

УДК 624.074.4:678.067

Разработка взрывостойкого контейнера АТ595. Расчетно- теоретическое и экспериментальное обоснование параметров конструкции*

**А. И. Абакумов, И. В. Девяткин,
В. Ю. Мельцас, А. Л. Михайлов,
Г. Ф. Портнягина, В. Н. Русак,
В. П. Соловьев, М. А. Сырунин,
С. М. Трещалин, А. Г. Федоренко**

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований разработанного во ВНИИЭФ в рамках международного сотрудничества с СНЛ (США) металлокомпозитного контейнера АТ595, который должен обеспечивать герметичное удержание продуктов взрыва заряда ВВ массой 8кг ТЭ в корпусе из инертного материала массой 35 кг. Проведены расчетно-экспериментальное исследование реакции несущей способности и разрушения уменьшенных открытых модельных цилиндрических оболочек и макетов силового корпуса контейнера при различных уровнях удельной взрывной нагрузки (меньшей, равной и большей относительно заданной номинальной удельной нагрузки для контейнера), а также испытания двух контейнеров АТ595 при номинальной и повышенных нагрузках.

Введение

Одним из путей защиты окружающей среды от воздействия взрыва является его локализация в замкнутом объеме взрывостойкого контейнера. Взрывостойкие контейнеры необходимы для эвакуации обнаруженных в местах нахождения и проживания людей террористических устройств, аварийных боеприпасов, случайных или специальных устройств, содержащих ВВ и другие экологически опасные вещества. Такие контейнеры также могут использоваться для проведения научно-исследовательских или специальных работ с применением взрывчатых веществ.

Одна из главных проблем при создании транспортабельных высоконадежных взрывостойких контейнеров – обеспечение их минимальных габаритов и массы без снижения параметров несущей способности. Причем, для конкурентоспособности контейнеров на мировом рынке немаловажную роль играет их приемлемая (минимальная относительно имеющихся аналогов) стоимость.

*Докл. на Межд. конф. "Забабахинские чтения". г. Снежинск, 5–10 сент. 2005 г.

Конструкция контейнера АТ595

Разработанный во ВНИИЭФ в рамках международного сотрудничества с СНЛ (США) контейнер АТ595 (рис. 1) цилиндрической формы с полусферическими днищами имеет двухслойный корпус [1–3]. Внутренний стальной слой (сталь 12Х18Н10Т) является герметизирующим, наружный силовой слой выполнен из базальтового композита. В полюсах днищ расположены загрузочные горловины, которые герметично закрываются стальными крышками. Для защиты корпуса от осколков используются пакеты слоев стальной сетки [4], а для защиты крышек загрузочных горловин от ударно-волнового и осколочного воздействия применены стальные цилиндры, заполненные пенопластом и закрытые внутренними крышками [2, 3, 5]. Для формирования базальтопластикового слоя использовался ровинг РБ9-1250-4С на основе базальтового волокна диаметром 9 мкм. Этот слой изготавливался методом комбинированной намотки лент из жгутов, пропитанных связующим на основе эпоксидной смолы, с чередованием двойных спиральных и кольцевых слоев с примерно одинаковым соотношением их толщины [6, 7].



Рис. 1. Конструктивная схема контейнера АТ595

Рабочая полость контейнера, в которую помещается заряд ВВ в инертной упаковке (опасный груз), ограничена дросселями, которые предназначены для ослабления импульсного воздействия ударной волны и газообразных продуктов детонации ВВ на днища корпуса контейнера при взрыве опасного груза [5]. Кроме того, дроссели защищают периферийные зоны днищ от осколков, образующихся при взрыве заряда ВВ.

Полная длина контейнера составляет 3320 мм, наружный диаметр 985 мм, проходной диаметр горловины 420 мм. Опасный груз представляет собой сферический заряд ВВ массой 8 кг в тротиловом эквиваленте (ТЭ), помещенный в инертную упаковку цилиндрической формы массой 35 кг.

Программные коды, используемые в расчетах

Для проведения анализа поведения конструкций при взрывном нагружении использованы программные комплексы Б71 [8] и DRACON [9]. Программный комплекс Б71, основанный на методе С. К. Годунова, предназначен для расчета газодинамических течений. Программный комплекс DRACON используется для решения задач по определению напряженно-деформированного состояния элементов сложных пространственных конструкций с учетом нелинейного поведения материала и контактного взаимодействия при интенсивных механических и тепловых нагружениях в двух- и трехмерной постановке.

Из-за отсутствия в контейнере противоосколочной защиты в виде тканой металлической сетки с ячейкой 2x2 мм и толщиной проволоки 0,5 мм продукты взрыва, согласно экспериментам, проходя сквозь слои металлической сетки, разгоняют ее, что приводит к уменьшению ее проницаемости для продуктов взрыва. Кроме того, сетка за счет большой разветвленной поверхности эффективно снижает температуру продуктов взрыва. Наличие металлической сетки в контейнере потребовало совместного расчета процессов газодинамики и реакции элементов конструкции.

Для моделирования поведения такой противоосколочной сетки в условиях взрывного нагружения контейнера АТ595 используется модель двухкомпонентной двухскоростной среды. Течение газа внутри и вне пакета сетки, а также теплообмен между газом и сеткой рассчитываются по программе Б71, а сжатие сетки и ее упругопластические деформирования – по программе DRACON. Разработанный для этой цели модуль связи выполняет решение контактной задачи на границе раздела газообразных веществ и деформируемых твердых тел и взаимную передачу необходимой информации другим модулям.

Учитывая особенности конструкции контейнера АТ595 и взрывного нагружения, программный комплекс DRACON был дополнен модулями, в которых учитываются:

- анизотропия механических свойств базальтопластиковой оболочки, получаемой спирально-кольцевой намоткой;
- разрушение базальтопластикового слоя;
- влияние скорости деформации на прочностные характеристики стальной оболочки;
- деформирование противоосколочной сетки при воздействии на нее продуктов взрыва заряда ВВ;
- взаимодействие инертного окружения заряда ВВ с противоосколочной сеткой и передача нагрузки на внутреннюю поверхность стальной оболочки.

Испытания открытых цилиндрических образцов

На этапе, предшествующем испытаниям контейнера, была проведена работа по получению экспериментальных данных о динамической реакции и прочности при взрывном нагружении уменьшенных открытых цилиндрических образцов, моделирующих центральную зону контейнера и демпферные отсеки. Полученные экспериментальные данные использовались в качестве теста для проверки расчетной модели поведения металлокомпозитных оболочек при их взрывном нагружении.

Для проведения экспериментов были изготовлены цилиндрические базальтопластиковые оболочки двух типоразмеров: 150x300 и 300x600 (первое число – внутренний диаметр, второе – длина, в мм). Опыты проводились как на однослойных оболочках, так и на двухслойных с использованием стальной вставки: цилиндрической оболочки с толщиной стенки ~15 % от толщины

базальтопластиковой оболочки. Поведение стальной сетки рассматривалось в экспериментах с металлокомпозитной оболочкой 300х600, внутри которой устанавливался пакет металлической сетки из 24 слоев.

Полученные в ходе взрывных испытаний результаты экспериментов показали, что:

– при отсутствии подкрепляющего слоя стали разрушающая окружная деформация меньше ~2,5 %, при наличии стальной вставки безопасная предельная окружная деформация составляет ~3–3,5 %;

– удельная несущая способность (отношение массы ВВ, взрыв которого выдерживает оболочка, к массе оболочки длиной 2 внутренних диаметра) для базальтопластиковых образцов, отличающихся размерами в 2 раза, с подкреплением слоем стали толщиной ~15 % от толщины композита находится в интервале $\xi = 16 \cdot 10^{-3} - 26,4 \cdot 10^{-3}$;

– влияние инертного окружения заряда ВВ на величину суммарного импульса воздействия продуктов взрыва и осколков инертного окружения на стенку выражается в увеличении максимальной окружной деформации оболочки на 27 % относительно варианта нагружения таким же зарядом ВВ без инертного окружения.

Кроме того, результаты взрывных испытаний цилиндрических оболочек позволили провести тестирование расчетных модулей программных кодов Б71 и DRACON, что дало возможность спрогнозировать несущую способность разрабатываемого контейнера и уточнить расчетные модели. В частности, была получена зависимость максимально достигаемой кольцевой деформации наружной поверхности в центральном сечении контейнера АТ595 от массы подрываемого заряда ВВ (рис. 2) и выбрана масса заряда ВВ в предстоящих испытаниях.

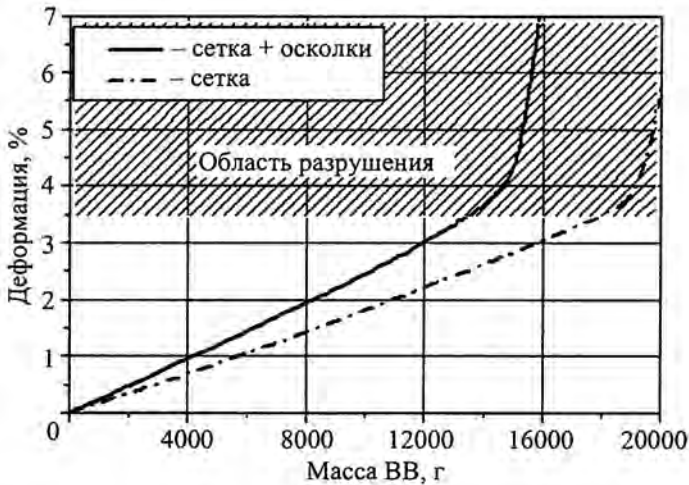


Рис. 2. Зависимость максимально достигаемой кольцевой деформации наружной поверхности в центральном сечении контейнера АТ595 от массы подрываемого заряда ВВ (— заряд ВВ в инертной упаковке, - - - заряд ВВ без инертной упаковки)

В качестве иллюстрации результатов тестирования на рис. 3 приведены экспериментальная и расчетная зависимости кольцевой деформации базальтопластиковой оболочки 150х300 при взрывном нагружении зарядом ВВ (состав ТГ5/5) массой 47,7 г, а на рис. 4 представлена остаточная форма цилиндрических оболочек 150х300 и 300х600, зафиксированная в эксперименте и в расчете, при их нагружении зарядами ВВ массой 81 и 633 г соответственно.

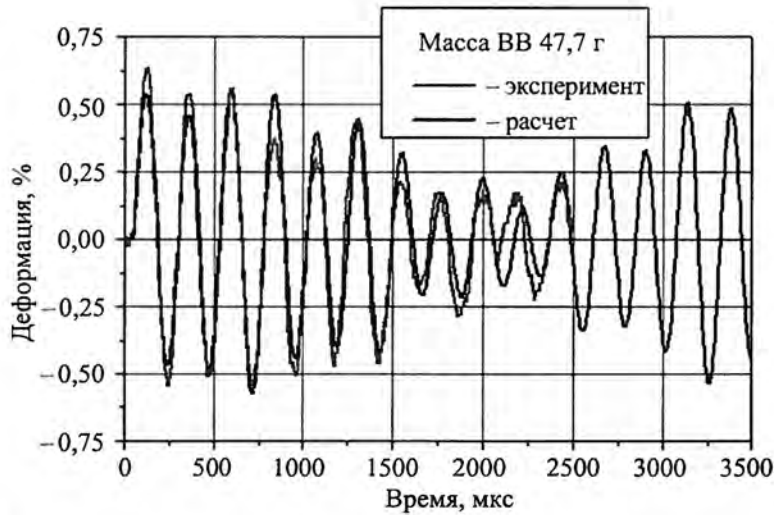


Рис. 3. Временные зависимости кольцевой деформации на наружной поверхности базальтопластиковой оболочки, полученные в эксперименте и в расчете



Рис. 4. Остаточные формы базальтопластиковой оболочки (эксперимент, расчет) после нагружения взрывом заряда ВВ массой 81 г (а) и 633 г (б)

Испытания контейнера AT595

Для экспериментального подтверждения требуемой взрывостойкости контейнера AT595, а также определения его запасов прочности были изготовлены два экземпляра контейнера AT595. Исходя из результатов испытаний открытых цилиндрических образцов и предварительных расчетов, были выбраны режимы нагружения контейнера на номинальную и увеличенную взрывную нагрузку.

Испытания двух экземпляров контейнеров проводились путем нагружения их изнутри взрывом заряда ВВ опасного груза (рис. 5). Первый контейнер после опыта 1 подвергся повторному испытанию в опыте 3. Опасный груз, предназначенный для взрывных испытаний контейнеров, включает следующие элементы:

– инертную упаковку, фактическая масса которой составляет ~38 кг, представляющую собой четырехслойный (свинец, пластик, алюминий, сталь) полый цилиндр, закрытый по торцам четырехслойными крышками (днищами), с закрепленными в центре внутренней полости полусферическими ложементами из алюминиевого сплава, в которых устанавливается заряд ВВ;

– заряд ВВ в форме шара из сплава тротила с гексогеном при соотношении 40:60 с удельной калорийностью 4,93 МДж/кг, фактической массой 7,6 кг (опыт 1), 10,35 кг (опыт 2) и 15,42 кг (опыт 3, без инертной упаковки). При пересчете ТЭ заряда ВВ по калорийности заряд соответствует 8,86, 12,06 и 17,97 кг ТНТ, а по величине импульсного силового воздействия – 8,2, 11,17 и 16,64 кг ТНТ [2].



а



б

Рис. 5. Вид контейнера АТ595 с опасным грузом (а) и зарядом ВВ (б)

При испытании контейнеров для регистрации высокоскоростных процессов использовались такие методики, как скоростная фотохронография и видеосъемка, тензометрирование, электроконтактные измерения [2, 3]. С помощью данных методик определялись деформации и перемещения наиболее ответственных элементов конструкции контейнера АТ595.

Испытание первого экземпляра контейнера

Проведенное взрывное испытание первого экземпляра контейнера АТ595 показало, что контейнер выдержал внутреннее нагружение от взрыва опасного груза, тем самым была подтверждена работоспособность созданного контейнера АТ595 при проектных уровнях нагрузок от взрыва.

Детальную картину процессов, реализуемых при взрывном нагружении контейнера, можно проследить при сопоставлении всей совокупности экспериментальных результатов с данными численного моделирования.

На рис. 6 показано поле распределения давления продуктов взрыва и положение оболочек опасного груза на различные моменты времени.

Анализ деформированного состояния контейнера, проведенный на основании измерений деформаций показал, что определяющим для прочности корпуса является, как и прогнозировалось расчетами, его центральная наиболее нагруженная зона силовой оболочки. Характер распределения максимальных деформаций, достигнутых на наружной поверхности базальтопластиковой оболочки вдоль образующей контейнера за время рассматриваемого процесса нагружения, приведен на рис. 7. Здесь же представлены экспериментальные данные, полученные по различным методикам измерения деформации. Из рис. 7 видно, что максимальный уровень деформации, реали-

зудый над центром взрыва, составляет 1,8–1,9 %. При этом следует отметить, что результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

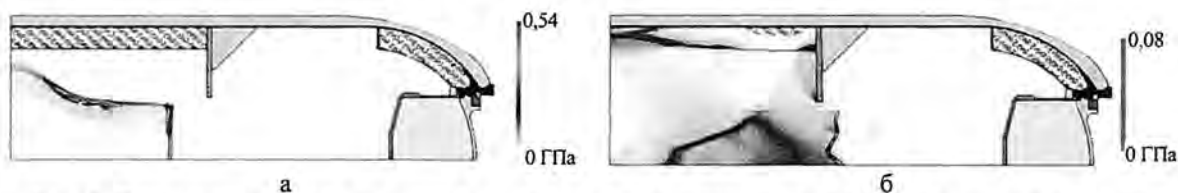


Рис. 6. Поле распределения давления продуктов взрыва и положение оболочек опасного груза на различные моменты времени: а – $t = 137$ мкс; б – $t = 340$ мкс

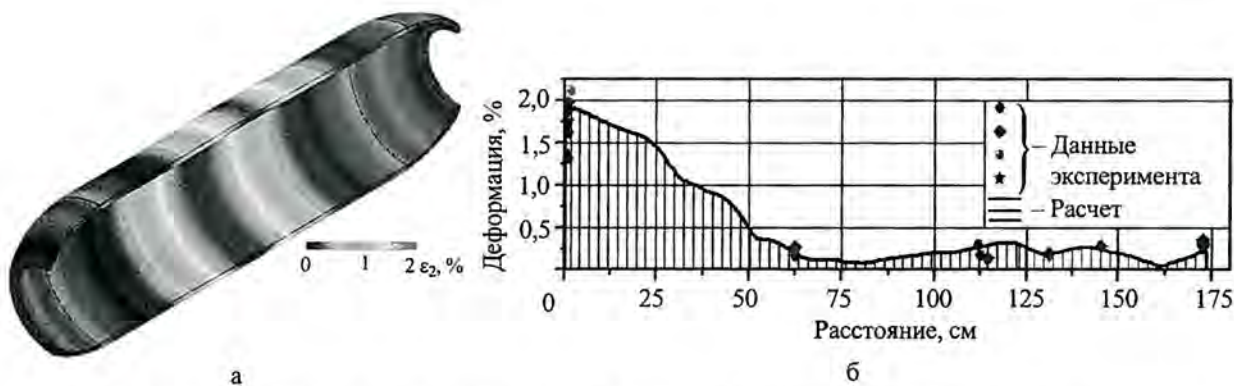


Рис. 7. Распределения максимально достигнутой кольцевой деформации на наружной поверхности базальтопластиковой оболочки (а). Сравнение с результатами эксперимента (б)

Противоосколочный слой из металлической сетки, установленный в полости контейнера, хотя и получил сильные повреждения, защитил корпус изнутри от воздействия осколков. Противоосколочный слой на полусферических днищах повреждений практически не имел. На внутренних крышках демпфера, не защищенных противоосколочным слоем, образовались отверстия от сквозного пробития осколками. Пенопластовые пробки демпфера, устанавливаемые за этими крышками, также были сильно разрушены. Вмятины от осколков имелись даже на силовых крышках.

Судя по характеру повреждений элементов внутренней полости контейнера, наиболее сильные повреждения были вызваны осколками, образовавшимися за счет разрушения как элементов крепления инертной упаковки, так и самой упаковки.

Проведенная после испытания проверка закрытого контейнера АТ595 на герметичность галлоидным течеискателем при закачивании в его полость газовой смеси показала, что скорость истечения газа из его полости оставалась на уровне 10^{-6} см³/с (кроме выявленных мест утечек из отверстия клапана для стравливания давления на одной крышке и зоны уплотнения электроводов на другой крышке, которые при проверке были заглушены), т. е. контейнер при испытании сохранил герметичность.

Испытание второго экземпляра контейнера

При испытании второго экземпляра контейнера АТ595 на внутренний взрыв опасного груза, содержащего сферический заряд ВВ массой 10,35 кг, находящегося в корпусе массой 37,2 кг, бы-

ло продемонстрировано, что контейнер АТ595 сохраняет несущую способность при уровнях нагрузок от взрывных и осколочных воздействий, в $\sim 1,4$ раза превышающих номинальное значение.

Несмотря на то что контейнер сохранил целостность, в двух зонах в центральной части контейнера наблюдались сильные повреждения базальтопластикового слоя (рис. 8). Эти повреждения были вызваны дополнительным (локальным) ударным воздействием на эти зоны через противоосколочный экран (рис. 9) фрагментов тележки, на которую был установлен опасный груз. При этом, наряду с повреждением базальтопластикового слоя, было обнаружено локальное микроповреждение стального слоя.

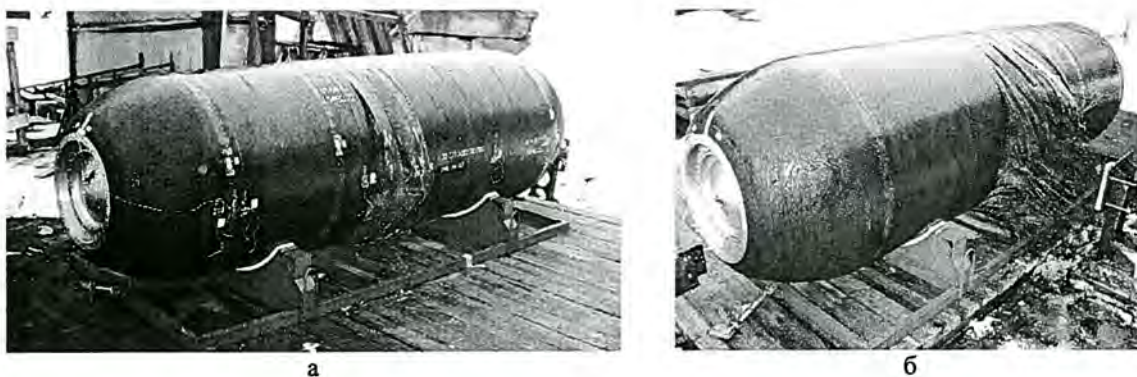


Рис. 8. Второй экземпляр контейнера АТ595 после испытания (а, б – вид с противоположных сторон)



Рис. 9. Вид на противоосколочный экран: а – снаружи; б – изнутри (отмечена зона напротив повреждения базальтопластика)

Так же как и при испытании первого экземпляра контейнера, сквозное пробитие получила внутренняя крышка демпфера (рис. 10). Так как оба контейнера были изготовлены одновременно, во втором контейнере реализовать варианты каких-то дополнительных усилений или защит внутренней крышки уже было невозможно. Тем не менее, с учетом результатов предыдущего эксперимента была введена дополнительная защита наружной силовой крышки контейнера от ожидаемого осколочного воздействия и в конструкцию демпферного отсека установлен пакет металлической сетки, с помощью которого удалось несколько ослабить это воздействие.

Проведенные расчеты в совокупности с результатами измерений деформаций позволяют проанализировать динамическую реакцию контейнера в эксперименте на повышенную нагрузку. На рис. 11 изображено поле распределения давления продуктов взрыва и положение оболочек опасного груза на различные моменты времени. Здесь на момент времени 335 мкс видно, что

днище опасного груза приобретает выпуклую форму со значительным опережением в полюсной части относительно краев. При этом максимальная скорость полюсной точки крышки опасного груза составила 3,3 км/с. Характер пробития внутренней крышки в эксперименте показан на рис. 10.



Рис. 10. Вид внутренних крышек после опыта: а – сбоку; б – с торца

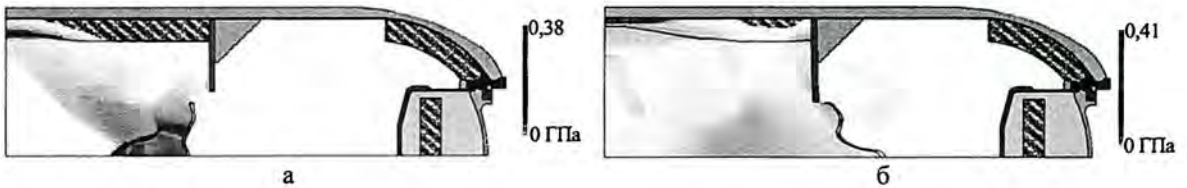


Рис. 11. Поле распределения давления продуктов взрыва и положение оболочек опасного груза на различные моменты времени: а – $t = 212$ мкс; б – $t = 335$ мкс

Распределение максимальных деформаций вдоль образующей контейнера на наружной поверхности базальтопластиковой оболочки приведено на рис. 12. Здесь же представлены экспериментальные данные. Из рис. 12 видно, что максимальный уровень деформации, реализуемый над центром взрыва, составляет 2,8–2,9 %, что еще несколько меньше предельных (разрушающих) значений, которые для базальтопластика составляли ~3,5 % [6]. Здесь, так же как и в предыдущем эксперименте, результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.



Рис. 12. Распределения максимально достигнутой кольцевой деформации на наружной поверхности базальтопластиковой оболочки (а). Сравнение с результатами эксперимента (б)

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что несмотря на имевшие после опыта повреждения, корпус контейнера сохранил целостность, а следовательно, не потерял несущую способность. Следовательно, конструкция контейнера АТ595 по величине разрушающей взрывной нагрузки имеет запас прочности не менее 1,4 и в то же время обладает резервом для оптимизации с целью повышения запаса прочности практически при тех же габаритно-массовых ограничениях.

Повторное испытание первого экземпляра контейнера

Перед повторным испытанием первого контейнера АТ595 были выполнены некоторые его доработки, а именно: удалены элементы противоосколочной защиты, поврежденные в первом испытании, доработаны крышки и элементы их крепления, изготовлены новые демпферные элементы и опорные элементы для размещения в центре полости контейнера подставки с зарядом ВВ. Это испытание проводилось при увеличенном относительно номинала уровне нагрузок от взрыва сферического заряда ВВ массой 15,42 кг, а именно, при уровне нагрузок, когда конструкция заведомо должна быть доведена до разрушения. В испытании произошло разрушение центральной зоны цилиндрического корпуса контейнера на две части (рис. 13), которые разлетелись в противоположные стороны на расстояния ~50 м. То есть был установлен характер разрушения контейнера АТ 595 при таких увеличенных нагрузках и проанализирован его механизм.



Рис. 13. Вид контейнера АТ595 после опыта

Обследование состояния элементов контейнера, а также анализ данных проведенных измерений и расчетов показали, что разрушение центральной зоны контейнера произошло из-за разрушения базальтопластикового слоя при достижении на нем деформаций выше разрушающего уровня спустя ~0,8 мс от подрыва. При этом контейнер, видимо, уже потерял герметичность за счет повреждения стальной оболочки в некоторых местах осколками. Тем не менее, стальная оболочка контейнера, еще некоторое время сохраняла свою несущую способность и совместно с разрушающимся базальтопластиковым слоем не пропускала продуктов взрыва наружу некоторое время, а ее разрушение наступило вследствие обрыва материала вблизи мест сварки с дросселем и последующего разрыва оболочки на несколько частей. Начало выхода продуктов взрыва из контейнера было визуально зафиксировано по их свечению скоростной кинорегистрацией, через ~4 мс после подрыва (рис. 14). После этого контейнер потерял конструкционную целостность и его части разлетелись в противоположные стороны.

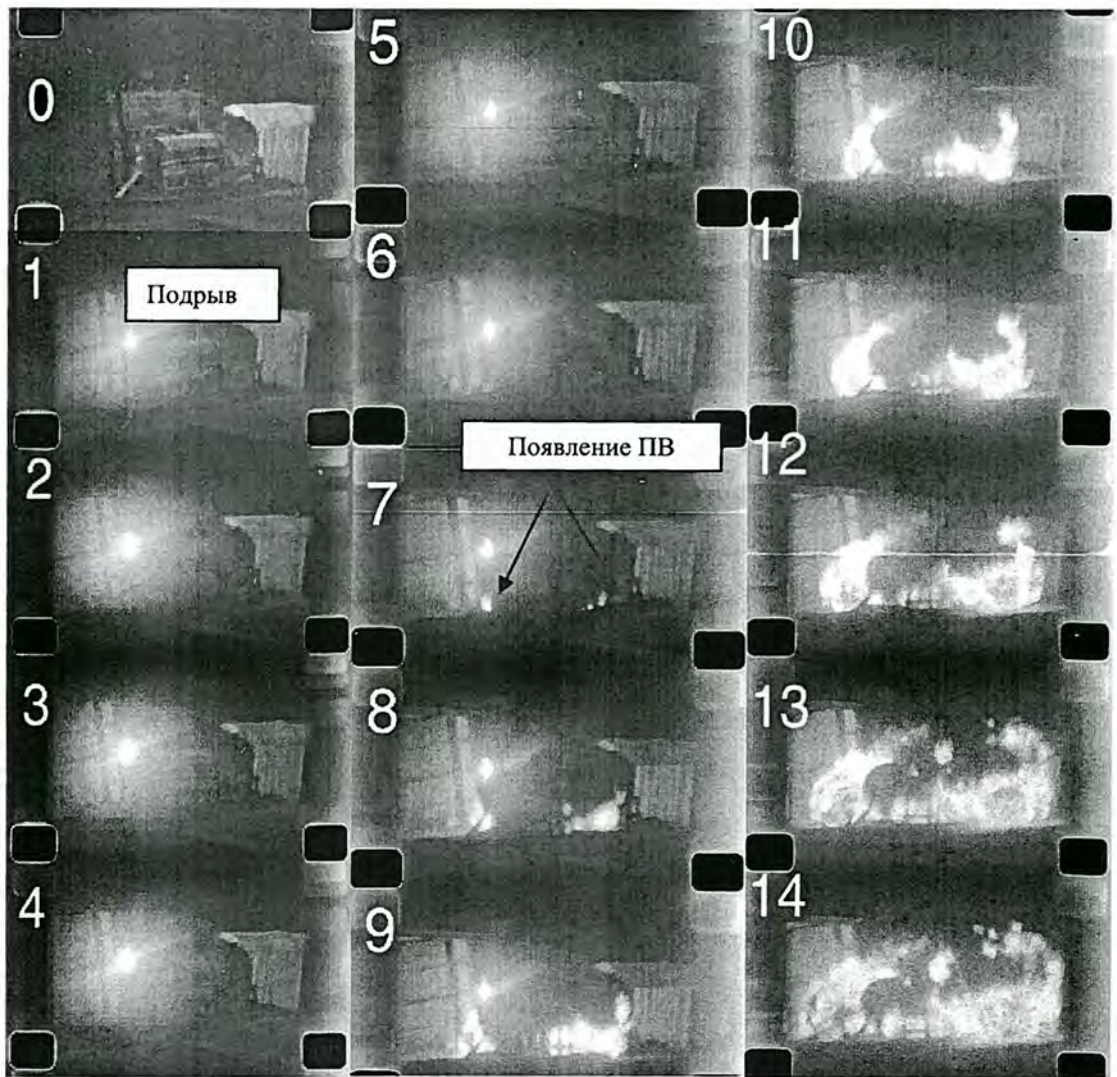


Рис. 14. Кинокадры разрушения контейнера. Частота съемки 1500 кадров/с (период смены кадров 667 мкс)

На основании проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований было показано и обосновано, что разработанная конструкция контейнера АТ595 обеспечивает требуемую взрывостойкость, т. е. герметичное удержание внутри своей полости продуктов взрыва заряда ВВ массой ~ 8 кг в тротиловом эквиваленте в упаковке из инертного материала массой ~35 кг, и имеет при этом запас прочности не менее 1,4 раза относительно номинала. Разрушение контейнера АТ595 произошло за счет разрушения центральной зоны корпуса, при его повторном нагружении зарядом ВВ (без инертной упаковки), превосходящим более чем в два раза по энерговыделению номинальный заряд ВВ.

Работа выполнена в рамках контракта № 12831 между СНЛ (США) и ВНИИЭФ (Россия).

Список литературы

1. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2003. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" 2004.
2. Разрушения разномасштабных объектов при взрыве: Монография // Под общей ред. проф. Иванова А. Г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
3. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г. Реакция на нагружение и прочность стеклопластикового контейнера при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. Вып. 3. С. 127–136.
4. 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 // International Journal of Impact Engineering. 1999. Vol. 23. С. 63–66.
5. Патент РФ1793790. Взрывозащитный контейнер / В. А. Рыжанский, В. Н. Русак, С. Н. Заикин // БИ. 1995, № 4.
6. Русак В. Н., Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Соболев Л. А., Суханов А. В., Попов В. Г. Предельная деформируемость и прочность базальтопластиковых оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43, № 1. С. 186–195.
7. 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 // Прикладная механика и техническая физика. 1992, № 4. С. 130–135.
8. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
9. Абакумов А. И., Низовцев П. Н., Певницкий А. В., Соловьев В. П. Программный комплекс DRACON для расчета упругопластических течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближении // Тезисы докладов международной конференции (IV Заббахинские научные чтения). 1995. С. 89–90.

Development of A595 Explosion-Resistant Container Design. Numerical, Theoretical and Experimental Justification of the Container Design Parameters

A. I. Abakumov, I. V. Devyatkin, V. Yu. Meltsas, A. L. Mikhailov,
G. F. Portnyagina, V. N. Rusak, V. P. Solovyev, M. A. Syrunin, S. M. Treshalin,
A. G. Fedorenko

The paper presents the results of numerical and experimental study on the AT595 metal-composite container designed in VNIIEF within the framework of international collaboration with SNL (USA). This container must completely contain products of an 8-kg-TNT detonation cased in 35 kg of inert surrounding material. Numerical and theoretical studies have been carried out of the containment capacity and fracture of smallscale open cylinder test units and container pressure vessel models subjected to different levels of specific explosive load (beneath, equal to and above the required design load defined for this container), and two AT595 containers have been tested for the design load and a higher load.