

УДК 624.074.4:678.067

КОНТЕЙНЕР ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВА КОМПАКТНОГО ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА С ИНЕРТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

А. Г. Иванов, М. А. Сырунин, А. Г. Федоренко

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты экспериментального исследования эффектов дробления при взрыве и пробивной способности осколков инертных масс в виде облегающих сферический заряд взрывчатого вещества полусферических оболочек из алюминия и мягкой стали при воздействии их на плоские преграды из стали, алюминия, стальной сетки и керамзитобетона. Предложена конструкция максимально облегченного взрывостойкого контейнера сферической формы с силовой оболочкой из стали и стеклопластика, защищенной противоосколочным слоем, способного выдержать взрыв заряда взрывчатого вещества (при двукратном запасе прочности) с инертной оболочкой из стали.

В работах [1–4] показана возможность использования двухслойных сферических оболочек из стеклопластика и стали в качестве несущего корпуса максимально облегченных контейнеров, локализирующих взрыв заряда взрывчатого вещества (ВВ). Оболочки такого типа в 5–10 раз легче аналогичных оболочек из конструкционных сталей. Они обладают большой удельной взрывостойкостью (отношение массы ВВ к массе корпуса достигает 1/20–1/17), несущие слои из стеклопластика не чувствительны к масштабным эффектам энергетической природы и обладают рядом других преимуществ по сравнению с конструкциями из однородных материалов [3]. Однако использование таких силовых оболочек в защитных контейнерах ограничено вследствие того, что при воздействии высокоскоростных осколочных элементов может произойти повреждение силового слоя. Например, при взрыве в боеприпасе или террористическом взрывном устройстве заряда ВВ, окруженного инертным корпусом, происходит дробление оболочки корпуса на отдельные фрагменты (осколки), имеющие достаточно высокую скорость и пробивную способность. Таким образом, защитный контейнер, предназначенный для обеспечения безопасной эксплуатации взрывоопасного объекта (например, хранения и транспортировки), наряду с фугасным действием ударной волны и газообразных продуктов взрыва должен выдержать удары высокоскоростных осколков. В некоторых случаях необходимо сохранить не только конструктивную целостность контейнера, но и его герметичность. Поэтому контейнер наряду с герметичной силовой оболочкой должен иметь защитный противоосколочный слой [2, 5].

Основной целью данной работы является экспериментальное исследование прочности и динамической реакции сферического контейнера из стеклопластика, подкрепленного слоем стали (см. [2–4, 6]), с выбранной в макетных экспериментах противоосколочной защитой при взрыве в нем заряда ВВ с инертной оболочкой.

1. Взрывное разрушение тонкостенных металлических оболочек и их воздействие на преграды. В качестве инертной наружной оболочки, окружающей заряд ВВ сферической формы, использовались прилегающие к поверхности ВВ и состыкованные между собой без закрепления торцов полусферические оболочки постоянной толщины

Таблица 1

$M_{ВВ}$, кг	$R_{ВВ}$, мм	Δ , мм		$M_{и}$, кг		L , мм	
		Сталь	Алюминий	Сталь	Алюминий	Сталь	Алюминий
5,17	90	2,11	5,84	1,666	1,771	400 ± 15	400 ± 30
0,935	51	1,33	3,43	0,3085	0,3085	250 ± 30	250 ± 30
0,248	33	0,77	2,12	0,0564	0,0725	148	148

из стали или алюминиевого сплава, масса которых составляет около 0,3 массы ВВ. При таком соотношении масс прилегающая к ВВ оболочка отбирает максимальное количество энергии при взрыве, что можно оценить по данным [7].

Для взрывного нагружения оболочек использовались литые заряды ВВ сферической формы из сплава тротила с гексогеном ТГ 50/50, различающиеся по массе примерно в 20 раз.

В табл. 1 приведены значения радиуса $R_{ВВ}$ и массы зарядов ВВ $M_{ВВ}$, толщины Δ , расстояния от центра заряда до преграды L и массы инертных оболочек $M_{и}$ из стали ($\rho_0 = 7800 \text{ кг/м}^3$) и алюминия ($\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3$). Заряд ВВ инициировался электродетонатором в точке на поверхности либо в центре.

Для определения количества осколков и их поражающего действия, а также для изучения защитных свойств некоторых материалов на расстояниях $L \approx (4,4 \div 4,9)R_{ВВ}$ от центра заряда устанавливались преграды (экраны). Расстояния L выбраны соответствующими расстояниям от центра ВВ до стенки взрывостойкого контейнера при диаметре его полости от 300 до 800 мм, что необходимо для оценки влияния изменения масштаба на параметры, характеризующие воздействие осколков. Преграды выполнялись в виде плоских пластин толщиной h и размером $0,5 \times 0,5 \text{ м}$ из мягкой стали, алюминиевого сплава, керамзитобетона или пакета металлической сетки с размером ячеек 2 мм и диаметром проволоки 0,5 мм [5, 8]. В предварительных экспериментах при воздействии компактных масс, имитирующих высокоскоростной осколок (в качестве компактной массы использовался стальной шарик диаметром 14 мм и массой 12 г, разгоняемый до скоростей 0,8 и 1,6 км/с), указанные материалы имели достаточно высокие защитные свойства [8]. За каждой преградой (кроме преград из стали) вплотную к ней устанавливался стальной лист толщиной 2–3 мм, имитирующий защищаемую стенку. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Опыты с $M_{ВВ} = 0,248 \text{ кг}$ проведены в цилиндрических трубах (внутренний диаметр 296 мм, длина 600 мм) с внутренним слоем из стали толщиной 2 мм и наруж-

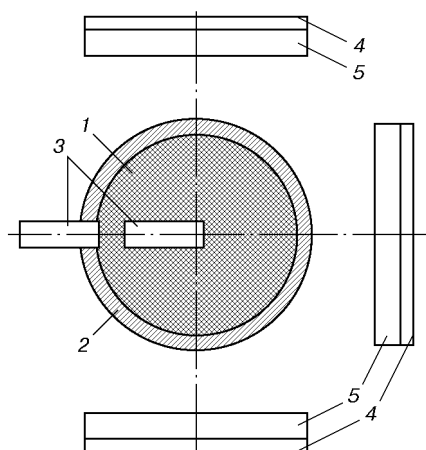


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — заряд ВВ; 2 — инертная оболочка; 3 — электродетонатор (в зависимости от условий опыта устанавливался на поверхности либо в центре заряда ВВ); 4 — стальной лист толщиной 2–3 мм; 5 — преграда

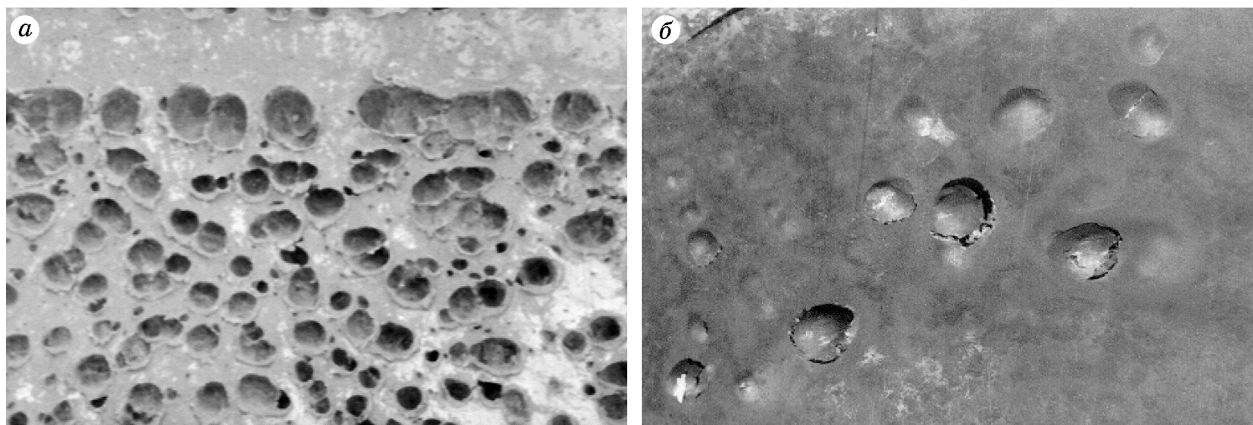


Рис. 2. Преграды из алюминиевого сплава со стороны взрыва (а) и мягкой стали с тыльной стороны (б) после нагружения в опыте 1 (табл. 4)

ным слоем из стеклопластика толщиной 9 мм, экраны других типов не использовались. Основные результаты опытов по разрушению сферических оболочек взрывом изнутри с использованием преград из различных материалов представлены в табл. 2, 3.

В опытах фиксировались скорость осколков V , количество повреждений на поверхности преграды n и максимальная глубина h_1 кратеров, образовавшихся при воздействии осколков (табл. 2), состояние преграды и защищаемой стенки (табл. 3). Фотографии преграды из алюминиевого сплава и стали после осколочного воздействия приведены на рис. 2.

В опытах с зарядами ВВ ($M_{ВВ} = 0,248; 0,935$ кг), окруженными оболочками из стали или алюминиевого сплава, проводилась рентгенографическая однокадровая съемка [9] в различные моменты времени до и после разрушения оболочек на фрагменты. Снимки, как правило, делались в двух аналогичных опытах в различные моменты времени после инициирования заряда ВВ. Результат обработки рентгеновских снимков разлета оболочки из Ст. 3 с наружным радиусом поверхности $R_0 = R_{ВВ} + \Delta$ ($R_{ВВ} = 33$ мм, $M_{ВВ} = 0,248$ кг) приведен на рис. 3 (t — время с момента подачи инициирующего импульса на детонатор до момента регистрации).

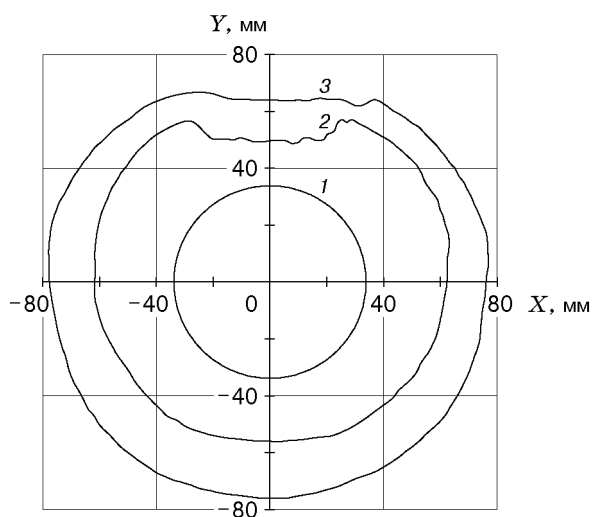


Рис. 3. Разлет сферической оболочки из Ст. 3 ($R_0 = 33,8$ мм):
1 — $t = 0$; 2 — $t = 17,05$ мкс; 3 — $t = 21,6$ мкс

Таблица 2

Номер опыта	МВВ, кг	Материал облочки	V, км/с	Стальная сетка		Алюминий		Керамзит		Сталь		n, шт.
				h, мм	h ₁ , мм	h, мм	h ₁ , мм	h, мм	h ₁ , мм	h, мм	h ₁ , мм	
1	5,17	Сталь	2,89	35-50 (40 слоев)	< 50 (< 40 слоев)	20	≥ 20	60, 80	≤ 60	10	≥ 10	4970
2	5,17	Алюминий	2,84	35-50 (25 слоев)	< 50 (< 40 слоев)	20	20-26*	50, 70	≤ 50	10	8,5	4500
3	0,935	Сталь	3,0**	20-40 (25 слоев)	< 40 (~ 20 слоев)	15	12	30, 50	30-50	8	5	3804
4	0,935	Алюминий	2,73	20-35 (25 слоев)	< 35 (< 20 слоев)	12	≥ 12	30, 50	≤ 30	10	4	3070
5	0,248	Сталь	3,01	—	—	—	—	—	—	2	≥ 2	3350
6	0,248	Алюминий	2,87	—	—	—	—	—	—	2	≥ 2	2800

Примечание. Значения h_1 в экспериментах с керамзитом и в некоторых экспериментах со стальной сеткой невозможно точно определить из-за разрушения преграды.

* Глубина кратера больше толщины вследствие образования выпуклости на тыльной стороне.

** Расчетное значение.

Таблица 3

Номер опыта (см. табл. 2)	Стальная сетка		Алюминий		Керамзит		Сталь	
	Состояние преграды	Состояние стенки за преградой	Состояние преграды	Состояние стенки за преградой	Состояние преграды	Состояние стенки за преградой	Состояние преграды	Состояние стенки за преградой
1	Сквозные пробоины части слоев	Повреждений нет	Кратеры, без сквозных пробоин	Вмятины	Разрушена	Повреждений нет	Кратеры, откольные отслоения	Стенка отсутствовала
2	То же	То же	То же	То же	То же	То же	Кратеры, без сквозных пробоин	То же
3	//	//	Кратеры, без пробоин, откольные отслоения	//	//	Сквозные пробоины за слоем толщиной 30 мм	То же	//
4	//	//	Кратеры, без сквозных пробоин	//	//	Повреждений нет	//	//
5	—	—	—	—	—	—	Сквозные пробоины	На стенке из стеклопластика сквозные пробоины отсутствуют
6	—	—	—	—	—	—	То же	То же

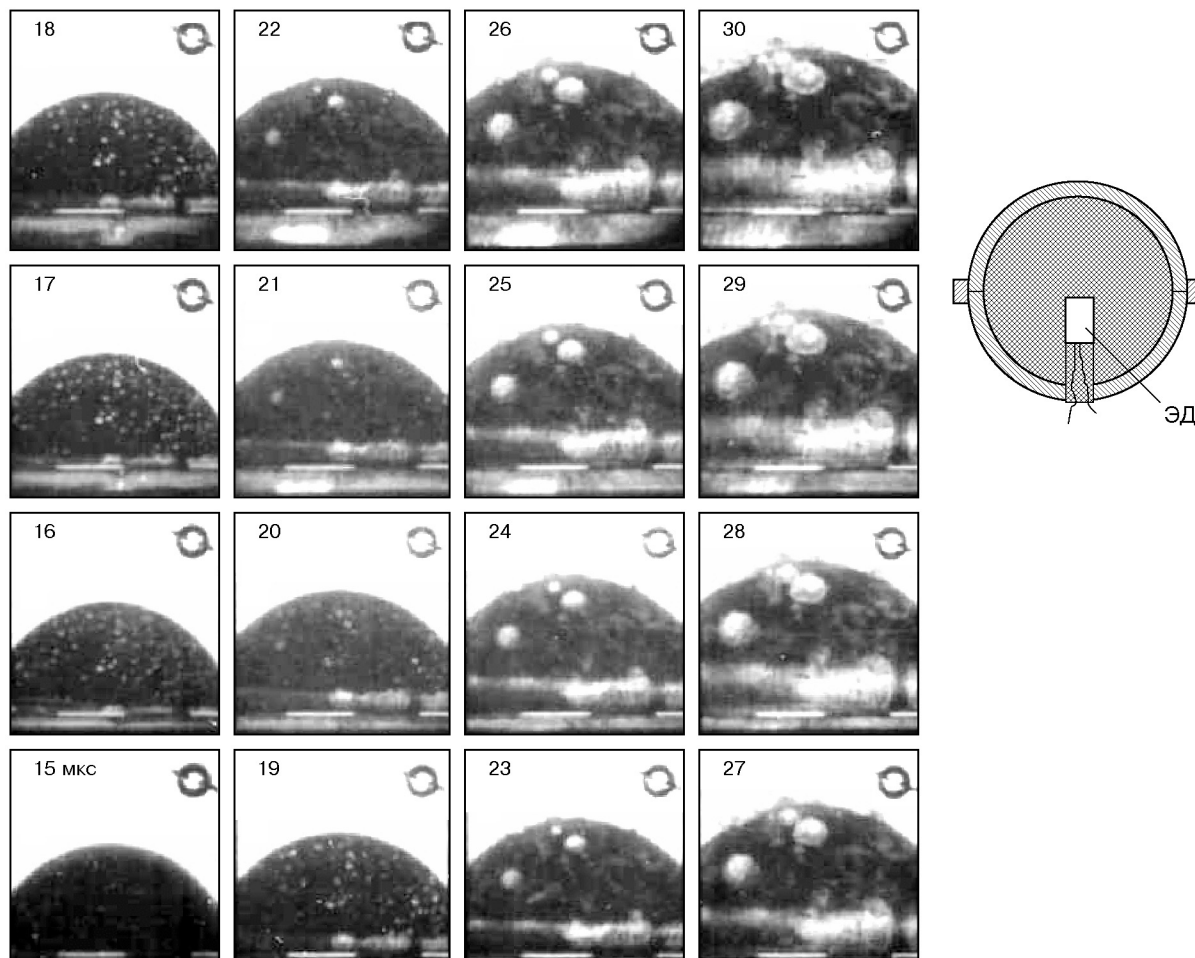


Рис. 4. Кинограмма разлета и разрушения стальной оболочки со сменой кадров через 1 мкс (ЭД — электродетонатор, инициирование заряда ВВ из центра, $R_{ВВ} = 90$ мм, $\Delta = 2,11$ мм, опыт 1 (табл. 2))

В опытах с зарядами ВВ ($M_{ВВ} = 5,17$ кг) регистрировалось расширение оболочки после взрыва заряда ВВ на скоростном фотохронографе в режиме “лупы времени” [10]. Кинограмма разрушения оболочки из стали представлена на рис. 4.

Средние значения скоростей осколков стальной и алюминиевой оболочек V составили 2,7–3,0 км/с (см. табл. 2) и, как и в [7], практически одинаковы для оболочек из различных материалов. Оболочка достигает максимальной скорости на начальном этапе движения за несколько микросекунд, и в дальнейшем скорость оболочки и образующихся из нее осколков увеличивается незначительно.

При инициировании заряда ВВ из центра и с поверхности разлет не был радиально-симметричным вследствие особенностей инициирования и разгрузки на линии стыка полусферических оболочек. При обработке результатов проводились вычисления осредненной радиальной скорости разлета оболочки. Оценки, выполненные с учетом полученных значений средней скорости, показывают, что кинетическая энергия расширяющейся оболочки составляет 21,5–28,9 % общей энергии, выделившейся при взрыве заряда ВВ.

Количество осколков n , образующихся при взрыве, оценивалось по произведению количества кратеров на преградах N_{Π} на коэффициент $4\pi R^2/S_{\Pi}$ (R — расстояние от цен-

тра ВВ до преграды; $S_{\text{п}}$ — площадь центральной проекции преграды на сфере радиуса R) (см. табл. 2). Для опытов, в которых роль преграды выполняла труба (см. табл. 2, опыты 5, 6), количество осколков оценивалось по количеству кратеров на центральной кольцевой полосе стальной трубы шириной 50 мм с пересчетом на полный стереоугол. Более подробный анализ результатов этих опытов приводится в [11], в настоящей работе представлены только основные данные, которые используются для оценки параметров противоосколочной защиты.

Выявлены следующие особенности разрушения сферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении:

- образование концентрических кольцевых рядов осколков (см. рис. 2, *a*);
- незначительное изменение скорости и количества осколков в зависимости от азимутального угла (см. рис. 2, *a*; 3);
- различные размеры осколков и зависимость от этих размеров пробивной способности (глубины кратеров).

При инициировании заряда ВВ из центра или с поверхности количество образующихся осколков (в пределах погрешности оценки) и их пробивная способность примерно одни и те же.

Из экспериментов следует, что при близких значениях массы инертных оболочек и начальной скорости разлета большей пробивной способностью обладают осколки оболочки из мягкой стали по сравнению с осколками оболочки из алюминия (см. табл. 2).

Кроме того, на экранах из однородного материала наряду с кратерами, образующимися при воздействии осколков (см. рис. 2, *a*), с тыльной стороны напротив отдельных кратеров образуются откольные повреждения в виде выпуклости с частичным или полным отрывом слоя материала толщиной примерно 1–2 мм (см. рис. 2, *b*). Несмотря на отмеченные повреждения или полное разрушение, все материалы, используемые в качестве защитных противоосколочных слоев, позволяют погасить значительную часть кинетической энергии осколков за счет выбранной толщины и обеспечивают отсутствие повреждений защищаемого слоя.

Из табл. 2 следует, что при увеличении масштаба сборки в 2,7 раза количество осколков стальных и алюминиевых оболочек увеличивается в 1,5–1,6 раза, что указывает на наличие масштабных эффектов при взрывном дроблении, отмеченных в [12]. Уменьшение относительного размера фрагментов при увеличении масштаба, по-видимому, обусловлено зависимостью удельной энергии разрушения от масштаба и динамического предела текучести от скорости деформации.

2. Результаты взрывных испытаний контейнера. Схема испытываемого взрывостойкого контейнера приведена на рис. 5. Исследовались контейнеры, состоящие из силовой оболочки, аналогичной испытанной в экспериментах [4], и противоосколочного слоя. Силовая оболочка имела внутренний слой из мягкой стали (Ст. 20 толщиной 3 мм с наружным диаметром 500 мм), на который снаружи наматывался слой из ориентированного стеклопластика толщиной 14–24 мм на основе магнезиально-алюмосиликатного стекловолокна (диаметр элементарной нити 0,01 мм, плотность $\rho = 2490 \text{ кг/м}^3$, разрушающее напряжение $\sigma_p = 4,4 \text{ ГПа}$, предельная деформация 4,6–5,4 %, модуль Юнга $E = 94,75 \text{ ГПа}$). Намотанный слой представляет собой ряд лент, состоящих из жгутов (марки РВМПН 10-1200-78), пропитанных связующим (эпоксидной смолой ЭДТ-10). Как и в [4], испытывались слои стеклопластика с двумя типами армирования: 1) с постепенным увеличением толщины стеклопластика от экватора к горловине; 2) с почти постоянной толщиной [6]. Противоосколочный слой размещался по всей внутренней поверхности силовой оболочки и на защитных крышках горловин. На основании результатов экспериментов, описанных выше, а также с учетом технологии изготовления и стоимости в качестве противоосколочной защиты для контейнеров были выбраны алюминиевый сплав Ал-9 (вариант А на

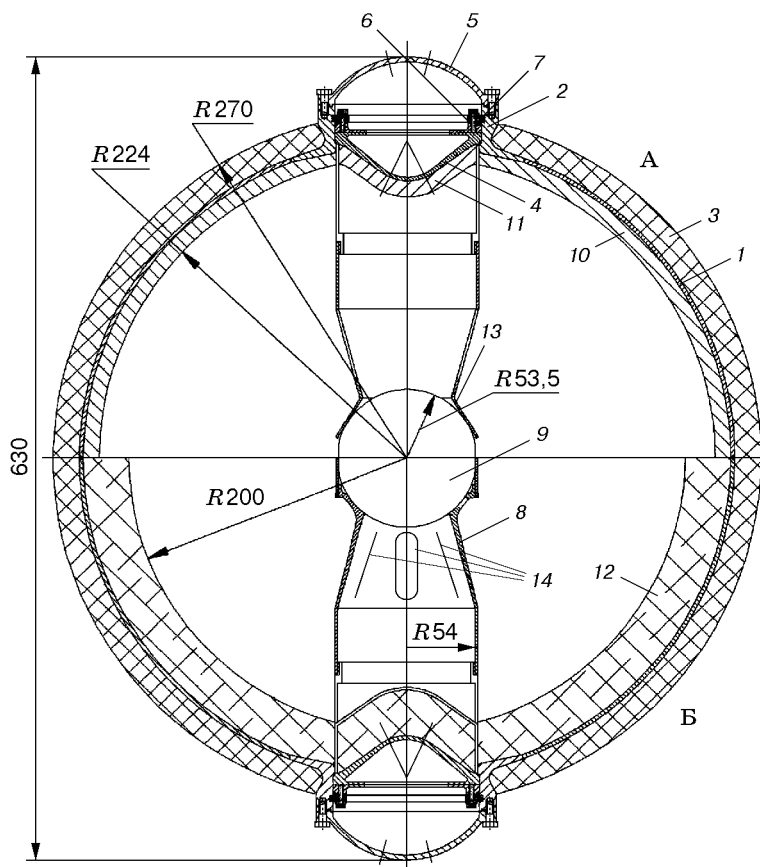


Рис. 5. Схема взрывостойкого контейнера:

А — с алюминиевым защитным противоосколочным слоем толщиной 12 мм; Б — с керамзитобетонным слоем толщиной 40 мм; 1 — стальная оболочка; 2 — горловина; 3 — оболочка из стеклопластика; 4 — крышка; 5 — защитный колпак; 6 — фиксирующее кольцо; 7 — запорное кольцо; 8 — упрочненная опора; 9 — сферический заряд ВВ с оболочкой из стальных полусфер; 10–12 — защитный противоосколочный слой; 13 — неупрочненная опора; 14 — отверстия в конусах для уменьшения взрывной нагрузки на крышки и горловины

рис. 5) и керамзит, скрепленный раствором цемента (вариант Б). В повторном опыте с керамзитом его плотность была увеличена.

Диаметр отверстий горловин составлял 109 мм (0,218 диаметра базовой стальной оболочки). Люки горловины закрывались высокопрочными крышками [13], опирающимися на разрезное кольцо, фиксируемое запорным кольцом. Объект нагружался взрывом заряда взрывчатого вещества сферической формы, окруженного стальной оболочкой и расположенного в центре полости контейнера. В первых двух опытах ВВ инициировалось на поверхности сферы, в третьем — в центре сферы. Использовались три варианта подвески заряда ВВ: два варианта конических опор из алюминиевого сплава (профиль которых показан на рис. 5) и металлическая шпилька с зарядом на ней, зафиксированным с помощью чехла из ткани. Полость модели заполнялась воздухом при атмосферном давлении.

В экспериментах регистрировались деформации оболочки и горловин во времени $\varepsilon(t)$ методом скоростной фоторегистрации и тензометрирования, а также нагрев стального слоя корпуса аналогично тому, как это сделано в [4]. Значения параметров испытываемых контейнеров (плотность защитного противоосколочного слоя ρ , масса корпуса без противо-

Таблица 4

Номер опыта	ρ , кг/м ³	$2R_H$, мм	M_K , кг	M , кг	M_H , кг	M_{BB} , кг	$\dot{\varepsilon}_m$, с ⁻¹	ε_y , %	t_y , мкс	ε_x , %	t_x , мкс	ε_T , %	t_T , мкс	T , °С	t_T , с
1	2700	526	47,6	76,5	0,227	0,935	320	2,6	260	0,9	160	0,4	235	220	~ 100
2	815	532	48,2	72,5	0,406	0,933	255	2,5	310	1,3	275	0,85	245	—	—
3	1160	535	47,1	78,0	0,287	0,944	275	2,2	300	1,5	310	1,2	245	55	~ 1600

Примечание. В опыте 1 использовались оболочка с первым типом армирования и подвеска А (см. рис. 5); в опыте 2 — оболочка со вторым типом армирования и подвеска Б (см. рис. 5); в опыте 3 — оболочка со вторым типом армирования и подвеска в виде металлической шпильки, защитный слой выполнен из керамзита.

осколочной защиты M_K , полная масса корпуса M , наружный диаметр корпуса $2R_H$) и заряда ВВ (сплав ТГ 50/50) с инертным окружением (масса заряда M_{BB} , масса стальных полусфер M_H), а также основные данные опытов представлены в табл. 4. По результатам измерений с погрешностью не более 10% приведены осредненные по 2–4 измерениям значения следующих параметров: максимальные окружные ε_y и меридиональные ε_x деформации, которые достигались в центральном экваториальном сечении оболочки из стеклопластика, и максимальная деформация горловины ε_T , максимальное увеличение температуры T на наружной поверхности стального слоя корпуса и соответствующие времена t_y , t_x , t_T , t_T с момента начала инициирования ВВ до достижения максимальных деформаций и температуры. По формуле $\dot{\varepsilon}_m = \max(d\varepsilon_y(t)/dt)$ вычислялась максимальная скорость окружной деформации. Осциллограммы окружной деформации на экваторе приведены на рис. 6. Там же приведены осциллограммы, полученные в опытах со сферическими контейнерами при взрыве заряда ВВ без инертного окружения ($M_{BB} = 1,4$ кг в тротиловом эквиваленте) [4].

В результате экспериментов установлено следующее. Как в опытах с ВВ без инертного окружения, так и в описываемых опытах при мощности взрыва ВВ массой до 1,0–1,4 кг в тротиловом эквиваленте силовой корпус сохраняет конструкционную целостность. Изме-

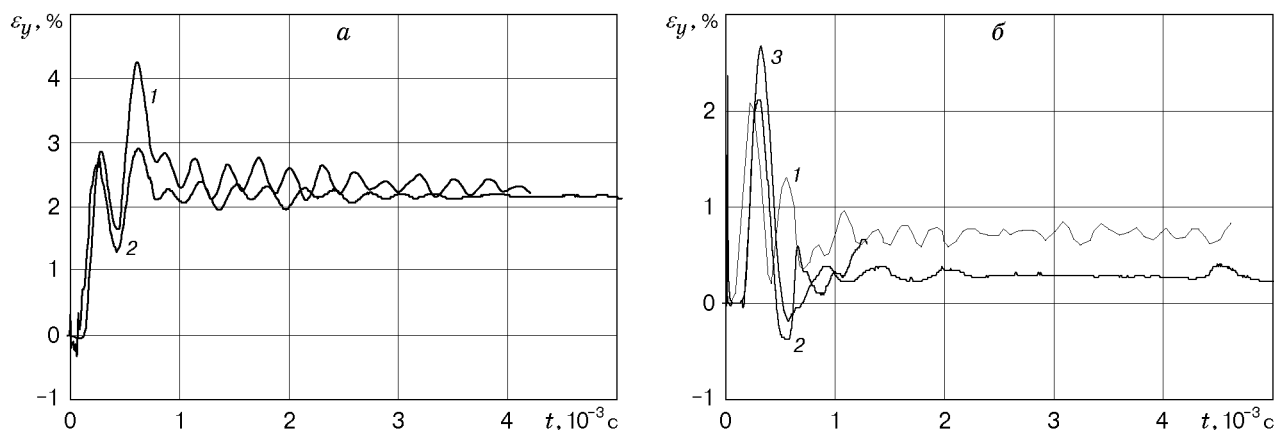


Рис. 6. Осциллограммы динамических окружных деформаций корпуса на экваторе: а — первый тип армирования: 1 — данные [4], 2 — опыт 1 (табл. 4); б — второй тип армирования: 1 — данные [4], 2 — опыт 3 (табл. 4), 3 — опыт 2 (табл. 4)

ния его диаметра и длины незначительны (в опыте 1 (табл. 4) остаточное увеличение диаметра составило 1,2 %, длины — 0,26 %, в опыте 2 увеличение диаметра составило 0,11 %, в опыте 3 диаметр увеличился на 0,24 %, длина — на 0,78 %). Лишь в опыте 2 (табл. 4) произошел отрыв одной из горловин, и в зоне отрыва наблюдалось повреждение силового слоя (стеклопластика). Отрыв горловины, по-видимому, произошел из-за локального увеличения нагрузки (фокусировки), обусловленного особенностью конструкции, использованной в этом опыте (более тяжелая и жесткая подвеска заряда и инертное окружение, масса которого увеличена в 1,4 раза). Так, в опыте 3 в отличие от опыта 2 при использовании подвески ВВ на шпильке и инерта, масса которого уменьшена с 0,406 кг до 0,287 кг, разрушения (отрыва горловины) не произошло (табл. 4). Отметим, что в опыте 2 (табл. 4) в опорах отсутствовали отверстия (см. рис. 5), предназначенные для исключения увеличения нагрузки на горловины при использовании жесткой и прочной подвески ВВ. Возможность местного увеличения газодинамической нагрузки на крышку в прочной подвеске (см. рис. 5, вариант Б) была подтверждена расчетами и макетными экспериментами.

Максимальные динамические деформации корпуса были меньше в оболочке со вторым типом армирования, достигались на экваторе и не превышали 2,2–2,5 % (табл. 4), что на 27–35 % меньше минимальных предельных динамических деформаций (3,4 %) для аналогичных цилиндрических оболочек [3, 14].

В [14, 15] в опытах с цилиндрическими оболочками установлено, что предельная деформация динамического растяжения ориентированных стеклопластиков слабо зависит от масштабного эффекта, структуры армирования (при наличии слоев с волокнами, расположенными в направлении растяжения), а также от степени двухосности напряженного состояния при характерных скоростях деформации 10^2 – 10^3 с⁻¹. Эти выводы подтверждены в экспериментах [4], в которых в сферических оболочках с первым типом армирования стеклопластика без разрушения были достигнуты максимальные деформации до 4,9 %. Если предельная деформация оболочки второго типа также не менее 4,9 %, получим запас прочности не ниже 1,9–2,3.

Динамическая реакция корпуса при наличии противоосколочного слоя аналогична реакции корпуса без этого слоя. Однако возбужденные колебания в случае противоосколочного слоя из керамзитобетона имеют более низкую частоту и более быстро (за 1–2 мс) затухают (см. рис. 6). Установившийся уровень деформаций для обоих типов защитного слоя и армирования оболочки, как правило, ниже, чем в опытах с безосколочным взрывом, что обеспечивает большую прочность при квазистатической фазе нагружения остаточным давлением.

Максимальные окружные деформации горловин меньше, чем на корпусе, и составляют не более 1,0–1,5 % (это подтверждается данными [4]), а величина остаточной деформации — не более 0,7 %. Такие деформации не могут нарушить сцепление разрезных опорных колец, удерживающих крышки люков, с пазом в горловине. В то же время в опыте 2 (табл. 4) отрыв горловины не оказывал влияния на ее деформацию при динамическом расширении. Наблюдавшееся в этом опыте одновременное разрушение крышек, опорных (разрезных) колец и сварного шва крепления горловины к корпусу свидетельствует о почти одинаковой прочности указанных элементов. В [13] аналогичная высокопрочная крышка была испытана в открытой полусферической полости с диаметром 500 мм, равным диаметру оболочки контейнера, на воздействие взрыва шара ВВ из сплава тротила с гексогеном массой 2,6 кг. При этом в крышке возникла лишь остаточная деформация менее 1 %, что свидетельствует о надежности узлов герметизации контейнера.

Из результатов измерений температуры следует, что для уменьшения тепловых нагрузок на силовой слой предпочтительной является противоосколочная защита из керам-

зитобетона, при использовании которой нагрев стального слоя не превышает 55–80 °С. Эта температура в 2 раза ниже температуры при термообработке стеклопластика, необходимой для полимеризации эпоксидной смолы связующего, и поэтому не приводит к его разрушению. Следует отметить, что максимальное квазистатическое давление продуктов взрыва из-за теплоотдачи стенке быстро уменьшается, и на прогретый силовой слой из стеклопластика действует давление, намного меньшее, чем вначале.

Из анализа результатов опыта 1 (табл. 4) следует, что нагрев стального слоя корпуса до 220 °С мог быть вызван дополнительным энерговыделением вследствие алюмотермических реакций с кислородом распыленного взрывом алюминия, содержащегося в деталях подвески и слое противоосколочной защиты. Однако такое объяснение нагрева корпуса до указанной температуры требует более детального исследования и выходит за рамки настоящей работы. Тем не менее данный вариант защиты корпуса в эксперименте обеспечил его несущую способность и герметичность (даже при использовании менее прочного первого типа намотки композитного слоя).

Из результатов экспериментов с плоскими преградами из стали и алюминия следует, что при воздействии осколков в них имелись откольные повреждения. Согласно данным [12] стеклопластик имеет небольшую откольную прочность в направлении, нормальном к поверхности оболочки контейнера, а в этом направлении в стенке распространяются ударные волны, генерируемые осколками. Поэтому в стеклопластике могли произойти отколы. Однако при испытании контейнера с защитой из алюминиевого сплава, контактирующего с двухслойным корпусом, каких-либо видимых повреждений наружного композитного слоя не произошло. Поэтому, поскольку при близких массах прочность металлического слоя больше по сравнению с керамзитом, возможно его использование в конструкции взрывозащитного контейнера в качестве как силового и герметизирующего слоев, так и слоя противоосколочной защиты.

В опыте 3 (табл. 4), в котором внутри полости алюминия не было, при близком к предельному взрывном центрально-симметричном нагружении получено подтверждение прогнозируемой динамической и квазистатической прочности, а также герметичности конструкции взрывостойкого контейнера.

3. Выводы. Таким образом, представленные экспериментальные данные по дроблению и последующему разлету осколков инертной тонкостенной сферической оболочки из мягкой стали или алюминиевого сплава при взрыве зарядов ВВ сферической формы позволяют получить оценки некоторых параметров образующихся осколков. Средние значения скоростей фрагментов стальной и алюминиевой оболочек составили 2,7–3,0 км/с, количество осколков в зависимости от размера и материала оболочки — 2800–5000 шт. Выявлены некоторые особенности дробления оболочек из мягкой стали и алюминия. Однако для более точного определения размеров и масс осколков необходимо провести эксперименты с улавливанием без дополнительного разрушения всех осколков.

Из результатов проведенных опытов следует, что высокоскоростные осколки обладают достаточно большой пробивной способностью и могут приводить к откольному повреждению преграды из однородного материала. Установлено, что при близких удельных массах осколки стальной оболочки обладают большей пробивной способностью, чем осколки алюминиевой.

Показано, что защитные преграды из мягкой стали, алюминиевого сплава, керамзитобетона и проволочной мелкоячеистой сетки выбранной толщины при увеличении масштаба сборки в 2,7 раза позволяют уловить практически все образующиеся при взрыве осколки инертного материала.

На основании результатов экспериментальных исследований предложена конструкция взрывостойкого контейнера, который может быть использован при эксплуатации взрыв-

чатых материалов, боеприпасов, в том числе ядерных [17], а также при эвакуации поврежденных боеприпасов и террористических взрывных устройств.

Авторы выражают благодарность Л. И. Кочкину, А. А. Порфирьеву, А. П. Цою за помощь при проведении первой части работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ivanov A. G., Syrunin M. A., Fedorenko A. G.** Dynamic strength of spherical shells under internal explosive loading // *Rev. High Pressure Sci. Technol.* 1998. V. 8, N 4. P. 302–305.
2. **Syrunin M. A., Fedorenko A. G., Ivanov A. G.** The explosion-proof container, satisfying the IAEA norms on safety // *Proc. of the 12th Intern. conf. on the packaging and transportation of radioactive materials (PATRAM-98)*, Paris, France, May 10–15, 1998. Paris: SFEN, 1998. V. 4. P. 1574–1580.
3. **Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г.** Динамическая прочность оболочек из ориентированных волокнистых композитов при взрывном нагружении (обзор) // *ПМТФ.* 1993. № 1. С. 126–133.
4. **Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г.** Динамическая прочность сферических стеклопластиковых оболочек при внутреннем взрывном нагружении // *Физика горения и взрыва.* 1995. Т. 31, № 4. С. 93–99.
5. **Pat. 4055247 US, F 42 B 37/02.** Explosion containment device / W. B. Benedick, C. J. Daniel. N 734834. Filed Oct. 22, 1976.
6. **Пат. 2009387 RU, С 1 кл. 5 F 17/00.** Способ изготовления устройства для локализации продуктов взрыва / А. Г. Иванов, М. А. Сырунин, А. Г. Федоренко. Опубл. 15.03.94, Бюл. № 5.
7. **Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Васильев Л. В. и др.** Взрывное разрушение труб // *Физика горения и взрыва.* 1974. № 1. С. 127–132.
8. **Belov G. V., Dyakin E. P., Protasov S. A., et al.** Penetration of compact steel projectiles into heterogeneous metal targets of tied-wire fabric (TWF) type // *Intern. J. Impact Engng.* 1999. N 23. P. 63–66.
9. **Геринг Дж.** Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения // *Высокоскоростные ударные явления.* М.: Наука, 1973.
10. **Дубовик А. С.** Фотографическая регистрация быстропотекающих процессов. М.: Наука, 1975. С. 63–68.
11. **Ivanov A. G., Syrunin M. A., Fedorenko A. G., Tsoi A. P.** Splitting of spherical shells at internal explosive loading // *Book of abstr. Intern. conf. on high pressure sci. and technol., Honolulu, Hawaii, July 25–30, 1999.* Honolulu: Intern. Assoc. for the Adv. of High Pressure Sci. and Technol., 1999. P. 405.
12. **Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Новиков В. Ф., Фоломеева Т. М.** Высокоскоростное разрушение тонкостенных труб из мягкой стали // *ПМТФ.* 1983. № 1. С. 112–117.
13. **Федоренко А. Г., Шимаров А. Г., Сырунин М. А.** Разработка и испытания крышки высокого давления // *ПМТФ.* 1994. Т. 35, № 2. С. 163–168.
14. **Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г.** Предельные деформации оболочек из ориентированного стеклопластика при внутреннем взрывном нагружении // *Физика горения и взрыва.* 1992. Т. 28, № 2. С. 87–93.
15. **Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г.** Влияние структуры армирования на предельную деформируемость и прочность оболочек из ориентированного стеклопластика при взрывном нагружении изнутри // *ПМТФ.* 1992. № 4. С. 130–135.

16. **Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г.** Откольная прочность намоточного стеклопластика в трех главных направлениях // Пробл. прочности. 1993. № 1. С. 82–88.
17. **Иванов А. Г., Федоренко А. Г., Сырунин М. А.** О возможности повышения безопасности ядерного оружия // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 169–171.

*Поступила в редакцию 1/IX 1999 г.,
в окончательном варианте — 10/V 2000 г.*
