

## РЕАКЦИЯ НА НАГРУЖЕНИЕ И ПРОЧНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОГО КОНТЕЙНЕРА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

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

ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Несмотря на все принимаемые меры повышения безопасности при обращении с объектами, содержащими взрывчатые вещества, вероятность их случайного или аварийного взрыва полностью не исключается. Эффективная защита окружающей среды от воздействия взрыва достигается при его локализации в замкнутом объеме взрывозащитного контейнера. Применение таких контейнеров может существенно повысить безопасность эксплуатации боеприпасов и других взрывоопасных устройств.

Ключевые слова: контейнер, заряд, взрывчатое вещество, стеклопластик, композитный материал, оболочка, разрушение, деформация, прочность.

Основными проблемами при разработке взрывозащитных контейнеров (ВЗК) являются предотвращение их непрогнозируемого хрупкого разрушения [1] и минимизация массы и габаритов (для обеспечения транспортабельности) при сохранении высоких требований к надежности. Эффективным решением этих проблем служит использование в конструкции силового корпуса ВЗК (наиболее материалоемкого и ответственного элемента) композиционных волокнистых материалов [2] вместо традиционных конструкционных материалов (сталей). Применение таких материалов позволяет избежать сильных масштабных эффектов энергетической природы и повысить достоверность переноса результатов с модельных образцов на натурные.

Возможность создания взрывозащитного контейнера или защитной оболочки (например, для АЭС) с гарантируемой максимальной удельной прочностью рассмотрена в [2–5]. Из этих работ следует, что при создании силового корпуса ВЗК наиболее перспективными материалами являются волокнистые композиты на основе высокопрочных стекловолокон малого диаметра и полимерного связующего. Такие композиты при нагружении в направлении волокон деформируются практически упруго вплоть до разрушения. Они не подвержены хрупким пороговым катастрофическим разрушениям и сильному масштабному эффекту энергетической природы [6] и позволяют методом намотки создавать оболочки требуемых размера и формы. Для максимального

использования прочности композитной оболочки при внутреннем взрывном нагружении в воздухе экспериментально установлена необходимость подкрепления ее изнутри слоем мягкой стали [7]. Этим обеспечивается достаточно быстрое гашение возбужденных упругих колебаний, опасных возможным развитием изгибных форм и, следовательно, разрушением оболочки при более низких нагрузках [8].

При использовании волокнистых композитов имеется возможность управлять направлением и схемой армирования, что позволяет создавать легкие и прочные конструкции ВЗК как цилиндрической [9], так и более компактной сферической геометрии [3, 4]. Следует отметить способность таких конструкций сохранять форму при пробое высокоскоростным ударником (пулей, осколком, метеором), что показано экспериментально для находящихся под большим давлением металлокомпозитных баллонов, применяемых в аэрокосмической технике [10]. Кроме того, экспериментально установлено [11], что стеклоэпоксидные оболочки с локальным дефектом типа сквозной трещины сохраняют достаточно высокую остаточную прочность к повторному внутреннему взрывному воздействию.

Для открытых цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем взрывном нагружении известны предельные характеристики удельной прочности и деформируемости [2]. В замкнутой конструкции типа ВЗК корпус испытывает комплекс сложных импульсных газодинамических нагрузок, пере-

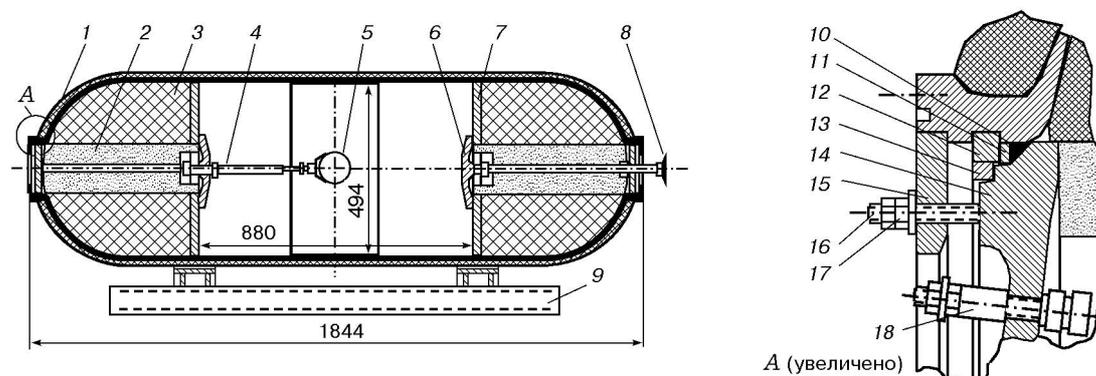


Рис. 1. Схема модели ВЗК:

1 — корпус камеры (стеклопластик), 2 — пробка (пенопласт), 3 — демпфер (пенопласт), 4 — шпилька с крепежом для установки ВВ, 5 — заряд ВВ, 6 — крышка внутреннего люка, 7 — диафрагма, 8 — шток измерительный с контактным ножом, 9 — опорно-транспортное устройство, 10 — кольцо уплотнительное (резина), 11 — кольцо прижимное, 12 — кольцо разрезное, 13 — кольцо-подпор, 14 — крышка люка, 15 — кольцо опорное, 16 — шпилька, 17 — гайки, 18 — электроводы

ходящих в квазистатическую нагрузку, вызываемую давлением остывающих газов и нагревом несущей оболочки. Сложность динамических процессов нагружения и реакции на них, ограниченность сведений о механических характеристиках и сопротивлении разрушению для используемых композитов сужают возможности расчетного прогнозирования прочности таких конструкций. В этом случае для оценки реального запаса прочности ВЗК необходимо прямое испытание натурального или модельного образца. В [3, 4] представлены данные взрывных испытаний сферических контейнеров из композитных материалов. В некоторых случаях для протяженных взрывоопасных грузов предпочтительными являются ВЗК цилиндрической формы, которые и рассмотрены в настоящей работе.

Цель работы — экспериментальное определение особенностей реакции на нагружение и предельных характеристик прочности основных силовых элементов и конструкции ВЗК цилиндрической формы с силовым корпусом из ориентированного стеклопластика при взрыве в его полости заряда взрывчатого вещества (ВВ).

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Корпус контейнера испытываемой модели\* представляет собой двухслойную цилиндрическую оболочку, ограниченную полусферическими днищами с загрузочными люками (рис. 1). Внутренняя металлическая оболочка с наружным диаметром 500 мм выполнена сваркой из листовой стали (Ст. 3) толщиной 2 мм, а в центральной части — 3 мм. Горловины загрузочных люков, изготовленные из высокопрочной вязкой стали (с пределом текучести  $600 \div 800$  МПа), крепятся сваркой к оболочке. Силовой наружный слой контейнера выполнен из намоточного стеклопластика толщиной  $\delta \approx (17 \pm 4)$  мм с чередованием двойных слоев спирального и тангенциального армирования. Такое исполнение оболочки корпуса обеспечивает его наиболее высокую удельную взрывостойкость в центральной зоне, что было экспериментально определено в опытах с открытыми цилиндрическими металлокомпозитными оболочками [2]. Для обеспечения плавности профиля толщины на стыках цилиндра с полусферами слой окружной намотки (с углом относительно образующей  $\varphi \cong 90^\circ$ ) имеют разную длину намотки в диапазоне  $94 \div 100\%$  длины цилиндрической части. Они чередуются со слоями спиральной намотки в четырех зонах с углами  $\varphi$  от  $\pm 17^\circ$  до  $\pm 42^\circ$ . Фактическая толщина стеклопластика, измеренная в области днищ, изменялась от минимальной ( $(9 \pm 2)$  мм в области стыка цилиндра со сферой) до максимальной ( $(21 \pm 4)$  мм в области фланцев горловин). Защита загрузочных люков от высоких импульсных нагрузок в сторону днищ обеспечивается подобно [12] демпферами и пробками

\*Для некоторых целей данная конструкция ВЗК может рассматриваться как натурная.

из термостойкого пенопласта марки ППУ-КФ плотностью  $\approx 100 \div 350 \text{ кг/м}^3$ , способного ограничивать аналогично пенополистиролу [13] передаваемое на днище давление как при статическом, так и при динамическом сжатии. Демпферы отделены от внутренней полости камеры стальными пластинами (диафрагмами). В пенопластовых демпферах и диафрагмах вдоль оси контейнера имеются загрузочные отверстия, диаметр которых совпадает с отверстиями в горловинах и равен 105 мм. Основной контур герметизации люков составляют крышки с деталями крепления (см. рис. 1). После помещения заряда ВВ в полость отверстия в корпусе и диафрагме закрываются крышками, а в демпфере — пенопластовыми пробками. Для уменьшения давления, действующего со стороны пробок на крышки корпуса, плотность пенопласта для пробок выбрана примерно вдвое меньшей, чем у пенопласта основных демпферов. Стеклопластиковый слой корпуса контейнера выполнен методом мокрой намотки лент из ровингов на основе высокомодульного магнезий-алюмосиликатного стекловолокна ВМ-1 диаметром 0,01 мм, пропитанных эпоксидным связующим марки ЭДТ-10 [14].

Общий вид моделей ВЗК приведен на рис. 2. Основные данные испытанных корпусов представлены в табл. 1.

### МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ

Нагружающее устройство располагалось в геометрическом центре модели контейнера, полость которой заполнялась атмосферным воздухом (см. рис. 1). Нагружающее устройство состояло из заряда ВВ (ТГ 50/50) массой  $M_{ВВ}$ . Заряд имел сферическую форму в опытах 1-го типа по проверке прочности центральной зоны корпуса и цилиндросферическую форму в опытах 2-го типа по проверке запаса прочности при продольном нагружении днищ, причем ось цилиндрической части ВВ направлена вдоль оси камеры, а диаметр цилиндра из ВВ на  $\approx 0,5 \text{ мм}$  меньше диаметра загрузочного отверстия. Масса цилиндросферического заряда ВВ варьировалась за счет изменения его длины, равной диаметру сферы, ограничивающей ВВ на торцах. В опытах по проверке прочности днищ для предотвращения разрушения центральной зоны корпус снаружи обматывали полосами из свинца шириной  $50 \div 40 \text{ мм}$  и толщиной  $4 \div 5 \text{ мм}$ , кольца закрепляли вязаль-

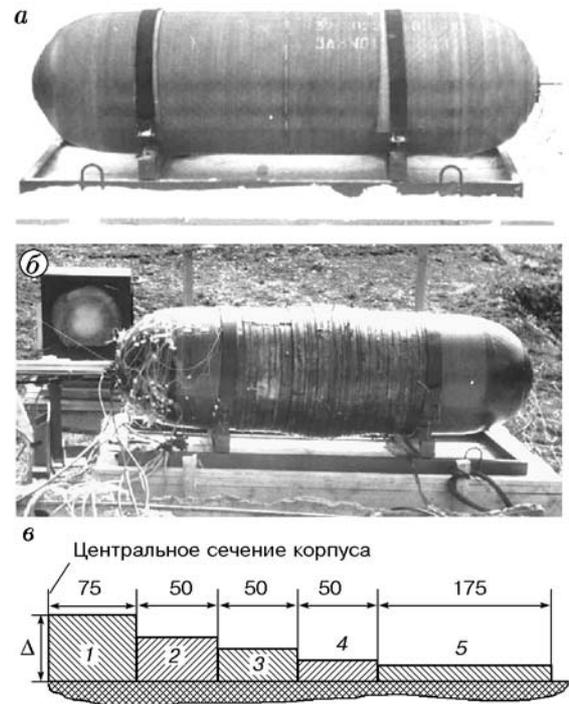


Рис. 2. Общий вид моделей ВЗК:

*a* — после опыта 1-го типа, модель № 1; *б* — перед опытом 2-го типа, модель № 7; *в* — схема обмотки свинцовыми полосами в опыте с моделью № 7,  $\Delta$ , мм: 1 — 25, 2 — 16, 3 — 12, 4 — 5, 5 — 4

ной проволокой (рис. 2, *б*). Число полос в разных сечениях по длине определялось согласно [15] с тем, чтобы за счет отлета полос, отбрасывающих избыточный импульс, снизить деформацию центральной зоны оболочки до допустимой величины. Пример распределения полос показан на рис. 2, *в*.

За характеристику удельной взрывной нагрузки на центральную (наиболее нагруженную) цилиндрическую часть модели (в серии опытов по проверке ее окружной прочности) принималась безразмерная относительная масса заряда  $\xi = M_{ВВ}/M^*$ , где  $M^*$  — масса двухслойной (слой стали толщиной 3 мм и слой стеклопластика толщиной  $\delta$  [мм]) цилиндрической оболочки длиной  $4R$  ( $R = 247 \text{ мм}$  — внутренний радиус оболочки). По этому параметру можно провести сравнение испытанных моделей ВЗК и открытых трубчатых оболочек.

При испытании моделей аналогично [2–4, 7, 8] регистрировались следующие величины (с погрешностью меньше 10 %):

— радиальное смещение наружной поверхности корпуса в зависимости от времени в

Таблица 1

Параметры	Номер модели						
	1	2	3	4	5	6	7
Полная масса ВЗК, кг	189	205	208	188	178	200	216,5
Масса стального корпуса, кг	105	124	125	109,3	111,4	111,3	115,5
Толщина силовой стеклопластиковой оболочки в центральном сечении, мм	13,3 ±0,3	14,2 ±0,6	15,8	15,9 ±0,3	12,9 ±0,2	15,8 ±0,6	20,9 ±1,0
Количество жгутов в спиральных слоях, шт.	12095*	12095*	12224	12432	12976	12992	12432
Количество жгутов в тангенциальных слоях, шт.	11760*	11760*	11780	10416	9466	9088	11680
Плотность демпферов, кг/м <sup>3</sup> : — загрузочный отсек (с его стороны загружается и инициируется заряд ВВ)	188	359	344	188	207	196	251
— измерительный отсек (с его стороны размещен шток для измерения движения диафрагмы и все датчики)	177	325	338	184	215	185	258

Примечание. Звездочкой обозначены минимальные значения по требованиям конструкторской документации, остальные значения — фактические паспортные данные.

центрального сечения, определяемое методом фоторегистрации (опыты 1-го типа);

— окружная и меридиональная деформации наружной поверхности корпуса в зависимости от времени в различных сечениях по длине, окружная деформация фланца горловины в сечении на расстоянии 3 ÷ 5 мм от его торца и деформация в центре крышки, измеренные методом тензометрирования;

— изменение температуры на наружной поверхности стального слоя корпуса камеры в трех сечениях, регистрируемое хромель-копелевыми термопарами;

— осевое перемещение центра диафрагмы, расположенной со стороны измерительной горловины, фиксируемое с помощью электроконтактной методики и (или) скоростной щелевой фоторегистрации движения кромки контактного ножа на выдвигном штоке, установленном на диафрагме (см. рис. 1);

— осевое перемещение торца горловины, определяемое с помощью щелевой фоторегистрации (в основном, в опытах 2-го типа).

После опытов проводили обмеры разрушенных или деформированных элементов. Для проверки состояния внутренних элементов конструкцию разрезали.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты экспериментов приведены в табл. 2, где  $\varepsilon_{y,1}$  — максимальная окружная деформация корпуса;  $\varepsilon_{x,1}$  — максимальная продольная деформация корпуса;  $\bar{\varepsilon}_x$  — максимальная осредненная продольная деформация корпуса, оцененная по отношению максимального продольного перемещения торца горловины к половине длины корпуса  $L$  (см. рис. 1);  $\varepsilon_{y,r}$  — максимальная окружная деформация фланца горловины;  $\varepsilon_{x,k}$  — максимальная деформация в зоне центра крышки;  $\bar{\varepsilon}_d$  — продольная осредненная деформация демпфера,  $\bar{\varepsilon}_d = (W_0 - W_k)/W_0$ , где  $W_0 = 0,064 \text{ м}^3$  — первоначальный объем демпфера,  $W_k$  — объем демпфера при его максимальном сжатии, вычисленный с учетом измеренного максимального перемещения центра диафрагмы и ее фактического прогиба, достигавшего по результатам обмеров  $\approx 4 \div 42 \text{ мм}$ .

Распределение по длине корпуса  $x$  (отсчет  $x$  по образующей от центрального сечения) максимальных окружных и продольных деформаций дано на рис. 3, 4. Характерные осциллограммы зависимости от времени окружных и продольных деформаций в центральном сечении представлены на рис. 5. Вид корпуса

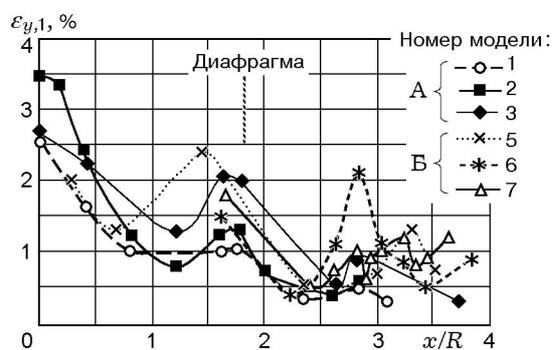


Рис. 3. Распределение максимальных окружных деформаций по длине корпуса моделей ВЗК:

А — опыты 1-го типа; Б — опыты 2-го типа

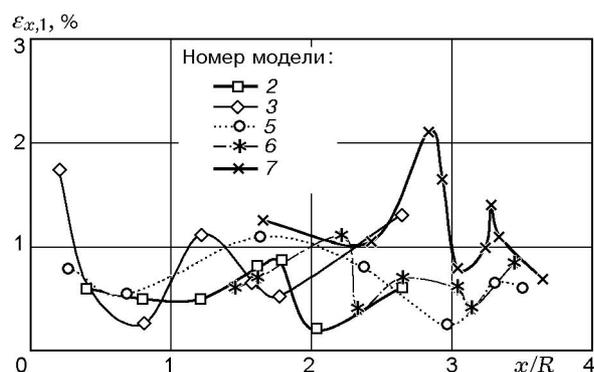


Рис. 4. Распределение максимальных меридиональных деформаций по длине корпуса

ВЗК после испытаний с повреждениями центральной зоны и при разрушении от продольного нагружения показан на рис. 6.

### ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ (ОПЫТЫ 1-го ТИПА)

Модели контейнера в большинстве опытов 1-го типа по проверке прочности центральной зоны корпуса сохранили свою конструктивную целостность. Герметизирующие крышки горловин и сами горловины не имели остаточных деформаций и не были повреждены. Элементы их крепления (кольцо опорное, шпильки и др.) также полностью сохранили конструктивную целостность, хотя имели остаточные деформации. Из-за наличия измерительного штока и негерметичных электровводов в крышках в опытах не удалось обеспечить полную гер-

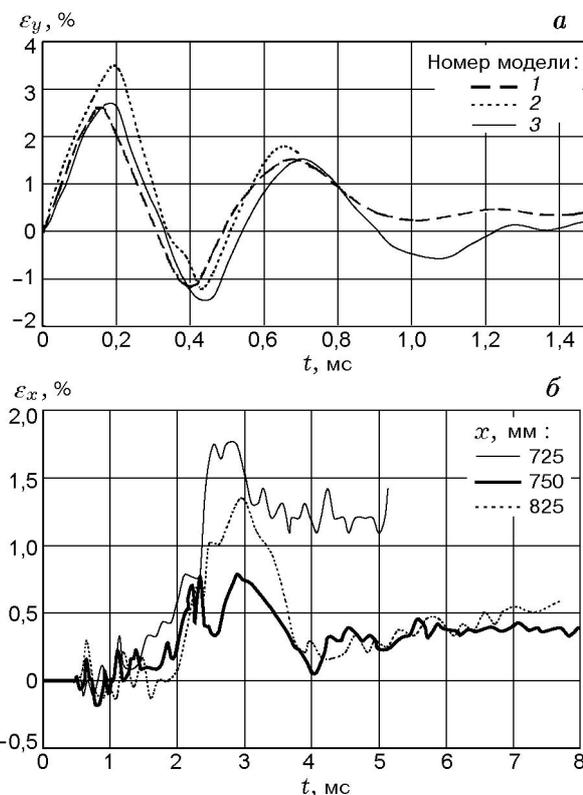


Рис. 5. Зависимости деформаций от времени:

а — окружная в центральном сечении (опыты 1-го типа); б — продольная в сечениях зоны стыка цилиндрического корпуса со сферическим днищем (опыт 2-го типа с моделью № 7)

метичность внутреннего объема камера ВЗК. Несмотря на это истечение продуктов взрыва происходило за время более  $\approx 10$  мин. Следовательно, прочность корпуса в проведенных опытах проверена не только на действие импульсной составляющей нагрузок, но и на действие максимального квазистатического давления продуктов взрыва.

Силовая оболочка моделей сохранилась практически без повреждений. Однако при высоком уровне максимальных окружных деформаций ( $\geq 3,5\%$ ) возможно возникновение разрывов и отслоений в окружном направлении узких полосок 1-го, 2-го наружных слоев стеклопластика в наиболее нагруженной области центрального сечения.

Сопоставление зависимостей  $\varepsilon_y(t)$  для центрального сечения испытанных моделей демонстрирует близость их динамических реакций и соответственно упругих свойств силового слоя (см. рис. 5).



Рис. 6. Вид разрушенной модели № 4

Предельная окружная деформация стеклопластикового слоя корпуса контейнера была определена ранее в опытах с открытыми трубами и упрощенными моделями ВЗК диаметром 400 мм с близкой схемой армирования и составила  $\approx 3,5 \div 3,9 \%$  [5, 16]. При  $\varepsilon_{y,1} = 3,5 \%$  в испытанных моделях наблюдались также повреждения композитного слоя в виде разрывов и отслоений 1-го, 2-го наружных слоев (при общем числе слоев более 30) в центральной зоне контейнера, однако разрушения корпуса с образованием сквозной трещины и выхода через нее продуктов взрыва не произошло.

В опыте с моделями № 1 и 3 уровни максимальных деформаций близки:  $\varepsilon_{y,1} \approx 2,6 \div 2,67 \%$ . В отличие от модели № 1, которая испытывалась сразу после изготовления, модель № 3 была испытана примерно через девять лет хранения в неотапливаемом помещении. Такой длительный срок хранения не повлиял на несущую способность модели контейнера при достигнутых максимальных деформациях на  $25 \div 23 \%$  ниже предельной величины ( $3,5 \%$ ) для силового корпуса ВЗК.

Из анализа осциллограмм тензоизмерений деформаций следует, что в оболочках возбуждались окружные и меридиональные колебания с преобладающим периодом  $T_y = (380 \pm 25)$  мкс и  $T_x = (280 \pm 30) \div (340 \pm 15)$  мкс. По проведенным оценкам эти периоды соответствуют радиально-симметричной форме колебаний цилиндрической оболочки и продольным колебаниям днищ с демпферами и диафрагмами как сосредоточенными массами, соединенными упругим элементом, роль которого играет цилиндрическая часть оболочки.

Характер распределения  $\varepsilon_{y,1}$  вдоль оси

контейнеров (рис. 3, А) аналогичен распределению радиального импульса газодинамической нагрузки вдоль полости в [8]. Подъем данного распределения в области  $x/R = 1,5 \div 2,0$  не превышает максимальных деформаций в центре и соответствует начальному положению диафрагмы  $x/R = 440/247 = 1,78$ . Он обусловлен фокусировкой газодинамических потоков продуктов взрыва в угловых точках цилиндрической полости корпуса и повышением вследствие этого импульса давления на стенку корпуса в этой зоне.

Максимальные значения  $\varepsilon_{y,1}(\xi)$  для моделей ВЗК (включая данные для подобных моделей, приведенные в [5]), обработанные методом наименьших квадратов, имеют вид линейной зависимости  $\varepsilon_{y,1} = 170,2\xi$  (рис. 7). Эта зависимость близка к полученной для подобных открытых металлопластиковых труб [16]. Данный факт указывает на отсутствие влияния краевых эффектов и «замкнутости» на максимальную окружную деформацию в центральном сечении цилиндрической оболочки длиной  $\approx 4R$ , что объясняется более коротким временем достижения максимальной окружной деформации ( $\approx 150 \div 200$  мкс, рис. 5, а) в центральном сечении по сравнению с минимальным временем пробега упругих возмущений от центра к торцу оболочки и обратно (по оценкам  $\approx 500$  мкс).

### ПРЕДЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ВЗК ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ (ОПЫТЫ 2-го ТИПА)

Максимальные продольные деформации  $\varepsilon_{x,1}$  корпуса при сферическом заряде ВВ не превышали  $1,74 \%$  и достигались вблизи центрального сечения (см. табл. 2, рис. 4). В зоне перехода цилиндрического корпуса в днище зарегистрированы еще меньшие продольные деформации:  $\varepsilon_{x,1} = 1,2 \%$ . Это обусловлено тем, что в этом случае демпферы работали в области относительно низких деформаций ( $\leq 60 \%$ , табл. 2) и соответственно низких напряжений сжатия пенопласта.

Максимальная объемная деформация демпфера для моделей № 1 и 3 составила  $63,3$  и  $13,7 \%$  при плотности демпфера  $177$  и  $338 \text{ кг/м}^3$  соответственно. В опыте с моделью № 2, где взрывная нагрузка на  $\approx 40 \%$  выше, чем у моделей № 1 и 3, деформация демпфера составила  $26,2 \%$  при плотности демпфера

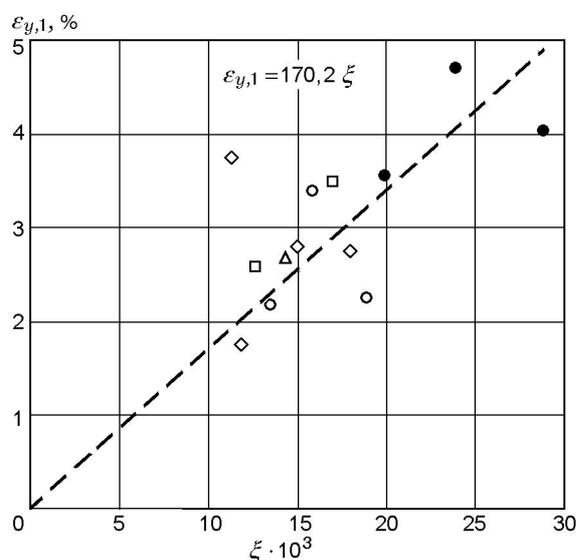


Рис. 7. Зависимость максимальной окружной деформации от удельной взрывной нагрузки (испытанные модели и модели, указанные в [5]):  $\diamond$  — модели диаметром 1500 мм [5],  $\square$  — модели № 1 и 2,  $\circ$  — модели диаметром 400 мм [5] (не разрушились),  $\bullet$  — модели диаметром 400 мм [5] (разрушились),  $\Delta$  — модель № 3, штриховая линия — линейная аппроксимация данных

325 кг/м<sup>3</sup>. Это указывает на существенную зависимость данного параметра как от плотности пенопласта, так и от взрывной нагрузки.

Энергопоглощение демпфера из пенопласта при фиксированной деформации является возрастающей функцией его массы  $M_d = \rho_0/W_0$ , а в случае постоянного объема  $W_0$  — его плотности  $\rho_0$  [13]. При взрыве энергия, которую должен поглотить демпфер, состоит из кинетической энергии диафрагмы вследствие импульсного газодинамического воздействия взрыва и из работы остаточного давления продуктов взрыва на перемещение диафрагмы. Обе эти составляющие пропорциональны массе ВВ (для ВВ постоянного состава) [17]. Отношение  $M_{ВВ}/M_d$  характеризует «нагруженность» демпфера. Для обобщения полученных экспериментальных данных на рис. 8 построена зависимость  $\varepsilon_d(M_{ВВ}/M_d)$ .

При нагружении модели взрывом цилиндросферического заряда ВВ повышенной массы в продольном направлении разрушение днищ происходило путем среза их кромкой диафрагм при  $\varepsilon_d \geq 75\%$  и смещении края диафрагмы от начального положения на расстояние  $\geq 260$  мм, т. е. в сечении на расстоянии по

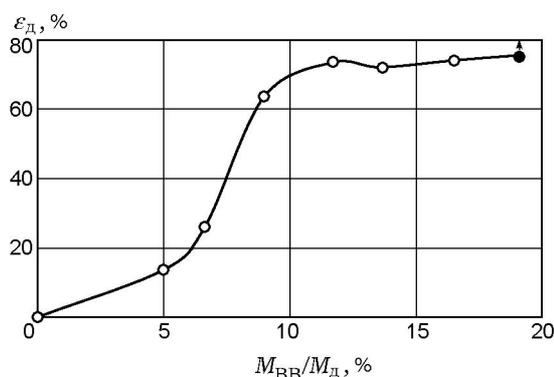


Рис. 8. Зависимость деформации демпфера от отношения массы ВВ к массе демпфера:

темная точка соответствует опыту с разрушением днищ, стрелка указывает на возможность большей деформации демпфера, если бы разрушения не было

образующей более 700 мм от центрального сечения (см. рис. 6). Этому опыту соответствует темная точка на рис. 8. Тем самым определен диапазон предельных значений отношения массы ВВ к массе демпфера:  $16,5 < M_{ВВ}/M_d < 19,1\%$ . Следует отметить, что зависимость  $\varepsilon_d(M_{ВВ}/M_d)$  нелинейная (что соответствует характеру нелинейности диаграммы одноосного сжатия пенопласта [13]) и при  $M_{ВВ}/M_d > 10\%$  изменяется мало, т. е. предельная деформация демпфера не может служить надежным критерием близости нагрузки к разрушающей величине. В опытах без разрушения с относительно большой деформацией демпфера ( $\varepsilon_d > 70\%$ , модели № 5–7 в табл. 2) регистрируемые деформации оболочки в зоне воздействия диафрагмы на корпус не превышали 2,1% (см. рис. 3, 4) (что значительно меньше предельной окружной деформации в центральном сечении  $\geq 3,5\%$ ) и поэтому тоже не могут служить критерием, характеризующим близость нагрузки к разрушающей величине. Кроме того, использовать деформации оболочки в зоне днищ как критерий прочности также нежелательно из-за достаточно высокого разброса результатов измерений в зоне возможного разрушения (см. рис. 3, 4). В этой зоне при воздействии кромки диафрагмы на оболочку возможна значительная концентрация напряжений вследствие краевых эффектов (см. рис. 5, б). Поэтому в качестве критерия, характеризующего возможность разрушения днищ, предпочтительнее использовать либо отношение  $M_{ВВ}/M_d$ , либо (при постоянной плотности

демпфера) саму величину  $M_{ВВ}$ .

Предельная масса ВВ для ВЗК с демпферами плотностью  $\approx 180 \div 200 \text{ кг/м}^3$  находится в этом случае в интервале  $1,954 \div 2,169 \text{ кг}$ , а при плотности демпферов больше  $250 \text{ кг/м}^3$  она превышает  $2,249 \text{ кг}$  (см. табл. 2). При указанной максимальной массе ВВ модель № 7 не разрушилась, но продольные деформации оболочки корпуса в сечении  $x = 700 \text{ мм}$  возросли и составили  $\approx 2,1 \%$  (см. рис. 4), что указывает на приближение к разрушающей нагрузке. При нагружении контейнера взрывом заряда ВВ сферической формы и диаметре заряда не более диаметра горловины контейнера (масса ВВ не более  $\approx 1,4 \text{ кг}$ ) реализовать такой механизм разрушения невозможно (так как достигаемые деформации демпфера не более  $63 \%$ ).

Следует отметить, что при более высоких плотностях демпфера ( $250 \div 350 \text{ кг/м}^3$ ) разрушения путем среза днищ кромкой движущейся диафрагмы может не быть еще и по причине более раннего достижения разрушающего давления со стороны пенопласта на днища. В этом случае разрушение будет происходить при меньших деформациях демпфера путем отрыва днищ по наиболее напряженному сечению стеклопластика, а предельная взрывная нагрузка может не соответствовать установленным критериальным величинам при меньшей плотности демпфера и должна исследоваться дополнительно.

### НАГРЕВ ВЗК

Измерения температуры проводились на наружной поверхности металлического слоя оболочки в трех сечениях на расстоянии  $x = 10, 240$  и  $640 \text{ мм}$  от центрального сечения. Максимальный нагрев металлической оболочки составил  $106 \text{ }^\circ\text{C}$  в момент времени  $10 \div 12 \text{ с}$  после подрыва заряда в сечении  $x = 240 \text{ мм}$ , где толщина слоя стали  $2 \text{ мм}$  (опыт с моделью № 3). Температура теплостойкости эпоксидной смолы  $\approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$ , а стекловолокна — значительно выше. Следовательно, возможный температурный диапазон работы стеклопластика в модели примерно в три раза ниже значений температур, при которых этот фактор может влиять на снижение прочностных характеристик стеклопластика. Кроме того, нагрев стали происходит значительно позже времени действия максимального квазистатического давления продуктов взрыва ( $\approx 1 \text{ мс}$ ), которое из-за тепловых

потерь и затрат энергии на сжатие демпферов через  $10 \div 12 \text{ с}$  многократно снижается.

Осмотр состояния пенопластовых демпферов показал, что в районе щели между диафрагмой и корпусом имеется кольцевая выгоревшая полость (объемом меньше  $\approx 5 \%$   $W_0$ ), а в зоне пробки — незначительные прогары, но все это практически не влияет на работоспособность демпфера.

### ВЫВОДЫ

Проведенные испытания представленной конструкции модели ВЗК показали, что замкнутость оболочки корпуса и длительный срок ее хранения не влияют на ее удельную прочность при взрывном нагружении и на предельные деформационные характеристики (в пределах погрешности не более  $20 \div 25 \%$ ). Применяемая в ВЗК демпферная защита днищ и крышек загрузочных горловин из пенопласта плотностью  $180 \div 350 \text{ кг/м}^3$  обеспечивает сохранение их конструкционной целостности и снижение продольных деформаций корпуса до величины, существенно меньшей предельной, определенной в окружном направлении. Запас прочности испытанных моделей в продольном направлении при нагрузке от взрыва заряда ВВ сферической формы существенно выше их запаса прочности в центральной зоне корпуса. Продольная прочность корпуса может быть увеличена за счет повышения плотности демпферов от  $\approx 200$  до  $\approx 300 \text{ кг/м}^3$ . Нагрузку на центральную зону, в которой размещается заряд ВВ, можно увеличить за счет введения дополнительной массы (например, из свинца), плотно прилегающей к оболочке и отлетающей от нее при взрыве, либо за счет увеличения толщины слоев оболочки в центральной зоне. Отношение предельной массы ВВ (в тротиловом эквиваленте) к массе контейнера составляет  $\approx 0,8 \%$ , что примерно в  $6\text{--}7$  раз меньше значения аналогичного отношения для сферического металлокомпозитного ВЗК [4]. Однако отношение предельной массы ВВ к объему полости в цилиндрическом ВЗК примерно в три раза меньше, чем в сферическом, за счет чего при подрыве одинаковых по массе зарядов ВВ в цилиндрической конструкции реализуются меньшие остаточное давление и температура нагрева корпуса. Кроме того, цилиндрический ВЗК позволяет размещать в нем удлиненные взрывоопасные объекты.

Полученные экспериментальные данные использованы для разработки металлокомпозитного крупногабаритного ВЗК (диаметром 2,5 м, длиной 9,5 м) массой 25 т [5, 9], способного выдержать взрыв мощностью до 150 ÷ 200 кг ТНТ.

Авторы выражают благодарность О. А. Клещевникову, В. Н. Русаку, В. Г. Куропаткину, В. И. Цыпкину за помощь в проведении экспериментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А. Г., Минеев В. Н.** О масштабном критерии при хрупком разрушении конструкций // Докл. АН СССР. 1975. Т. 220, № 3. С. 575–578.
2. **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.
3. **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.
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. **Иванов А. Г., Федоренко А. Г.** Целесообразность применения композитных материалов для защитной оболочки АЭС // Атомная энергия. 1993. Т. 75, вып. 1. С. 45–48.
6. **Иванов А. Г., Минеев В. Н.** О масштабных эффектах при разрушении // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 70–95.
7. **Цыпкин В. И., Русак В. Н., Иванов А. Г. и др.** Деформация и разрушение двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композитных материалов. 1987. № 5. С. 833–838.
8. **Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др.** Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композитных материалов. 1983. № 1. С. 90–94.
9. **Ivanov A. G. et al.** Transportable localizing container for explosive cargoes // Symposium of Accident Resistant Containers and Transportation Surety, Albuquerque, USA, NM, Oct. 26–Nov. 2, 1993.
10. **Зайцев Г. П., Черевацкий С. Б., Валиуллин А. Х. и др.** Механика разрушения комбинированного баллона при внезапном образовании в нем отверстия // Механика композитных материалов. 1986. № 1. С. 88–93.
11. **Цыпкин В. И., Русак В. Н., Шитов А. Т. и др.** Деформация и разрушение цилиндрических оболочек из стеклоэпоксида при внутреннем импульсном нагружении // Механика композитных материалов. 1981. № 2. С. 249–255.
12. **Пат. 2094754 RU, C1 кл. 6 F 42 D 5/04.** Устройство для локализации взрыва / А. И. Абакумов, Д. В. Григорьев, О. Б. Дреннов и др. Оpubл. 27.10.97, Бюл. № 30.
13. **Крысанов Ю. А., Новиков С. А.** Исследование динамического сжатия пенополистирола // Проблемы прочности. 1977. № 8. С. 115–117.
14. **Гуняев Г. М.** Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981.
15. **А. с. № 1596925, МКИ<sup>6</sup> G 01 N 33/22** (по заявке № 4634004 с приоритетом от 9.01.1989). Защитное устройство для локализации взрыва / В. Г. Куропаткин, М. А. Сырунин, А. Г. Федоренко. Оpubл. 15.03.95, Бюл. № 19.
16. **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.
17. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. Н. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Челышев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.

Поступила в редакцию 17/VI 2001 г.