

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СФЕРИЧЕСКИХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

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

*ВНИИ экспериментальной физики,
607200 Кемлер*

Экспериментально определена реакция и проведена оценка прочности стеклопластиковых сферических оболочек диаметром 500 мм двух типов намотки при радиально-симметричном внутреннем взрывном нагружении. Показано преимущество оболочки с более равномерной толщиной (15–20 мм) силового стеклопластикового слоя. Такая оболочка при взрыве заряда, эквивалентного по энергии 1,4 кг тротила, имеет примерно двукратный запас по прочности. Установлено, что переход деформирования от одно- (цилиндрические оболочки) к двухосному на сферических оболочках не изменяет величины предельной деформации.

При обращении с взрывчатыми веществами (ВВ), боеприпасами и другими взрывоопасными объектами, содержащими (в том числе) токсичные или радиоактивные вещества, большое внимание уделяется проблеме обеспечения безопасности. Один из путей решения этой проблемы при хранении и транспортировке боеприпасов — помещение их в защитные контейнеры. Применяемые в настоящее время специальные контейнеры в лучшем случае защищают боеприпасы от нормативно установленных опасных нагрузок, возникающих при падении, ударах, осколочно-пулевым воздействием, пожаре. Однако при превышении таких нагрузок исключить аварийный взрыв внутри контейнера нельзя. Это повлечет частичное или полное его разрушение, так как контейнер на данное воздействие не рассчитан. Поэтому обычные контейнеры не защищают в полной мере окружающую среду от поражения взрывом и возможного загрязнения токсичными или радиоактивными веществами, которые могут находиться в боеприпасах.

Существенно снизить эту опасность можно путем выполнения контейнера взрывостойким, т. е. способным локализовать внутри своего объема энергию взрыва. Одна из главных проблем при создании таких контейнеров — обеспечение их приемлемых (минимальных) габаритов и массы. Очевидно, что минимальной массой обладают сферические оболочки.

Конструкционные стали в таких оболочках (выполняемых сварными) при двухосном динамическом растяжении склонны к хрупкому разрушению и проявлению сильных масштабных эффектов энергетической природы [1–4]. Приведенные обстоятельства не позволяют достичь высоких показателей весового совершенства при разработке силовой оболочки взрывостойких контейнеров на базе только конструкционных сталей.

Как показано в [3–6], задача разрешима, и наиболее подходящими материалами для силовой оболочки контейнера могут служить высокопрочные композитные материалы, например на основе стекловолокна (стеклопластика). Это обусловлено следующими факторами:

- высокая удельная прочность стеклопластика, повышающаяся в динамических условиях нагружения более чем в 2 раза, при практически упругом поведении материала вплоть до разрушения;
- слабая чувствительность к дефектам и некатастрофический (непороговый) характер разрушения;

— неподверженность сильным масштабным эффектам снижения прочности энергетической природы при увеличении размеров (вследствие постоянства диаметра силовых волокон у натуре и модели);

— высокая стабильность свойств во времени при действии разупрочняющих факторов (воздействия климатических и агрессивных сред);

— высокая технологичность и повторяемость свойств материала при достаточно экономичном производстве оболочек вращения методом намотки.

Для этих материалов при исследовании цилиндрических оболочек вращения установлены [5–8] критериальные параметры для оценки несущей способности при внутреннем импульсном (взрывном) нагружении, найдена схема армирования цилиндрических оболочек, обеспечивающая наиболее высокую удельную несущую способность при внутреннем импульсном нагружении, отмечено слабое влияние повышения эластичности связующего, угла армирования и степени двухосности напряженного состояния на предельную динамическую деформируемость, определена возможность повышения удельной несущей способности оболочек путем их подкрепления изнутри слоем пластичной стали и за счет этого исключен механизм разрушения стеклопластика вследствие развития параметрической неустойчивости осесимметричных форм колебаний.

Вместе с тем, защитная цилиндрическая оболочка и корпус контейнера с полусферическим днищем имеют и определенные недостатки. Так, двумерный характер газодинамических течений в цилиндрической полости вызывает существенно неоднородное напряженное состояние по длине оболочки и формирует значительные газодинамические импульсные нагрузки в сторону днища, что вызывает необходимость разработки их демпферной защиты и утяжеляет корпус. Кроме того, не полностью используются резервы квазистатической прочности силовой оболочки к внутреннему давлению, устанавливаемому после затухания импульсных газодинамических процессов.

При анализе возможных путей совершенствования, направленном на минимизацию массы взрывных камер и контейнеров, показана целесообразность исследования металлокомпозитных оболочек сферической формы [6]. В данном случае принципиально важен вопрос о предельных деформациях ориентированного слоистого стеклопластика со структурой, обеспечивающей примерно постоянную толщину сферической оболочки. При действии радиально-симметричного импульса взрыва материал такой оболочки должен испытывать близкое к двухосному растяжение в отличие от близкого к одноосному динамического растяжения наиболее напряженной области цилиндрической оболочки [8].

В данной работе экспериментально определена динамическая реакция и проведена оценка прочности стеклопластиковых сферических оболочек при радиально-симметричном внутреннем взрывном нагружении.

Схема объекта испытаний показана на рис. 1. Исследованы образцы оболочек массой M , состоящие из двух слоев. Внутренний — мягкая сталь (Ст.20) — толщиной 3 мм с наружным диаметром 500 мм. Снаружи наматывался непосредственно на сталь слой ориентированного стеклопластика толщиной 15–24 мм (масса M_1) на основе стекловолокна ВМП (диаметр 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 — это ленты, состоящие из жгутов (жгут марки РВМПН 10-1200-78), пропитанных связующим ЭДТ-10.

Испытано две схемы армирования. Первый вариант обеспечивал плавное утолщение композитного слоя оболочки от экватора к горловинам группами чередующихся слоев спирально-симметричной намотки [9].

При этом распределение количества (групп) слоев и углы намотки выбирались таким образом, чтобы суммарная толщина пакета плавно возрастала от экватора к горловинам не более, чем в $\approx 1,8$ раза. Согласно патенту [10], осуществлялся второй тип армирования с более равномерной толщиной (отклонения от средней не превышали примерно $\pm 15\%$).

Диаметр проходных отверстий горловин составлял 109 мм (0,218 от диаметра базовой стальной оболочки). Люки горловины закрывались высокопрочными крышками [11], а в опытах 1, 4 (см. таблицу) оставались открытыми. Объект нагружался взрывом заряда взрывчатого вещества сферической формы, инициируемого из центра и расположенного в геометрическом центре оболочки.

Полость модели заполнялась воздухом при нормальном давлении. В экспериментах регистрировались деформации оболочки и горловин во времени $\varepsilon(t)$ методом скоростной фоторегистрации и тензометрирования. По результатам измерений с погрешностью $\lesssim 10\%$ определены и приведены в таблице следующие основные величины: максимальные окружные ε_y , меридиональные ε_x деформации (которые достигались в центральном экваториальном сечении) и максимальная деформация горловины ε_r ; интервалы времени t_y, t_x, t_r от начала смещения стенок и горловины до достижения максимальных деформаций; периоды колебаний основного тона окружных и меридиональных деформаций T_y, T_x . По формуле $\dot{\varepsilon} = v/R$ вычисляли максимальную скорость деформации (v — максимальная ско-

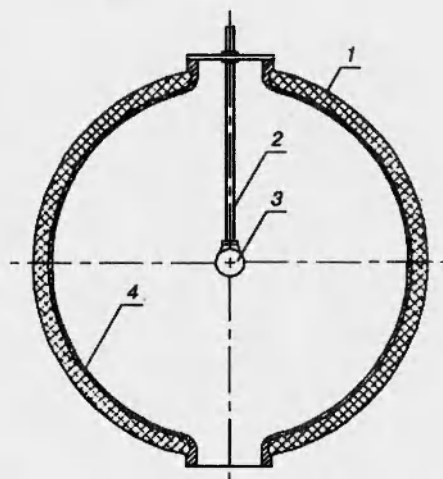


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — слой стеклопластика; 2 — детали подвески заряда; 3 — заряд ВВ; 4 — слой мягкой стали.

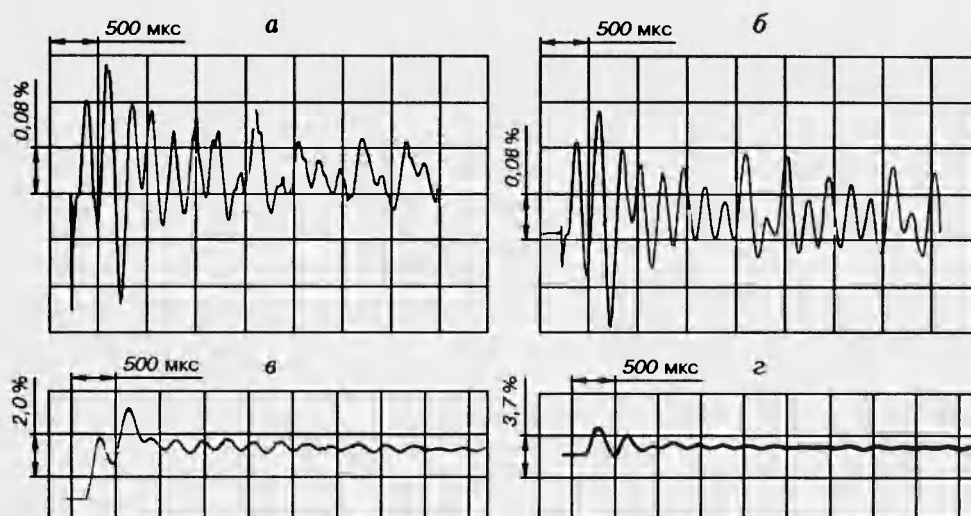


Рис. 2. Тензограммы окружных деформаций на экваторе оболочек при $m_{BB} = 0,14$ (а, б) и 1,4 кг (в, г).

Опыты: а — 1, б — 4, в — 3, г — 5.

Основные результаты опытов по взрывному нагружению сферических оболочек

Тип намотки	Номер		R , мм	M , кг	M_1 , кг	$m_{ВВ}$, кг	$\dot{\epsilon}$, 1/с	ϵ_y , %	t_y , мкс	T_y , мкс	ϵ_x , %	t_x , мкс	T_x , мкс	ϵ_r , %	t_r , мкс
	опыта	нагружения													
1	1	1	263,2	42,4	22,6	0,14	34	0,2	385	220	0,18	218	223	—	—
	2	2	263,2	42,4	22,6	1,11	263	2,7 4,9	250 560	293	1,3	215	288	1,45	430
	3	1	263,4	49,4	29,4	1,11	216	2,4 3,6	250 560	290	1,5	210	284	0,5	400
2	4	1	264,2	45,3	25,5	0,14	32	0,2	390	222	0,2	170	210	—	—
	5	2	264,2	45,3	25,5	1,11	249	2,3	225	286	1,55	190	285	0,48	660
	6	1	268,8	50	30,4	1,11	277	1,9	200	340	2,05	205	320	—	—

Примечания. 1) Величина $m_{ВВ}$ дана в тротиловом эквиваленте. 2) В опытах 1, 4 калорийность ВВ 4,8 МДж/кг, а в 2, 3, 5, 6 — 5,3 МДж/кг. 3) Опыты 1, 4 — оболочка повреждений не имеет (крышки не устанавливались), 2 — оболочка сохранила целостность, кроме четырех прогаров в зоне образовавшихся трещин, 3, 5, 6 — оболочка повреждений не имеет.

рость радиального смещения, R — наружный радиус оболочки). Примеры типичных осциллограмм окружной деформации на экваторе приведены на рис. 2.

Для определения упругой реакции оболочки с открытыми люками горловин нагружались взрывом заряда массой $m_{\text{ВВ}} = 0,14$ кг. Здесь максимальные окружные и меридиональные деформации не превышали $\sim 0,2\%$ (см. рис. 2). Период основного тона окружных и меридиональных слабо затухающих колебаний составил 210–220 мкс для обоих типов армирования.

Для оценки предельных характеристик деформируемости и несущей способности оболочки нагружались взрывом заряда с $m_{\text{ВВ}} \approx 1,11$ кг при энергии взрыва до 1,4 кг тротилового эквивалента, что составляло до 0,03 массы оболочки¹. Состояние оболочки после взрывного нагружения с максимальной массой ВВ показано на рис. 3 (см. также таблицу), что свидетельствует о ее достаточной несущей способности при данном уровне нагружения. Разработанная и успешно испытанная ранее взрывная камера с цилиндрической двухслойной (сталь — стеклопластик) оболочкой и полусферическими днищами (рис. 4) такого же диаметра способна герметично удерживать однократный взрыв заряда химического ВВ, масса которого в тротиловом эквиваленте составляет $\leq 0,01$ массы камеры. Таким образом, при переходе к сферической геометрии оболочки возможно не менее чем трехкратное улучшение показателя весового совершенства такой камеры.



Рис. 3. Состояние сферической оболочки после нагружения взрывом с энергией 1,4 кг тротилового эквивалента.

Анализ реакции двух сферических образцов оболочки первого типа армирования при максимальном нагружении показал, что силовой стеклопластиковый слой имел деформацию до 3,6–4,9 %, достигавшуюся во второй фазе колебательного процесса (см. рис. 2, в). Ее величина близка к разрушающей деформации в динамических условиях, определенной при взрывном нагружении цилиндрических оболочек из такого же стеклопластика [8]. У образцов второго типа армирования [10] при максимальном нагружении максимальная окружная деформация ($\sim 1,9$ –2,3 %) была в первой фазе динамической реакции (см. рис. 2, г), что свидетельствует о наличии примерно двукратного запаса прочности при данном нагружении и о предпочтительности выбора этой схемы армирования при разработке силового слоя оболочки взрывостойкого контейнера.

Следует отметить, что оболочки первого типа армирования в первой фазе колебательной реакции испытывали окружную деформацию $\varepsilon_y = 2,4 \div 2,7\%$ (см. рис. 2, в и таблицу), а затем во втором периоде их деформация возросла. Это указывает на нелинейный характер оболочки в данных условиях. Нелинейность обусловлена псевдопластичным поведением слоистого композита (аналогично обнаруженному ранее [9] и вызванному взаимным сдвиговым смещением слоев). По этой же причине, по-видимому, максимальные меридиональные деформации на оболочках первого типа

¹Масса заряда ограничена диаметром проходного отверстия горловины.

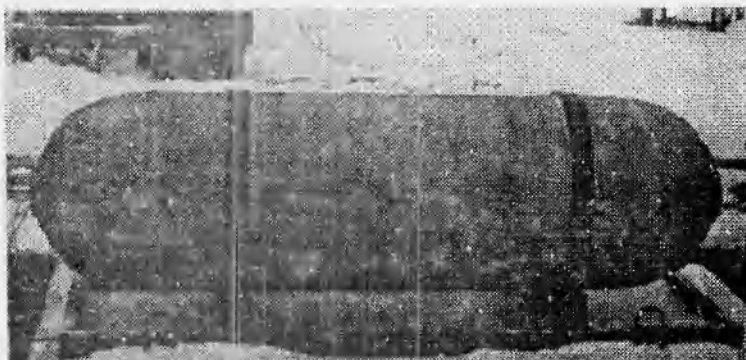


Рис. 4. Цилиндрическая камера с полусферическими днищами.

в 2–3 раза меньше окружных. На оболочках второго типа этот эффект выражен слабее ($\epsilon_x/\epsilon_y = 0,67 \div 1,03$), что дополнительно подтверждает их более высокую сопротивляемость. Независимо от этого период основного тона T_y , T_x при максимальной нагрузке увеличился в 1,3–1,7 раза (опыты 2, 3, 5, 6) по сравнению с нагрузкой, когда стальной слой также деформировался в упругой области (опыты 1 и 4) для оболочек обоих типов.

Эффект большей податливости оболочек первого варианта намотки сказался на максимальной окружной деформации вблизи торца горловин ($\epsilon_r \approx 1,45\%$ по сравнению с $\epsilon_r \approx 0,5\%$ для второго варианта). Следует отметить, что герметичность сферической емкости в опытах 2, 3, 5, 6 нарушалась в основном вследствие прогара недостаточно теплостойких изоляторов электровводов крышек, причем длительность истечения продуктов взрыва составляла от ~ 15 до 35 с (в опыте 6). Наблюдавшиеся в опыте 2 прогары стеклопластика (в зоне некачественного сварного шва стального слоя), согласно кинорегистрации, происходили позже момента максимальной динамической реакции оболочки и не привели к ее недопустимому ослаблению и разрушению при действии остаточного квазистатического давления продуктов взрыва. Прогары в опыте 3 не отмечены (несмотря на аналогичное опыту 2 низкое качество сварки), так как к внутренней поверхности стального слоя в зоне шва была приклеена листовая резина шириной 50 и толщиной 2 мм. В последующих опытах качество сварки было улучшено и образования трещин в слое стали и прогаров больше не наблюдалось.

Таким образом, испытания сферических оболочек, содержащих силовой слой из стеклопластика диаметром 500 мм и массой 42–50 кг, показали следующее.

1. Оболочки, силовой слой которых изготовлен по первому типу намотки армирующих стеклянных волокон, выдерживают взрыв заряда ВВ, эквивалентного 1,4 кг тротила. При таком воздействии скорость деформации оболочки составляет $220\text{--}260\text{ с}^{-1}$, величина максимальной окружной деформации оказывается близкой к предельной и составляет 3,6–4,9 %, а меридиональной $\sim 1,4\%$. Отношение массы заряда (в тротиловом эквиваленте) и оболочки $\xi = 0,3$ и является предельно допустимым.

2. Оболочки, силовой слой которых изготовлен по второму типу намотки, более стойки к взрывным нагрузкам. При взрыве заряда ВВ, эквивалентного 1,4 кг тротила ($\xi = 0,03$), окружные и меридиональные деформации близки и не превышают 1,9–2,3 %. Это примерно в 2 раза ниже предельных значений. Скорость деформации составляла $250\text{--}280\text{ с}^{-1}$. Пре-

дельное значение $\xi \approx 0,05 \div 0,06$.

3. Переход от одноосного деформирования (цилиндрические оболочки) к близкому к двухосному на сферических оболочках не изменяет предельной деформации двухслойных (сталь — стеклопластик) оболочек. По этому параметру они выгодно отличаются от стальных оболочек, у которых подобный переход сопровождается снижением предельной деформации в 3–5 раз [3, 4]. Кроме того, вследствие свойственного для сталей снижения пластичности при двухосном растяжении и проявления масштабных эффектов энергетической природы возможно (при наличии дефектов) снижение предельных деформаций еще на порядок [1, 2].

4. Рекордно высокое значение предельной взрывостойкости стеклопластиковых сферических оболочек ($\xi \sim 5 \div 6\%$) в совокупности с неподверженностью их сильным масштабным эффектам энергетической природы [5] и слабой чувствительностью к дефектам позволяют создавать на их основе максимально легкие взрывостойкие контейнеры и защитные оболочки необходимого размера,

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г. Динамическое разрушение и масштабный эффект // ПМТФ. 1994. № 3. С. 116–131.
2. Иванов А. Г., Учаев А. А., Рыжанский В. А. и др. Импульсное разрушение геометрически подобных объектов // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, № 4. С. 868–873.
3. Цыпкин В. И., Иванов А. Г., Минеев В. Н., Шитов А. Г. Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении // Атом. энергия. 1976. Т. 42, № 3. С. 303–308.
4. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 70–95.
5. Иванов А. Г., Цыпкин В. И. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // Механика композит. материалов. 1987. № 3. С. 472–480.
6. 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.
7. Асеев А. В., Горшков Н. Н., Демешкин А. Г. и др. Экспериментальное исследование деформативности стекло- и органопластика в зависимости от скорости деформирования // Механика композит. материалов. 1992. № 2. С. 188–195.
8. 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.
9. Пат. 2009387 РФ. Способ изготовления устройства для локализации продуктов взрыва / Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. Оpubл. 15.03.94, Бюл. № 33.
10. Федоренко А. Г., Шимаров А. Г., Сырунин М. А. Разработка и испытания крышки высокого давления // ПМТФ. 1994. № 2. С. 163–168.
11. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Влияние структуры армирования ориентированных стеклопластиков на прочность круговых цилиндрических оболочек при взрывном нагружении изнутри // Механика композит. материалов. 1991. № 4.

Поступила в редакцию 31/X 1994 г.