздуха между УВ и ПД, а также параметры воздуха за фронтом УВ. В работе [6] методом скоростной съемки процесса с использованием так называемых масок исследовалось движение фронта УВ и ПД в ближней зоне действия. Маска — прозрачная пленка с нанесенными на нее непрозрачными линиями, расположенными перпендикулярно направлению движения УВ, устанавливалась между зарядом ВВ и источником света. Положение фронта УВ определялось по искажению линий маски при регистрации скоростной камерой типа СФР-2М. В работе [6] для ряда зарядов ВВ диаметром 10 ÷ 50 мм определены эмпирические коэффициенты для

уравнений скорости распространения и давления на фронте УВ в зависимости от расстояния. В работах [7–9] импульс взрыва определялся с помощью датчиков импульса (стальные или алюминиевые диски), которые размещались на определенной высоте относительно земли и металлись взрывом близко расположенного заряда ВВ. По дальности разлета и разности высот места установки и места падения датчиков находили величину приобретаемого импульса. Следует отметить, что точность измерений данным методом невысока. В работе [10] также отмечается недостаток надежных экспериментальных методик для определения параметров взрыва в ближней зоне. Связано это прежде всего с механическим разрушением датчиков давления из-за удара по ним высокоскоростного потока ПД и воздействия сильных УВ, с амплитудой больше 10 МПа. Поэтому одним из основных инструментов исследования остается математическое моделирование.

Целью данной работы является численное моделирование влияния расстояния от заряда до преграды, формы заряда ВВ, наличия или отсутствия воздуха между ВВ и преградой на импульс, передаваемый цели при взрыве заряда ВВ.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Численные расчеты проводились в двухмерной (осесимметричной) и трехмерной по-

становках произвольным лагранжево-эйлеровым методом (ALE). В основе этого метода лежит система уравнений, описывающая законы сохранения массы, импульса и энергии в дифференциальной форме [11, 12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \operatorname{div}(\sigma),$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \operatorname{div}(e \mathbf{v}) = \sigma \operatorname{grad}(\mathbf{v}),$$

где  $\rho$  — плотность,  $\mathbf{v}$  — вектор скорости,  $\sigma$  — тензор напряжений,  $e$  — энергия,  $t$  — время. Эта система уравнений дополняется соотношениями для дивергента напряжений, а также замыкающими соотношениями (уравнениями состояния, моделями прочности), начальными и граничными условиями в каждой конкретной задаче.

### ВАЛИДАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ

Перед тем как перейти к основным расчетам, была проведена валидация численной методики, заключающаяся в сравнении результатов численного моделирования с экспериментальными. В качестве первой задачи для тестирования выбрана задача об определении избыточного давления во фронте УВ в воздухе при взрыве вблизи заряда ВВ, экспериментально решавшаяся в работе [5]. В [5] были получены эмпирические оценки избыточного давления во фронте УВ [атм]:

для ТГ 50/50

$$\Delta p = \frac{1100}{(r/r_0)^{1.41}}, \quad (1)$$

$$D = \frac{9500}{(r/r_0)^{0.66}}, \quad \frac{r}{r_0} = [3 \cdot 10^5 (t^0 - t_d^0) + 1]^{0.603},$$

для тэна

$$\Delta p = \frac{1000}{(r/r_0)^{1.38}}, \quad D = \frac{9200}{(r/r_0)^{0.65}},$$

$$\frac{r}{r_0} = [2.8 \cdot 10^5 (t^0 - t_d^0) + 1]^{0.606}, \quad t^0 = \frac{t}{m^{1/3}},$$

где  $r_0$  — начальный радиус заряда ВВ;  $r$  — текущее расстояние до фронта ударной волны;

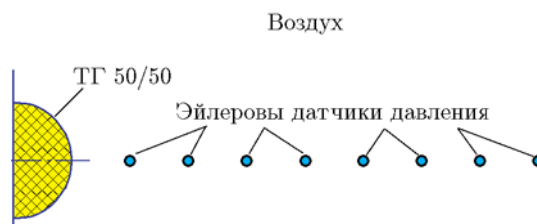


Рис. 1. Постановка задачи для численного расчета

$D$  — скорость ударной волны, м/с;  $m$  — масса заряда ВВ, кг;  $t_d^0$  — время детонации заряда ВВ, с. Приведенные формулы справедливы в диапазоне  $1 \leq r/r_0 \leq 12$ . Экспериментальный разброс составлял около 10 %.

В аналогичной постановке были проведены численные расчеты. Сферический заряд ТГ 50/50 плотностью  $1680 \text{ кг/м}^3$  и массой  $0.135 \text{ кг}$  взрывался в воздухе; эйлеровы датчики давления располагались на расстояниях  $1 \div 12$  радиусов заряда (рис. 1). В качестве уравнения состояния (УРС) ПД выбрано уравнение состояния JWL [13], уравнение состояние воздуха описывалось уравнением идеального газа с постоянным коэффициентом адиабаты 1.4. Константы УРС для ТГ 50/50 взяты из работы [14]:  $A = 627.66 \text{ ГПа}$ ,  $B = 13.49 \text{ ГПа}$ ,  $R_1 = 4.83$ ,  $R_2 = 1.28$ ,  $\Gamma = 0.319$ ,  $E_0 = 7.81 \text{ ГПа}$ . Расчеты проводились на квадратной сетке размером  $0.5 \times 0.5 \text{ мм}$  с числом Куранта, равным 0.25.

На рис. 2 приведена зависимость избыточного давления во фронте ударной волны от расстояния по результатам численных расчетов и расчетов по эмпирической формуле (1). Видно удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом, максимальное расхождение составляет не более 13 %.

Второй задачей для тестирования выбрана задача о метании стальных дисков продуктами детонации. Экспериментальные исследования проводились в постановке, приведенной на рис. 3. Безоболочечный цилиндрический заряд ВВ устанавливался на легкой пенопластовой подставке (рис. 3, а) высотой  $1.0 \div 1.5 \text{ м}$ . Рядом с ним на расстоянии диаметра от торца заряда ставился стальной диск. Иницирование производилось детонатором ЭД-8Ж в центре противоположного торца. Скорость метаемого диска регистрировалась двумя независимыми способами: по видеосъемке высокоскоростной камерой Phantom V611 с частотой съемки

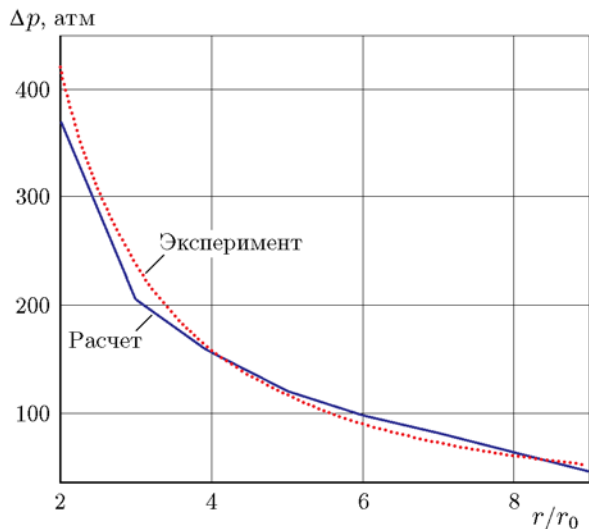


Рис. 2. Зависимость избыточного давления во фронте УВ от расстояния

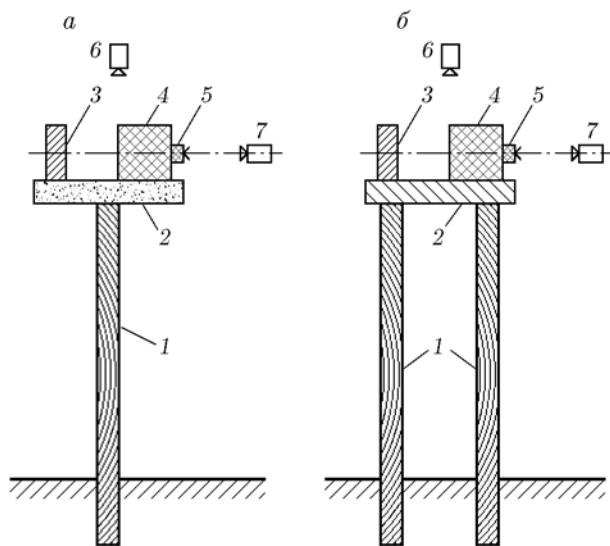


Рис. 3. Схема экспериментов и расчетов:  
 1 — деревянные опоры, 2 — пенопластовая подставка (а) или стальная плита (б), 3 — стальной диск, 4 — шашка ВВ, 5 — детонатор, 6 — высокоскоростная кинокамера, 7 — радиолокационная станция

15 000 ÷ 40 000 кадр/с и с помощью радиолокационной станции BR 3502. Исследовалось также влияние жесткой поверхности на импульс, передаваемый диску, путем установки заряда ВВ и стального диска на бронеплите (рис. 3, б). Проведено две серии опытов, в которых варьировались массы заряда ВВ и стального диска, а также тип ВВ. В табл. 1 приведены парамет-

Таблица 1

Параметры экспериментов

Параметр	Значение	
	серия 1	серия 2
Масса ВВ, кг	0.03	0.72
Начальная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1 600	1 660
Скорость детонации, м/с	8 190	8 300
Теплота взрыва, кДж/кг	5 560	5 630
Диаметр шашки, мм	40	90
Высота шашки, мм	15	70
Масса диска, кг	0.5	1.5
Диаметр диска, м	0.04	0.095
Скорость диска при подрыве в воздухе, м/с	27 ± 0.27	154 ± 1.54
Скорость диска при подрыве на жесткой плите, м/с	31 ± 0.32	180 ± 1.8

ры ВВ, масса стальных дисков, а также скорости, зафиксированные в экспериментах (разброс значений около 1.0 %).

Численные расчеты выполнены в постановке, аналогичной приведенной на рис. 3 схеме экспериментов. Уравнение состояния ПД задавалось в форме JWL. Так как для отечественных составов данные по коэффициентам в уравнении JWL отсутствуют, для моделирования были выбраны наиболее похожие по характеристикам составы А-3 и С-4. Константы к УРС JWL этих составов приведены в табл. 2 [13]. Уравнение состояния материала диска задавалось в форме Ми — Грюнайзена, а механическое поведение описывалось моделью Мизеса.

В табл. 3 приведены результаты расчетов установившейся скорости метания дисков. Видно, что численные расчеты хорошо воспроизводят экспериментальные данные: отличие не превосходит 3 %.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения JWL

Состав	A, ГПа	B, ГПа	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	Γ	E <sub>0</sub> , ГПа
А-3	611.3	10.65	4.4	1.2	0.32	8.9
С-4	609.8	12.95	4.5	1.4	0.25	9.0

Таблица 3  
Расчетные и экспериментальные данные  
по скорости метания дисков

Условия взрыва	Скорость диска, м/с	
	расчет	эксперимент
0.04 кг С-4 в воздухе	27	27 ± 0.27
0.04 кг С-4 на бронеплите	30.96	31 ± 0.32
0.72 кг А-3 в воздухе	153.16	154 ± 1.54
0.72 кг А-3 на бронеплите	176	180 ± 1.8

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОДРЫВА  
НА ИМПУЛЬС ВЗРЫВА**

Для установления влияния воздушного зазора на импульс, передаваемый преграде, были проведены численные расчеты в следующей постановке: сферический заряд ВВ массой 1 кг и радиусом  $r_0 = 53$  мм, располагавшийся на расстоянии  $H$  от преграды (абсолютно жесткой стенки), инициировался из своего центра (рис. 4). В качестве ВВ выбран состав А-3. На преграде располагались эйлеровы датчики давления, каждый из которых записывал давление  $p(t)$ , действовавшее на жесткую стенку. Путем интегрирования полученной зависимости  $p(t)$  определялся удельный импульс. В расчетах варьировались размер преграды и расстояние от заряда до жесткой стенки. В силу симметрии задачи расчеты проводились в двумерной осесимметричной постановке.

На рис. 5 показаны рассчитанные распределения полного импульса, действующего на преграду, в зависимости от относительного размера преграды  $R_{пр}/r_0$ , где  $R_{пр}$  — радиус жесткой стенки (диск на рис. 3). Из ана-

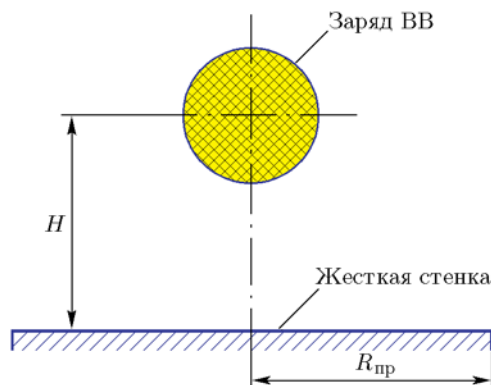


Рис. 4. Расчетная схема к определению влияния воздушного зазора

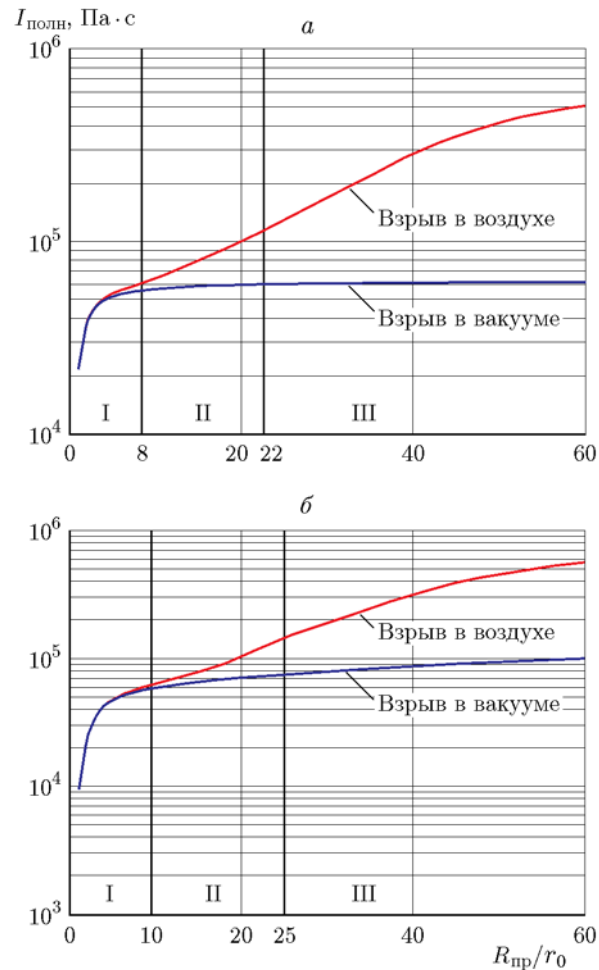


Рис. 5. Зависимость полного импульса от размера преграды при  $H = r_0$  (а) и  $H = 2r_0$  (б)

лиза этих зависимостей можно сделать вывод, что при размере преграды меньше  $8r_0$  основное воздействие на нее оказывает поток ПД (область I), влиянием воздуха в этом случае можно пренебречь, так как отличие импульсов при взрыве заряда в воздухе и в вакууме составляет менее 10 %. В диапазоне расстояний  $8r_0 \div 22r_0$  наблюдается совместное действие ПД и УВ на преграду (область II). При  $R_{пр}/r_0 > 22$  (область III) основной вклад в импульс дает УВ, продуктами детонации можно пренебречь. С увеличением расстояния  $H$  от центра заряда до преграды области I и II увеличиваются.

При размере преграды, меньшем или равном  $8r_0$  (границе области I), для расчета импульса взрыва можно воспользоваться известными аналитическими зависимостями, описанными в [15]. При этом импульс, действующий на преграду, выражается формулой

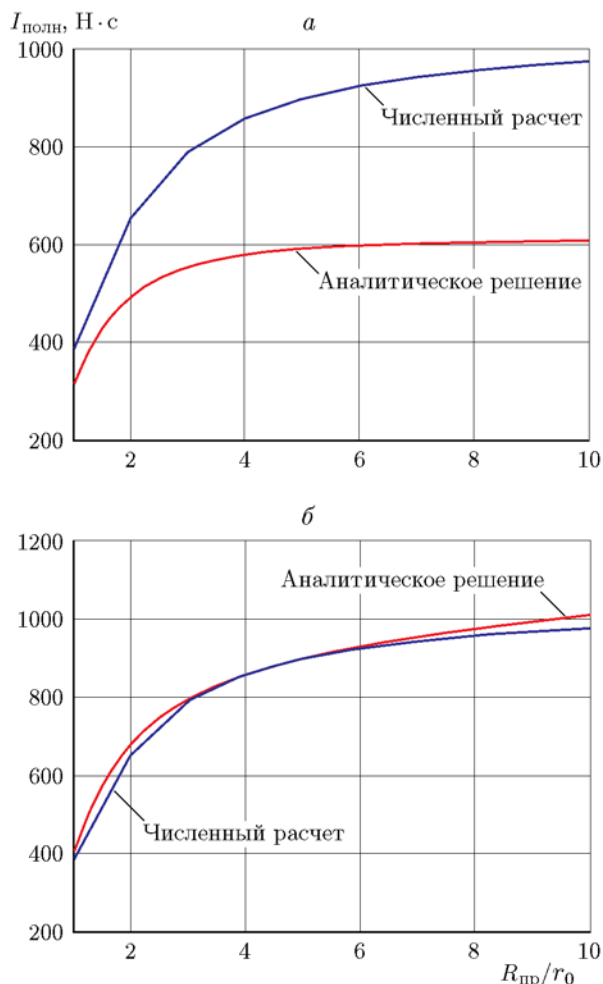


Рис. 6. Сравнение инженерных и численных расчетов

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{полн}}}{4} \frac{R_{\text{пр}}^2}{H^2 + R_{\text{пр}}^2},$$

где  $I_{\text{полн}}$  — полный импульс взрыва,  $R_{\text{пр}}$  — радиус преграды,  $H$  — расстояние от центра заряда до преграды. Приведенная зависимость не учитывает характер взаимодействия ПД и преграды, поэтому при сравнении с численными расчетами возникает серьезное расхождение (рис. 6,а). Для согласования результатов инженерных и численных расчетов предлагается использовать корректирующую зависимость

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{полн}}}{4} \frac{R_{\text{пр}}^2}{H^2 + R_{\text{пр}}^2} K \left[ \frac{R_{\text{пр}}}{r_0} \right],$$

$$K \left[ \frac{R_{\text{пр}}}{r_0} \right] = \left\{ 1 + 0.3 \left[ \frac{R_{\text{пр}}}{r_0} \right]^{0.38} \right\}.$$

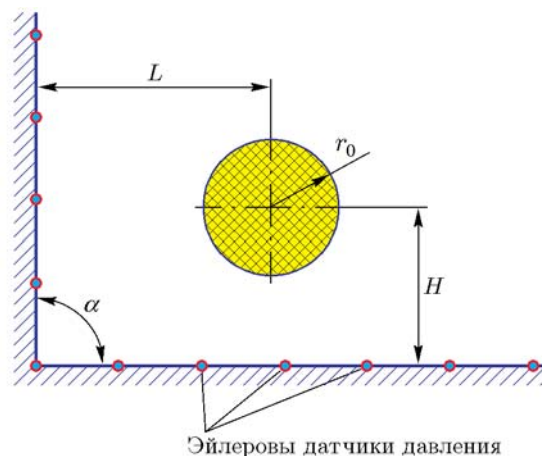


Рис. 7. Постановка задачи о влиянии дополнительной отражающей поверхности

После введения корректирующей функции  $K$  погрешность инженерного расчета по сравнению с численным не превышает 5 % (рис. 6,б).

Для установления влияния дополнительных отражающих поверхностей на импульс взрыва, в первом приближении, была проведена серия модельных численных расчетов в двумерной плоской (бесконечно длинный цилиндрический заряд) и в трехмерной (сферический заряд) постановках. Расчетная схема приведена на рис. 7. В качестве ВВ выбран заряд тротила диаметром 100 мм, инициируемый из центра и находящийся на разных расстояниях от двух взаимно перпендикулярных жестких поверхностей. На этих поверхностях располагались эйлеровы датчики, каждый из которых записывал давление  $p(t)$ , действовавшее на жесткую стенку. Путем интегрирования зависимости  $p(t)$  определялся удельный импульс положительной фазы сжатия  $i$ . Полный импульс, действующий на поверхность, определялся как

$$I = dS \sum i,$$

где  $dS$  — площадка, на которую действует давление  $p$ . В расчетах варьировались расстояния  $L$  и  $H$ .

На рис. 8 приведены типичные ударно-волновые картины, возникающие при взрыве заряда ВВ около двух жестких стенок. После инициирования заряда по нему распространяется детонационная волна, в момент выхода которой на границу ПД — воздух происходит распад контактного разрыва и в ПД уходит волна разрежения, а в воздух — ударная

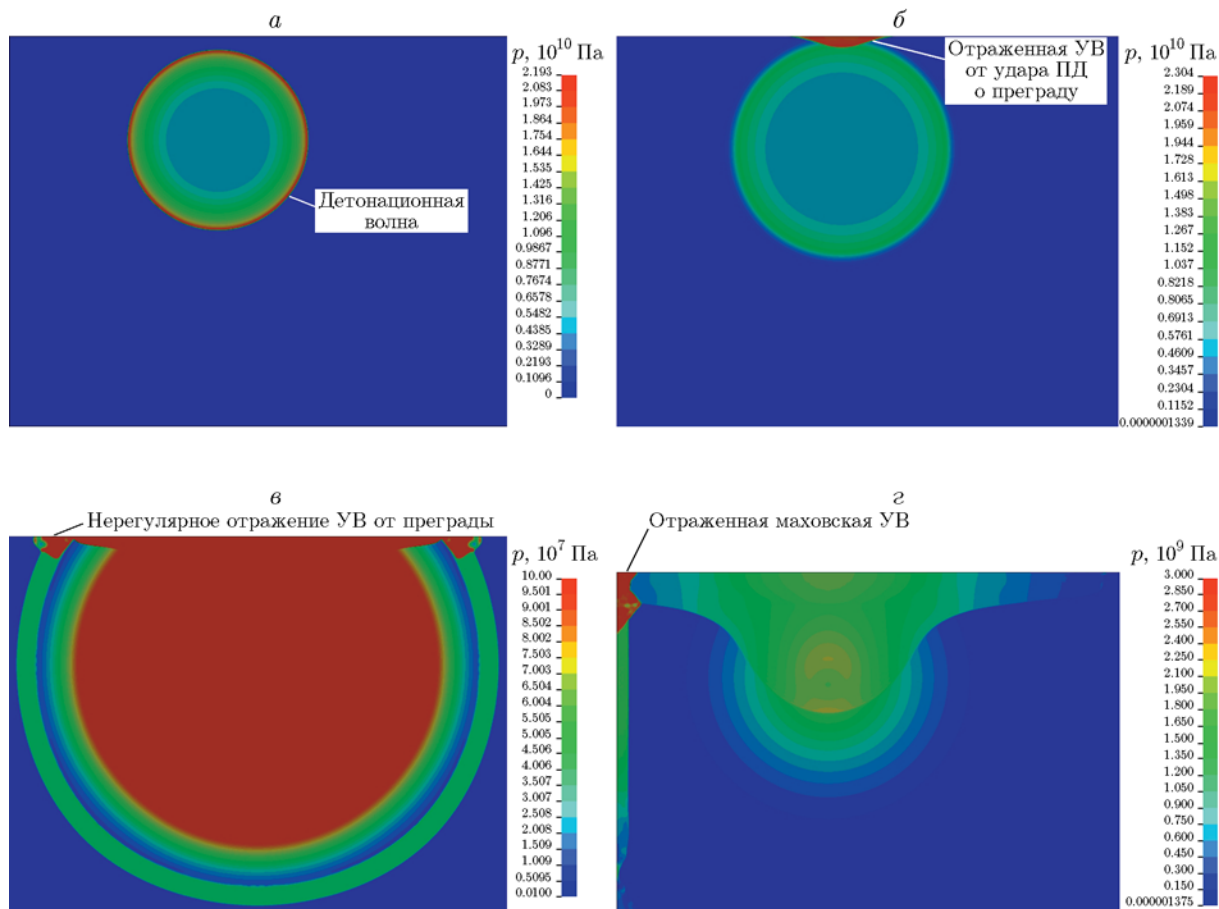


Рис. 8. Поля давления в моменты времени  $t = 6.5$  (а),  $8.5$  (б),  $14$  (в),  $24$  мкс (г)

волна (рис. 8,а). Вначале наблюдается регулярное отражение воздушной УВ от преграды (рис. 8,б,в), затем оно становится нерегулярным и возникает тройная «маховская» конфигурация, состоящая из падающей, отраженной и головной УВ. Эта система волн достигает вертикальной преграды и начинает взаимодействовать с ней: воздушная УВ последовательно отражается от преграды и набегающего потока продуктов детонации (рис. 8,г), в результате множественных переотражений маховской УВ с преградой и продуктами детонации формируется вторичная маховская волна, параметры в которой на порядок превышают параметры падающей воздушной УВ. На рис. 9 приведены зависимости  $p(t)$ , построенные по показаниям нескольких датчиков давления на подстилающей поверхности, которые также подтверждают описанную ударно-волновую картину.

В табл. 4, 5 приведены результаты расчета коэффициентов влияния боковой стенки на импульс взрыва, воспринимаемый преградой,

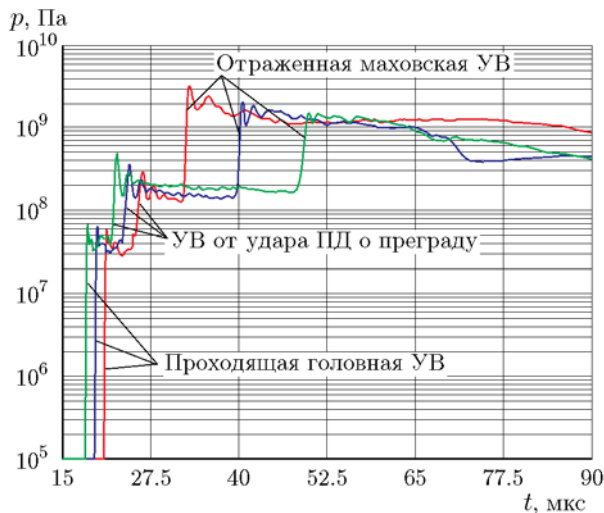


Рис. 9. Зависимости  $p(t)$ , регистрируемые эйлеровыми датчиками давления

которые равны отношению импульса при наличии дополнительной отражающей поверхности

Таблица 4  
Коэффициенты влияния дополнительной стенки на импульс взрыва от сферического заряда

$L/r_0$	$I_{\text{доп}}/I_1$ при $H/r_0$			
	1	2	3	4
1	1.438	1.282	1.275	1.274
2	1.324	1.244	1.284	1.321
3	1.226	1.229	1.267	1.316
4	1.168	1.205	1.242	1.290

Таблица 5  
Коэффициенты влияния дополнительной стенки на импульс взрыва от цилиндрического заряда

$L/r_0$	$I_{\text{доп}}/I_1$ при $H/r_0$			
	1	2	3	4
1	1.361	1.353	1.43	1.544
2	1.337	1.382	1.464	1.546
3	1.325	1.364	1.453	1.549
4	1.307	1.342	1.425	1.526

( $I_{\text{доп}}$ ) к импульсу  $I_1$ , воспринимаемому одиночной поверхностью, для цилиндрического и сферического зарядов ВВ соответственно. Из них следует, что максимальный прирост импульса для обоих вариантов симметрии не превосходит значения 1.6.

## ВЫВОДЫ

В работе представлена физико-математическая модель воздействия взрыва зарядов взрывчатого вещества на элементы конструкций. Тестирование модели проведено с использованием как известных экспериментальных данных, так и собственных результатов. Показано, что максимальное расхождение по избыточному давлению не превосходит 13 %, а расхождение скоростей метаемых взрывом стальных дисков не больше 3 %, что можно считать хорошим совпадением с экспериментом.

Была решена задача о влиянии на импульс, передаваемый преграде взрывом близко расположенного заряда взрывчатого вещества, наличия или отсутствия воздушного зазора. Установлено, что при размерах преграды порядка  $8 \div 10$  радиусов заряда основной вклад в импульс вносит удар продуктов детонации. На расстояниях  $10 \div 25$  радиусов заря-

да наблюдается совместное действия ударных волн и продуктов детонации, а на расстояния свыше 25 радиусов заряда основной прирост импульса происходит за счет воздушной ударной волны.

Расчеты по определению влияния на импульс взрыва дополнительных отражающих поверхностей показали, что максимальный прирост импульса для сферического заряда не превосходит 44 %, для бесконечно длинного цилиндрического заряда — 55 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пинаев А. В., Кузавов В. Т., Кедринский В. К. Структура ударных волн в ближней зоне при взрыве пространственных зарядов в воздухе // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 5. — С. 81–90.
2. Лебедев М. А., Лебедев Д. М. Влияние формы преграды на ее стойкость к действию взрыва // VII Забабахинские научные чтения: тр. междунар. конф. — 2003. — С. 1–7.
3. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
4. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. Фугасные эффекты взрывов. — СПб.: Полигон, 2002.
5. Адушкин В. В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе // ПМТФ. — 1963. — № 5. — С. 107–114.
6. Овчинников А. Ф., Марков В. А., Маркин В. Т., Плахов С. И., Пусев В. И., Иванов В. Н. Поле давлений при взрыве в воздухе конденсированных ВВ на малых расстояниях // Оборон. техника. — 2003. — Вып. 3-4. — С. 42–44.
7. Held M. Near field blast load // Propell., Explos., Pyrotech. — 2002. — V. 27, N 4. — P. 244–246.
8. Held M. Comparison of rectangular and round momentum gauges for blast impulse measurements // Propell., Explos., Pyrotech. — 2002. — V. 27, N 5. — P. 279–283.
9. Held M. Improved momentum method // Propell., Explos., Pyrotech. — 2001. — V. 26, N 6. — P. 290–295.
10. Гельфанд Б. Е., Воскобойников И. М., Хомик С. В. Регистрация положения фронта ударной волны в воздухе // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 6. — С. 138–140.
11. Aquelet N. ALE adaptive mesh refinement in LS-DYNA // 12 Int. LS-DYNA Users Conf. — URL: <https://www.dynalook.com/12th-international-ls-dyna-conference/fsi-ale23-a.pdf> (дата обращения 15.09.2018).
12. Hallquist J. O. LS-DYNA Theory Manual. — Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.

13. **Физика** взрыва / С. Г. Андреев и др. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.
14. **Ермолович Е. И., Ильин В. П., Кожевников В. Г., Михайлюкова А. И., Севастьянов А. Б.** Коэффициенты уравнения состояния продуктов детонации в форме JWL для ряда взрывчатых материалов // XI Забабахинские научные чтения: тр. междунар. конф. — 2012. — URL: <http://www.vniitf.ru/images/zst/2012/s2/2-5.pdf> (дата обращения 25.04.2017).
15. **Саламахин Т. М.** Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок. — М.: Изд-во ВИА им. В. В. Куйбышева, 1974.

*Поступила в редакцию 01.10.2018.*

*После доработки 09.11.2018.*

*Принята к публикации 20.02.2019.*

---