

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА ПРИ АВАРИЙНЫХ ПАДЕНИЯХ

*Вакуленко Сергей Александрович (SAVakulenko@vniief.ru),
Рябов Александр Алексеевич, Романов Владимир Игоревич,
Маслов Евгений Евгеньевич, Калинина Юлия Александровна*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время ведутся работы по созданию транспортного контейнера (ТК), предназначенного для перевозки специальных изделий. Согласно регламентирующим документам необходимо обосновать безопасность эксплуатации ТК с изделиями. Эксплуатация считается безопасной в случае отсутствия детонации изделий в нормальных и аварийных условиях. Наиболее тяжелой из вероятных аварийных ситуаций является обрыв строп и падение ТК на бетонное основание при погрузочно-разгрузочных работах.

Доказательство безопасности ТК проводится на основе компьютерного моделирования. В докладе представлены результаты расчетов динамического деформирования ТК при падениях с высоты 15 м. Рассмотрены три сценария падения, отличающихся ориентацией изделия по отношению к поверхности преграды в момент соударения.

Численное моделирование выполнено на основе детальной трехмерной модели конструкции в рамках отечественного программного комплекса ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ.

Ключевые слова: контейнер, компьютерное моделирование, ЛОГОС, падение с высоты 15 м, жесткая преграда, динамическое деформирование, прочность, безопасность, аварийная ситуация.

COMPUTATIONAL JUSTIFICATION OF TRANSPORT CONTAINER SAFETY AT ACCIDENT DROP

*Vakulenko Sergey Aleksandrovich (SAVakulenko@vniief.ru),
Ryabov Alexander Alekseevich, Romanov Vladimir Igorevich,
Maslov Evgeniy Evgeneevich, Kalinina Julia Aleksandrovna*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Currently, work is underway to create a transport container intended for transportation of special products. According to regulatory documents it is necessary to justify the safety of operation of the transport container with products. Operation is considered safe in case of absence of detonation of products in normal and accident conditions. The most severe of the probable accident situations is the breaking of slings and the drop of the transport container on the concrete basis during handling works.

The proof of the transport container safety is carried out on the basis of computer simulation. The report presents the results of calculations of dynamic deformation of the transport container at drops from a height of 15 m. Three drop scenarios are considered, which differ in the orientation of the product in relation to the surface of a barrier at the moment of impact.

Numerical modelling is carried out on the basis of a detailed three-dimensional model of the design within the framework of the domestic software complex LOGOS-Strength.

Key words: container, computer simulation, LOGOS, drop from a height 15 m, hard barrier, dynamic deformation, strength, safety, accident situation.

В настоящее время ведутся работы по созданию транспортного контейнера (ТК), предназначенного для перевозки специальных изделий. Согласно регламентирующим документам необходимо обосновать безопасность эксплуатации ТК с изделиями. Согласно тем же регламентирующим документам доказательство безопасности можно проводить как экспериментальным, так и расчетным путем. Из-за дороговизны спец изделий и уникальности изготовленного опытного образца ТК выбран расчетный способ обоснования безопасности.

Эксплуатация считается безопасной в случае отсутствия детонации изделий в нормальных и аварийных условиях. Наиболее тяжелой из вероятных аварийных ситуаций является обрыв строп и падение ТК на бетонное основание при погрузочно-разгрузочных работах. Анализ схемы перемещений ТК показывает, что максимальная высота падения в аварийной ситуации может составить 15 м.

Конструкция ТК

Общий вид конструкции ТК представлен на рис. 1. Конструкция ТК представляет собой силовой каркас, внутри которого размещены 4 капсулы. Каркас изготовлен из стальных швеллеров и плит. В нижней части каркаса расположены элементы питания – аккумуляторные батареи. Капсулы окружены блоками из сферопластика ЭДС-500.

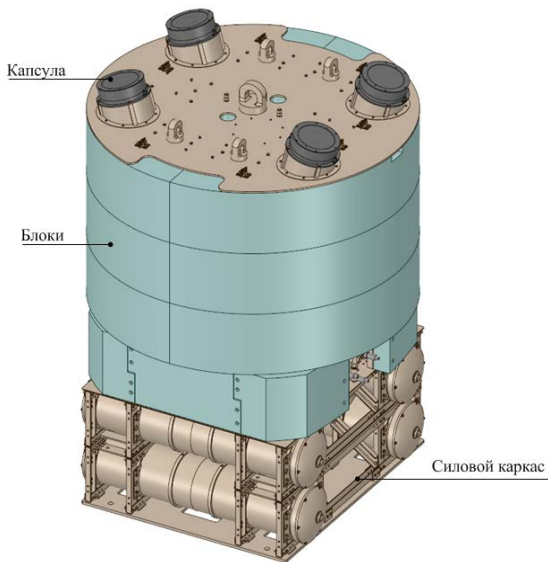


Рис. 1. Общий вид конструкции ТК

В каждой капсуле размещается специальное изделие, в состав которого входит устройство с небольшим зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Для компенсации внешнего гидростатического давления пространство между внутренней поверхностью капсулы и изделием заполнено жидкостью, объем которой составляет 85 л.

На основе твердотельной CAD-модели конструкции разработана детальная трехмерная расчетная конечно-элементная модель ТК, которая учитывает точные геометрические параметры и основные конструктивные особенности конструкции, которые в той или иной степени могут влиять на его прочность. Общий вид расчётной модели ТК представлен на рис. 2.

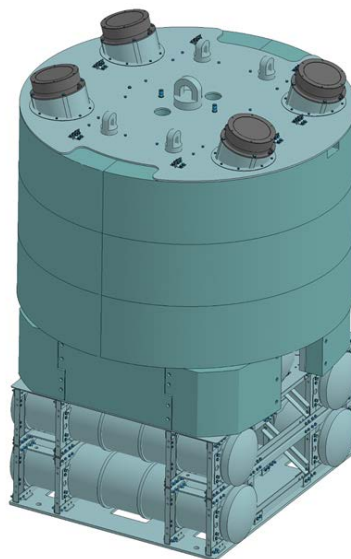


Рис. 2. Расчетная модель ТК

В расчетной модели используются конечные элементы трех типов:

- 8-узловые конечные элементы сплошной среды (SOLID, для массивных элементов конструкции);
- 4-узловые тетрагональные конечные элементы сплошной среды (SOLID_TETRA, для блоков);
- поведение жидкости, заполняющей полость между устройством и капсулой и описывается на основе бессеточной SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics) технологии.

Количество элементов в расчетной модели и их распределение по типам представлено в таблице. Характерный размер конечных элементов в модели составляет 5 мм. Фрагменты конечно-элементной сетки показаны на рис. 3.

Количество конечных элементов в модели

Тип элемента	Количество
SOLID	12 150 772
SOLID_TETRA	1 565 151
SPH	318 376
Итого	13 715 923

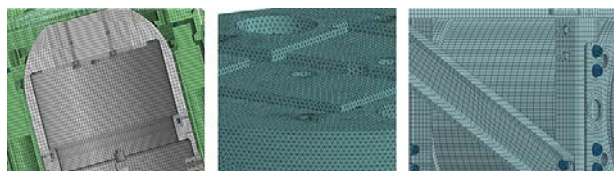


Рис. 3. Фрагменты КЭМ

Динамическое деформирование ТК описывается в упругопластической и геометрически нелинейной постановке с учетом нестационарного контактного взаимодействия с переменными границами элементов упаковки между собой с возможностью взаимного проскальзывания.

Коэффициент трения для учета сил трения между контактными поверхностями принимается равным $f_{тр} = 0,2$. Преграда моделируется заданием специального граничного условия «абсолютно жесткая стенка». Начальные условия задачи задаются в виде равномерного поля скорости, направленной перпендикулярно к преграде, приложенного ко всем элементам конструкции. Величина начальной скорости конструкции при падении с высоты $H = 15$ м составляет $V|_{t=0} = 17,16$ м/с.

Деформирование конструкции происходит в однородном поле силы тяжести. Принятое для расчетов значение ускорения свободного падения составляет $9,81$ м/с².

Критерии безопасности

ВВ, из которого состоит заряд устройства внутри спец изделия, является низко чувствительным к механическим воздействиям. Критическое давление возникновения детонации составляет от 3 до 3,5 ГПа. При высокоскоростном внедрении шарового осколка в данное ВВ происходит затухающее взрывное разложение, локализованное вблизи проникания. Руководствуясь указанными фактами о свойствах ВВ, можно принять, что в аварийных ситуациях с ТК детонация отсутствует при выполнении следующих условий:

- а) отсутствие внедрения во внутреннюю часть специального изделия каких-либо элементов конструкции;
- б) максимальное контактное давление на поверхности ВВ не превышает величину давления 3 ГПа.

Расчетные случаи

Необходимо определить такое положение ТК при падении с высоты 15 м, при котором наносится максимальный ущерб специальному устройству, поэтому в первую очередь рассматриваются такие положения конструкции, при которых ударное воздействие от падения приходится непосредственно на изделие. Рассматриваются три сценария аварийного падения ТК с высоты 15 м, отличающихся ориентацией ТК в момент соударения с преградой (см. рис. 4).

В первом расчетном случае, рис. 4,а, ось капсулы перпендикулярна плоскости преграды, что должно привести к повышенному ударному воздействию на устройство. Во втором случае, рис. 4,б, ожидаются изгибные деформации капсулы и изделия, что может привести к разрушению их корпусов и внедрению фрагментов в устройство.

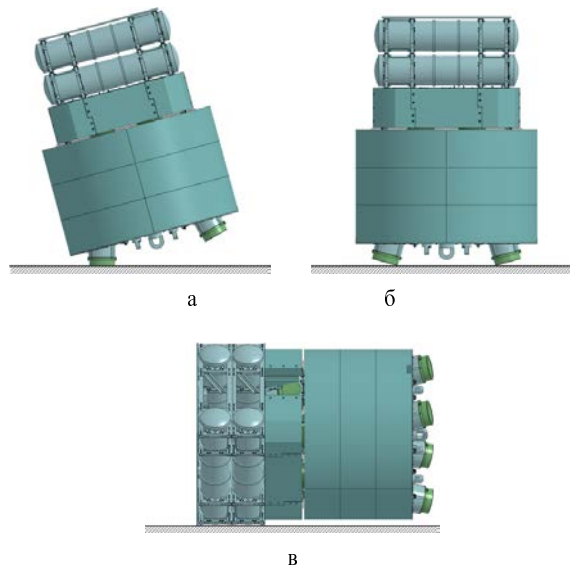


Рис. 4. Сценарии падения ТК с высоты 15 м: а – нормальный удар по капсуле, б – осевое падение ТК на верхнюю часть, в – боковое падение ТК

Дополнительно рассматривается расчетный случай – падение ТК на бок, рис. 4,в. Предполагается, что в этом расчетном случае конструкция может получить наибольшие повреждения по сравнению с другими вероятными ориентациями, такими как осевое падение ТК и нормальный удар по капсуле.

Результаты расчетов

На рис. 5 представлена деформированная конфигурация конструкции ТК при нормальном ударе, рис. 4,а, по капсуле на момент времени, когда центр масс конструкции находится в самом нижнем положении к преграде.

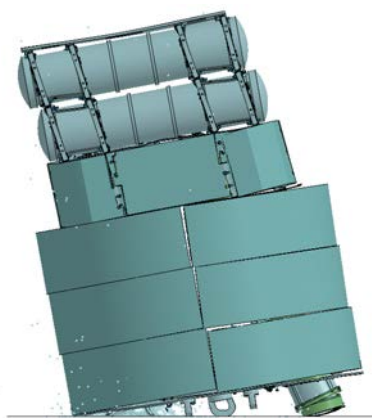


Рис. 5. Деформированная конфигурация ТК

В результате удара о жесткую преграду происходит разрушение крышек капсул и их крепежных элементов. Жидкость начинает вытекать из капсулы, о чем свидетельствует выход SPH-частиц из внутреннего объема капсул. Причем жидкость выходит не только через разрушенные крышки, но и через деформированные стыки отсеков капсулы.

Анализ результатов расчета показывает, что во всех кронштейнах и элементах крепления устройства максимальное значение интенсивности полных деформаций составляет 20 %, что меньше предельной деформации для стали 20 ($\delta = 25\%$), из которой они выполняются. Поэтому обрыв устройства и его свободный полет внутри изделия не прогнозируется. Максимальное значение деформаций корпусных деталей устройства составляет 3,2 %, что ниже предельного значения материала корпуса (сплав АМг6, $\delta = 15\%$). Поэтому можно сделать заключение о сохранении прочности элементов устройства и исключить внедрение корпусных элементов внутрь заряда. Максимальное контактное давление на поверхности заряда составляет 1,6 МПа, что значительно меньше критического давления в 3 ГПа. На рис. 6 показано поле давления на поверхности ВВ при нормальном ударе по капсуле.

Деформированная конфигурация ТК при падении на верхнюю часть (осевое), рис. 4,б, показана на рис. 7.

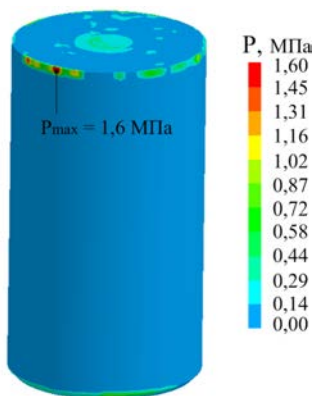


Рис. 6. Контактное давление на поверхности заряда

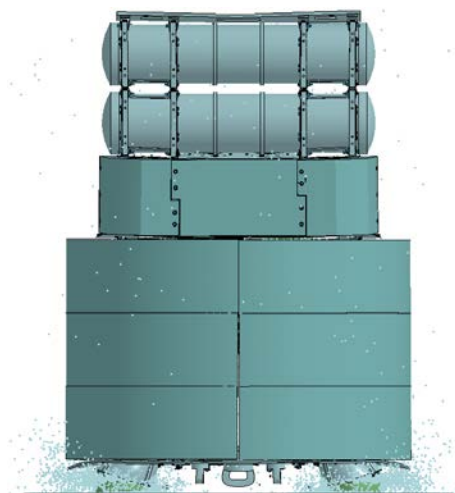


Рис. 7. Деформированная конфигурация ТК

В результате удара о жесткую преграду происходит разрушение крышек капсул и их крепежных элементов. Жидкость выходит из капсул, о чем свидетельствует выход расчетных SPH-частиц из внутреннего объема капсул.

Анализ результатов расчетов показывает, что во всех кронштейнах, элементах крепления устройства к кронштейнам максимальное значение интенсивности полных деформаций 15 %, что не превышает относительного удлинения на разрыв для стали 20 ($\delta = 25\%$), из которой они выполняются.

Детали корпуса устройства испытывают незначительные деформации. Максимальное значение деформации растяжения в деталях корпуса устройства составляет 1%, что ниже предельного значения для материала корпуса – сплав АМг6, $\delta = 15\%$. Максимальное контактное давление на поверхности ВВ достигает значения 0,84 МПа, что на четыре порядка меньше критического значения 3 ГПа. На рис. 8 показано поле давления на поверхности ВВ при осевом падении ТК.

Деформированные конфигурации ТК при боковом падении, рис. 4,в, изображены на рис. 9 и 10.

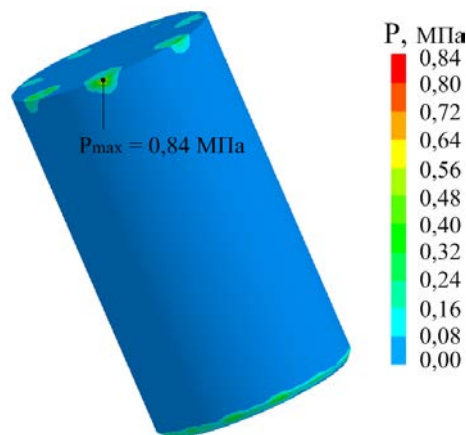


Рис. 8. Контактное давление на поверхности заряда

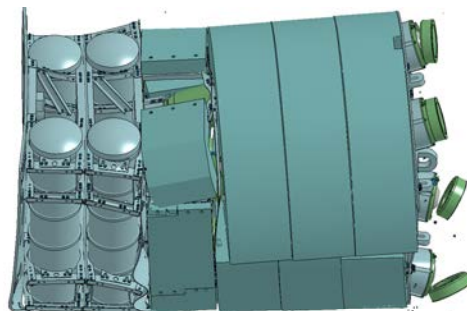


Рис. 9. Деформированная конфигурация ТК

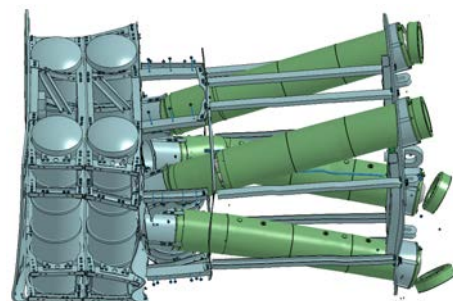


Рис. 10. Деформированная конфигурация ТК (блоки не показаны)

В результате удара ТК о жесткую преграду происходит разрушение крепежных элементов крышек капсул. Крышки срываются с мест крепления. Жидкость начинает вытекать из капсул.

В кронштейнах, элементах крепления устройства, максимальное значение интенсивности полных деформаций 5 %, что не превышает относительного удлинения на разрыв для стали 20 ($\delta = 25 \%$). Поэтому можно сделать заключение о том, что устройство не срывается с мест крепления.

Максимальное значение растягивающей деформации в деталях корпуса устройства составляет 14 %, что ниже относительного удлинения при разрыве сплава АМг6 ($\delta = 15 \%$), из которого изготавливается корпус. Поэтому можно заключить, что корпусные детали устройства сохраняют прочность. Внедрение фрагментов конструкции в устройство не прогнозируется.

Максимальное контактное давление на поверхности заряда достигает значения 2,282 МПа, что на три порядка меньше критического значения.

Выводы

На основе детальной трехмерной конечно-элементной модели конструкции выполнены расчеты динамического деформирования и анализ прочности ТК в условиях аварийных механических воздействий, вызванных падением ТК с высоты $H = 15$ м на жесткое плоское основание. Рассмотрены три сценария аварийных падений контейнера.

На основании анализа результатов расчетов можно сделать следующие выводы:

а) при нормальном ударе по капсуле:

– из-за разрушения крепежа происходит отделение крышки капсулы. Жидкость вытекает из внутреннего объема капсулы;

– крепеж устройства сохраняет прочность. Устройство не срывается с мест крепления. Деформации корпусных деталей не достигают предельных значений. Прочность корпуса устройства сохраняется. Внедрение каких-либо фрагментов конструкции в устройство не происходит;

– максимальное значение контактного давления на поверхности заряда устройства составляет 1,6 МПа, что значительно меньше критического значения;

б) при осевом падении ТК на верхнюю часть:

– из-за разрушения крепежа происходит отделение крышек капсул. Жидкость покидает внутренний объем капсул;

– кронштейны и элементы крепления устройства сохраняют прочность. Обрыв устройства не происходит;

– детали корпуса устройства испытывают незначительные деформации и сохраняют прочность. Внедрение каких-либо фрагментов конструкции в устройство не происходит;

– максимальное значение контактного давления на поверхности ВВ составляет 0,84 МПа, что значительно меньше критического значения;

в) при падении ТК на бок:

– из-за разрушения крепежа происходит отделение крышек капсул. Жидкость покидает внутренний объем капсулы;

– кронштейны и элементы крепления устройства сохраняют прочность. Обрыв устройства не происходит;

– детали корпуса устройства испытывают незначительные деформации и сохраняют прочность. Внедрение фрагментов конструкции в изделие и в устройство внутри изделия не происходит;

– максимальное значение контактного давления на поверхности заряда составило 2,28 МПа, что значительно меньше критического значения.

Заключение

Для рассмотренных сценариев аварийных падений ТК на жесткое плоское основание с высоты $H = 15$ м, отличающихся ориентацией контейнера в момент начала удара, обрыв устройства с мест крепления не происходит. Корпус устройства сохраняет прочность. Внедрение элементов конструкции в специальное изделие и в устройство внутри изделия не происходит. Во время ударного взаимодействия ТК с преградой контактное давление на поверхности ВВ, входящего в состав устройства, на три-четыре порядка ниже порогового значения детонации. Поэтому можно сделать вывод, что при аварийных падениях ТК детонации изделия не происходит.