ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОМПЛЕКТА УПАКОВОЧНОГО ТУК-27/1 ПРИ ИСПЫТАНИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ АВАРИЙНЫЕ УСЛОВИЯ ПЕРЕВОЗКИ ЛОВУШЕК, СОДЕРЖАЩИХ ГЕКСАФТОРИД УРАНА

К. К. Новичков[а], О. И. Федин[б], Н. А. Шубин[в]
АО «НИИ НПО «ЛУЧ» (Акционерное общество «Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ»), Подольск, Российская Федерация
[а] *KKNovichkov@rosatom.ru,* [б] *OIFedin@rosatom.ru,* [в] ✍ *ShubinNA@sialuch.ru*

Аннотация: в настоящей работе проведено обоснование прочности и герметичности пенала для ловушек с гексафторидом урана из состава упаковочного комплекта ТУК-27/1 при всех видах динамических воздействий, имитирующих аварийные условия перевозки в соответствии с требованиями Правил НП-053-16, предъявляемых к упаковкам типа В.

Данная работа является частной задачей общего обоснования прочности при использовании ТУК-27/1 для перевозки ловушек, содержащих гексафторид урана. Для обоснования прочности защитного контейнера из состава упаковки использовались результаты межведомственных натурных испытаний ТУК-27. Определение напряженно-деформированного состояния металлической конструкции нового пенала для ловушек с гексафторидом урана проводилось путем решения системы уравнений для сплошной среды, записанных в переменных Лагранжа. Для интегрирования указанной системы уравнений применялся метод конечных элементов с использованием явного интегрирования по времени, реализованный в аттестованном программном комплексе ANSYS LS-DYNA. Все физико-механические характеристики металлов, из которых изготовлены новые пеналы, консервативно принимались на основании данных, приведенных в ПНАЭ Г-7-002-86. При задании материалов конструктивных элементов пеналов в расчетной модели принималась билинейная аппроксимация диаграммы нагружения соответствующего металла.

Результаты проведенных расчетов позволили обосновать безопасность использования новых пеналов для ловушек с гексафторидом урана в части прочности при транспортировке упаковочного комплекта ТУК-27/1 в соответствии с действующими на территории Российской Федерации правилами.

Ключевые слова: уран, гексафторид, транспортный упаковочный комплект, программное средство, численные методы, метод конечных элементов, ANSYS LS-DYNA, расчет, прочность, пенал, ловушки, корзина, контейнер.

Для цитирования: Новичков К. К., Федин О. И., Шубин Н. А. Обоснование прочности комплекта упаковочного ТУК-27/1 при испытаниях, имитирующих аварийные условия перевозки ловушек, содержащих гексафторид урана. *Успехи кибернетики.* 2026;7(3):110–117.

Поступила в редакцию: 27.08.2026. *В окончательном варианте: 23.09.2026.*

STRUCTURAL INTEGRITY OF THE TUK-27/1 PACKAGING SYSTEM IN SIMULATED TRANSPORTATION ACCIDENTS INVOLVING URANIUM HEXAFLUORIDE TRAPS

K. K. Novichkov[a], O. I. Fedin[b], N. A. Shubin[c]
LUCH Research Institute, Podolsk, Russian Federation
[a] *KKNovichkov@rosatom.ru,* [b] *OIFedin@rosatom.ru,* [c] ✍ *ShubinNA@sialuch.ru*

Abstract: we assessed the structural integrity and leak tightness of a new protective case for uranium hexafluoride traps used in the TUK-27/1 transport package under dynamic loads simulating the accident conditions specified for Type B packages by NP-053-16. The study forms part of the overall safety assessment of the TUK-27/1 for transporting uranium hexafluoride traps. Results from full-scale tests of the TUK-27 transport package conducted by an interdepartmental commission were used as a basis for assessing the structural integrity of the new protective case. We performed a stress-strain analysis of its metal frame by solving the equations of continuum mechanics in Lagrangian coordinates. The equations were integrated using an explicit time-stepping finite-element method implemented in the certified ANSYS LS-DYNA software package. The physical and mechanical properties of the case materials were conservatively taken from PNAE G-7-002-86. The material

models used a bilinear approximation of the stress-strain curves for the respective metals. The calculations demonstrated that the new protective cases retain their structural integrity and safety under the specified accident loads during transport of the TUK-27/1 transport package in accordance with the applicable Russian regulations.

Keywords: uranium, hexafluoride, transport package, software, numerical methods, finite element method, ANSYS LS-DYNA, analysis, structural integrity, canister, traps, basket, container.

Cite this article: Novichkov K. K., Fedin O. I., Shubin N. A. Structural Integrity of the TUK-27/1 Packaging System in Simulated Transportation Accidents Involving Uranium Hexafluoride Traps. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(3):110–117.

Original article submitted: 27.08.2026. *Revision submitted: 23.09.2026.*

Введение

В данной работе было проведено расчетное обоснование сохранения прочности и герметичности нового пенала ТУК-27/1 при наиболее опасных испытаниях на механические повреждения, имитирующих аварийные условия перевозки.

Численные расчеты упаковочного комплекта проведены методом конечных элементов, реализованным в аттестованной программе ANSYS LS-DYNA. Погрешность не превышает 10 %.

Обоснование прочности транспортного упаковочного комплекта ТУК-27/1, предназначенного для перевозки гексафторида урана (ГФУ), при всех видах динамических воздействий, имитирующих аварийные условия перевозки, проведено в соответствии с требованиями Правил НП-053-16 (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» НП-053-16. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору России. М., 2016), предъявляемых к упаковкам типа В.

Данные о механических характеристиках материалов взяты в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86 (Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, Госатомэнергонадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989).

Материалы и методы

Согласно отчету об испытаниях НРП-93 (Нормы расчета на прочность транспортных упаковочных комплектов для перевозки ядерных делящихся материалов, Минатом России. М., 1993) приемочные межведомственные испытания транспортного упаковочного комплекта ТУК-27 были проведены в два этапа: первый — в октябре 1991 г., второй — в феврале 1992 г. Целью испытаний было определение его соответствия требованиям Правил ОПБЗ-83 при нормальных и аварийных условиях транспортирования.

Результаты зачетных механических испытаний на аварийные ситуации при транспортировании включали падения с высоты 9 м на жесткое основание на крышку, днище, образующую и кромку крышки, а также с высоты 1 м на штырь наиболее поврежденной частью в каждом из этих же положений. Наиболее опасным повреждением, полученным после падения на штырь смятой образующей, явилось образование отверстия на наружной обечайке с пробитием слоя теплоизоляции (перлитобетон) на глубину 100 мм. При всех остальных падениях образовались пластические повреждения, не приводящие к разрушению наружных обечаек, а также частичное ослабление крепежных элементов защитного контейнера. Нарушения герметичности внутренней емкости, а также отрыва крышки защитного контейнера ни в одном случае не обнаружено.

С учетом результатов тепловых испытаний сделан вывод о соответствии ТУК-27 требованиям Правил ОПБЗ-83 (Основные правила безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов. М., 1983). Для повышения прочности разъема защитного контейнера принято решение о ряде конструктивных изменений для элементов крепления крышки к корпусу, которые вошли в окончательную конструкцию ТУК-27 и ТУК-27/1.

Требования Правил безопасности при транспортировании радиоактивных материалов НП-053-16 в части механических воздействий на упаковки данного типа аналогичны требованиям Правил ОПБЗ-83. С учетом того, что масса заполненного пенала в составе ТУК-27/1 не превышает массу содержимого ТУК-27, можно распространить выводы о сохранении прочности защитного контейнера ТУК-27 на ТУК-27/1.

Для оценки прочности и определения степени возможного повреждения пеналов с ловушками из состава ТУК-27/1 при ударном взаимодействии с жесткой мишенью были проведены численные расчеты его конструкции методом конечных элементов с использованием аттестованной программы ANSYS LS-DYNA. Определение напряженно-деформированного состояния металлоконструкций в программном средстве ANSYS LS-DYNA проводится путем решения системы уравнений для сплошной среды, записанных в переменных Лагранжа. Система уравнений включает в себя уравнения сохранения импульса, энергии, а также граничные и начальные условия. В качестве граничных условий используются силовые и кинематические параметры, задаваемые в узлах конечно-элементной сетки расчетной модели. Для интегрирования вышеуказанной системы уравнений применяется метод конечных элементов с использованием явного интегрирования по времени. Для моделирования разрушения материала используется алгоритм эрозии, суть которого состоит в исключении элемента из расчетной схемы при достижении в нем заранее определенных критериев разрушения. Задачи контактного взаимодействия решаются с использованием несогласованных сеток, что позволяет описывать процессы деформирования среды при любых относительных смещениях контактных границ. При этом учитывается возможный отрыв или проскальзывание контактирующих поверхностей.

Механические характеристики материалов, из которых изготовлены основные конструктивные элементы ТУК, принимались на основании данных, приведенных в ПНАЭ Г-7-002-86.

Описание расчетной модели ТУК-21/1

На рисунке 1 представлен общий вид трехмерной модели ТУК-27/1. На рисунке 2 показана конечно-элементная модель ТУК-27/1, где подробно представлены все основные силовые элементы ТУК, взаимодействие которых осуществлялось посредством их контактов между собой. Все конструктивные элементы ТУК-27/1 моделировались при помощи четырех- и восьмиузловых объемных конечных элементов.

При расчете прочности для моделирования усилий, передаваемых со стороны содержимого на ТУК-27/1, использовалась массогабаритная модель содержимого с соответствующей массой. Содержимое и основание моделировалось в виде недеформируемых тел, что идет в запас расчета.

Расчеты проводились в геометрически и физически нелинейной постановке.

Для элементов конструкции ТУК, выполненных из стали марки 12Х18Н10Т, принимались следующие характеристики прочности и упругости при температуре +50 °С в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86:

модуль упругости ..... $E = 202$ ГПа
коэффициент поперечной деформации ..... $\nu = 0{,}3$
условный предел текучести ..... $\sigma_{0,2} = 191$ МПа
временное сопротивление при разрыве ..... $\sigma_{\text{в}} = 480$ МПа
относительное удлинение при разрыве ..... $\delta = 37$ %

Для элементов конструкции ТУК, выполненных из стали марки 38ХН3МФА, принимались следующие характеристики прочности и упругости при температуре +50 °С в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86:

модуль упругости ..... $E = 212$ ГПа
коэффициент поперечной деформации ..... $\nu = 0{,}3$
условный предел текучести ..... $\sigma_{0,2} = 880$ МПа
временное сопротивление при разрыве ..... $\sigma_{\text{в}} = 981$ МПа
относительное удлинение при разрыве ..... $\delta = 11$ %

При падении с 9 м начальная скорость соударения ТУК-27/1 с жестким основанием составляет:

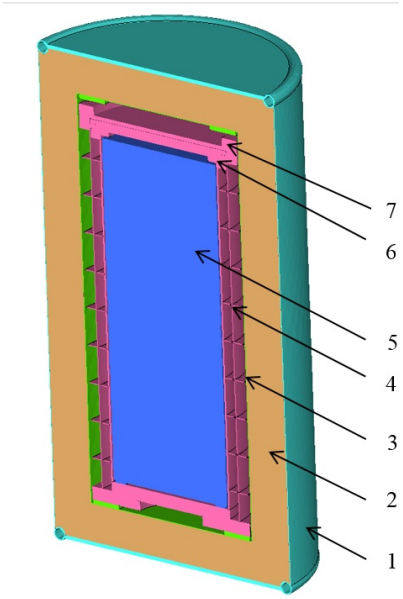
$$\mathrm{V_H} = \sqrt{2 \cdot \mathrm{g} \cdot \mathrm{H}} = 13{,}3 \text{ м/с}, \qquad (1)$$

где H = 9 — высота падения упаковки;

g = 9,81 $/^2$ — ускорение свободного падения.

К узлам модели прикладывалась начальная скорость соударения с мишенью, равная V (см. формулу (1)). В ходе работы были проанализированы следующие варианты падений ТУК:

- вертикальные падения на днище и крышку;
- наклонный удар кромкой крышки контейнера (ориентация ТУК-27/1 выбиралась таким образом, чтобы ось, проведенная из точки касания с мишенью и проходящая через центр масс упаковки, была перпендикулярна плоскости мишени);
- удар образующей корпуса контейнера (горизонтальное падение).



1 — наружная обечайка контейнера; 2 — перлитобетон контейнера; 3 — внутренняя обечайка контейнера; 4 — пенал; 5 — содержимое пенала; 6 — крышка пенала внутренняя; 7 — крышка пенала наружная

Рис. 1. *Общий вид трехмерной модели ТУК-27/1 в разрезе*

Падение с 9 м на кромку крышки контейнера ТУК-27/1

Основные результаты расчета для рассматриваемого варианта падения упаковки сводятся к следующему.

На рисунке 3 показана схема деформирования ТУК-27/1 после его падения на кромку крышки. Энергия удара при данном варианте ориентации контейнера при падении, а также всех рассматриваемых далее вариантах, поглощается, в основном, за счет деформации перлитобетона и внешней стальной оболочки контейнера. Деформации основных конструктивных элементов пенала незначительны (см. рис. 4).

Наибольшие пластические деформации локализуются в шляпках 4-х ближайших к месту удара болтов наружной крышки и не превышают 10 %. Пластические деформации болтов внутренней крышки не превышают 0,6%.

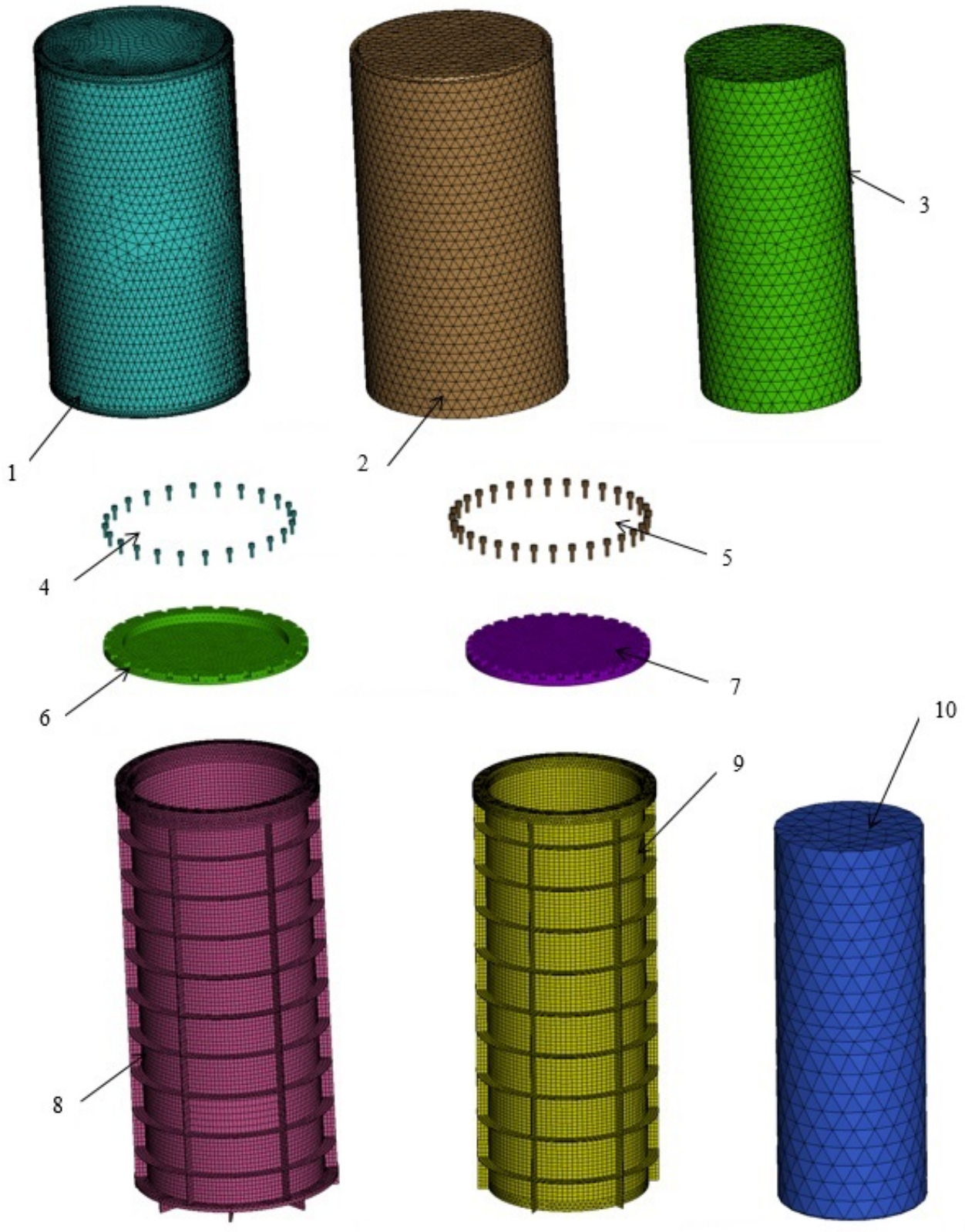
Величина раскрытия стыка между наружной крышкой и наружной емкостью и между внутренней крышкой и внутренней емкостью за все время удара не превышает соответственно 0,3 мм и 0,4 мм. Полученные значения раскрытия стыков значительно ниже величины обжатия герметизирующих прокладок 2 мм. Таким образом, можно сделать вывод, что герметичность узлов крепления крышек пенала сохраняется.

Падение с 9 м на плоскость крышки контейнера ТУК-27/1

Основные результаты расчета для рассматриваемого варианта падения упаковки сводятся к следующему.

На рисунке 5 показана схема деформирования верхней части корпуса пенала после вертикального падения ТУК-27/1 на крышку контейнера.

Для наружной крышки наибольшие напряжения достигают 904 МПа, для внутренней крышки наибольшие напряжения составляют 910 МПа. Данные величины превышают величину условного предела текучести стали 38ХН3МФА, составляющего 880 МПа. Таким образом, в болтах возможно возникновение незначительных пластических деформаций.



1 — наружная обечайка контейнера; 2 — перлитобетон контейнера; 3 — внутренняя обечайка контейнера; 4 — болты крепления наружной крышки; 5 — болты крепления внутренней крышки; 6 — крышка наружная; 7 — крышка внутренняя; 8 — емкость наружная; 9 — емкость внутренняя; 10 — корзины

Рис. 2. *Конечно-элементная модель ТУК-27/1*

Величина раскрытия стыка между наружной крышкой и наружной емкостью и между внутренней крышкой и внутренней емкостью за все время удара не превышает соответственно

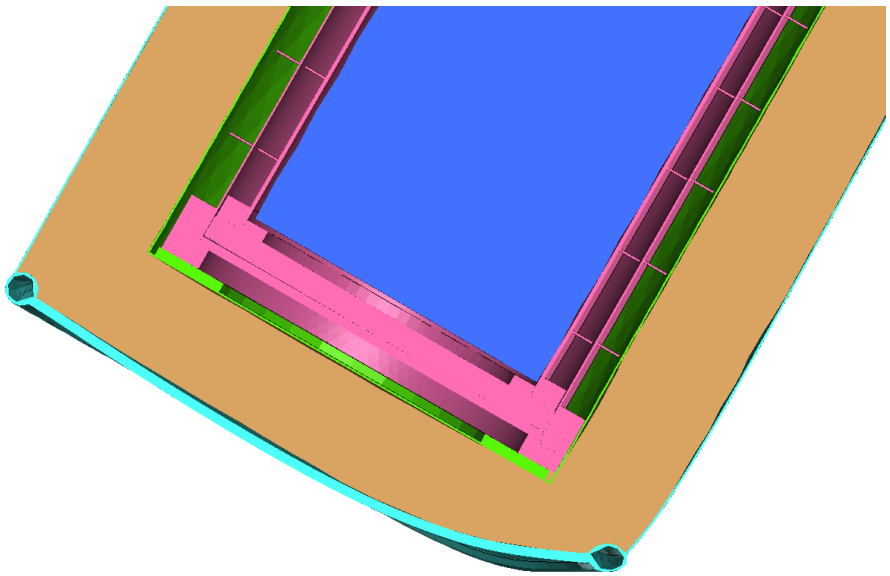


Рис. 3. *Схема деформирования ТУК-27/1 после падения на кромку крышки*

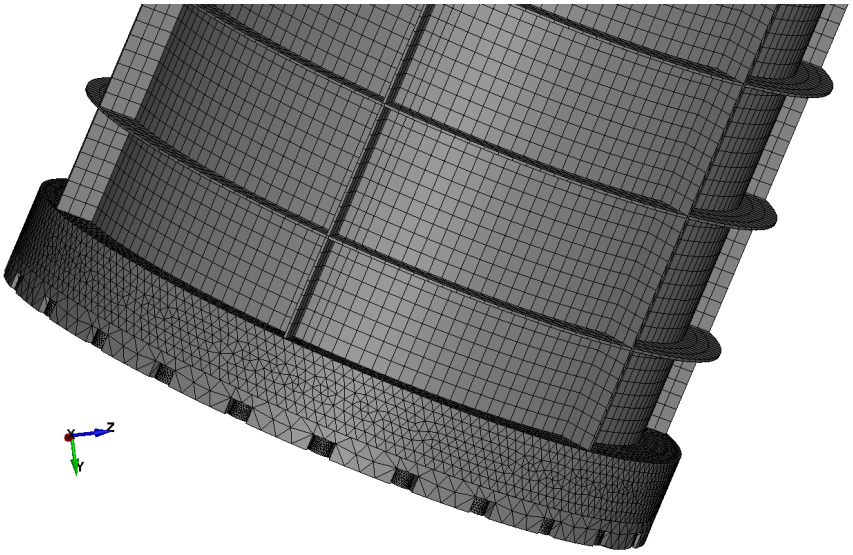


Рис. 4. *Схема деформирования пенала ТУК-27/1 после падения на кромку крышки*

0,12 мм и 0,2 мм. Полученные значения раскрытия стыков значительно ниже величины обжатия герметизирующих прокладок 2 мм. Таким образом, можно сделать вывод, что герметичность узлов крепления внутренней и наружной крышек к емкостям сохраняется.

Падение с 9 м на плоскость днища корпуса контейнера ТУК-27/1

Основные результаты расчета для рассматриваемого варианта падения упаковки сводятся к следующему.

На рисунке 6 показана схема деформирования нижней части корпуса пенала после вертикального падения ТУК-27/1 на днище контейнера. После контакта с жестким неподвижным основанием происходит пластическое деформирование нижних радиальных ребер, воспринимающих удар о преграду.

Для наружной крышки наибольшие напряжения достигают 889 МПа, для внутренней крышки наибольшие напряжения составляют 907 МПа. Данные величины превышают величину условного предела текучести стали 38ХН3МФА, составляющего 880 МПа. Таким образом, в болтах возможно возникновение незначительных пластических деформаций.

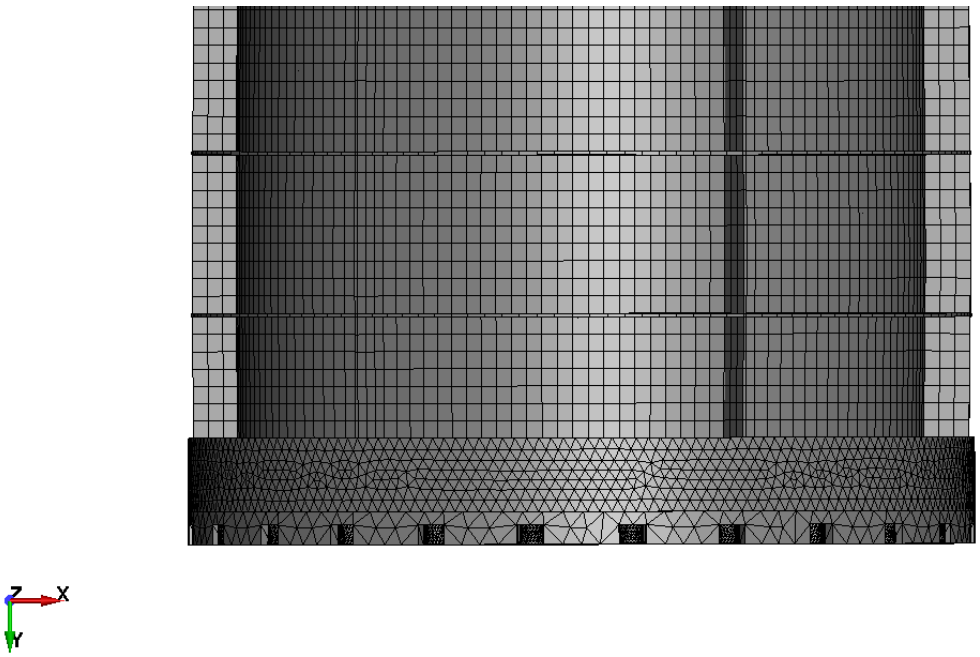


Рис. 5. *Схема деформирования пенала ТУК-27/1 после падения на крышку*

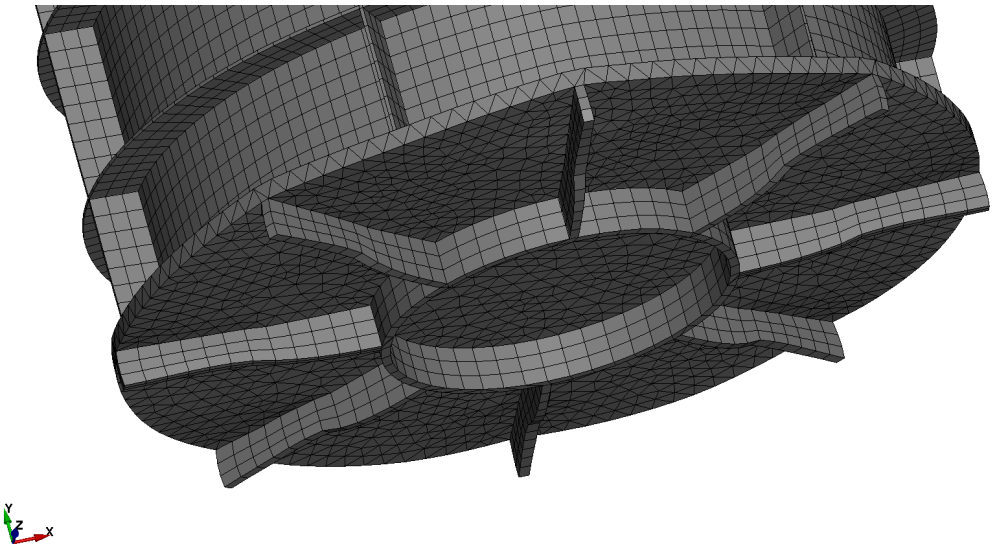


Рис. 6. *Схема деформирования пенала ТУК-27/1 после падения на днище*

Величина раскрытия стыка между наружной крышкой и наружной емкостью и между внутренней крышкой и внутренней емкостью за все время удара не превышают 0,06 мм. Полученные значения раскрытия стыков значительно ниже величины обжатия герметизирующих прокладок 2 мм. Таким образом, можно сделать вывод, что герметичность узлов крепления внутренней и наружной крышек к емкостям сохраняется.

Падение с 9 м на образующую корпуса контейнера ТУК-27/1

Основные результаты расчета для варианта падения упаковки на образующую сводятся к следующему.

На рисунке 7 показана схема деформирования корпуса пенала после падения контейнера ТУК-27/1 на образующую.

Величина раскрытия стыка между наружной крышкой и наружной емкостью за все время удара не превышает 0,05 мм. Полученное значение раскрытия стыка значительно ниже величины обжатия герметизирующих прокладок 2 мм. Таким образом, можно сделать вывод, что герметич-

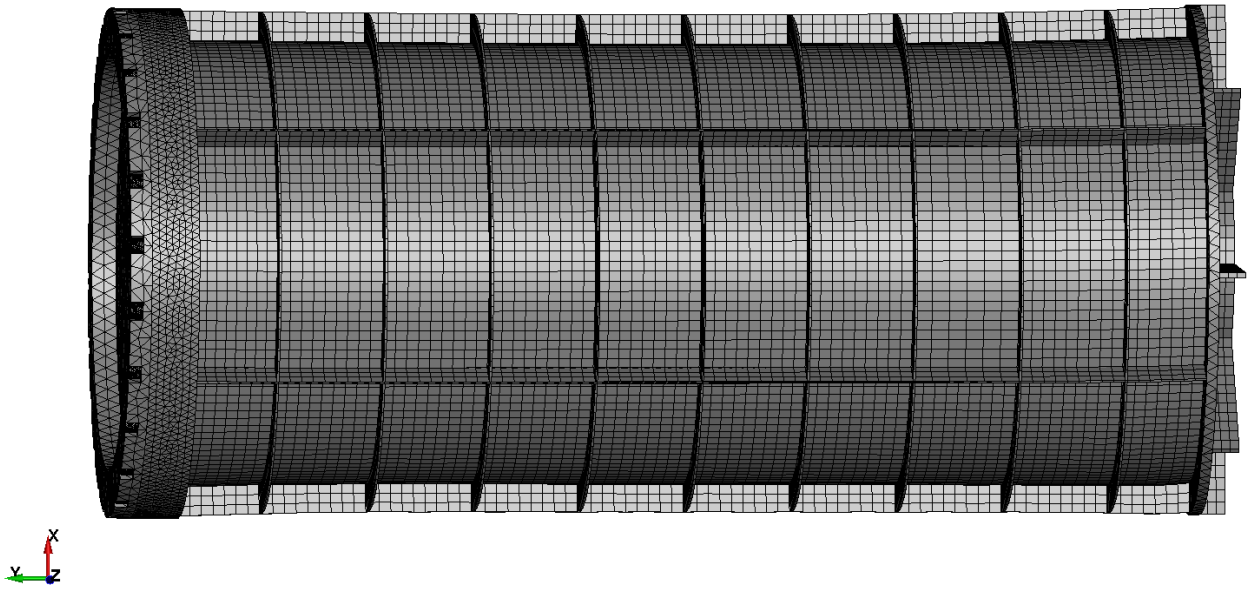


Рис. 7. *Схема деформирования корпуса наружной емкости после падения на образующую*

ность узлов крепления наружной крышки к емкости сохраняется.

Результаты расчетов

При всех вариантах аварийных падений прочность защитного контейнера и герметичность пенала из состава ТУК-27/1 сохраняется.

Испытания на статическое сжатие и погружение в воду заменены расчетами (НРП-93).

Расчет прочности при статическом сжатии (НРП-93) показал, что напряжения в элементах защитного контейнера не превышают допустимых. Запас прочности по условному пределу текучести составляет не менее 2, запас устойчивости сжатых тонкостенных элементов — не менее 4.

Таким образом, прочность ТУК-27/1 при испытаниях, имитирующих нормальные и аварийные условия перевозки, обеспечена.

Выводы

По результатам анализа результатов испытаний ТУК-27 (НРП-93), проведенных ранее расчетов (НРП-93), а также проведенного в рамках данной работы расчета прочности ТУК-27/1 можно сделать следующие основные выводы:

- защитный контейнер ТУК-27/1 сохраняет прочность при динамических испытаниях, имитирующих аварийные условия транспортирования. Выхода содержимого защитного контейнера ТУК-27/1 не происходит;
- прочность и герметичность нового пенала из состава ТУК-27/1 обеспечена при всех видах воздействий, имитирующих аварийные условия перевозки.

Таким образом, можно заключить, что ТУК-27/1, загруженный новым пеналом с ловушками с ГФУ, удовлетворяет всем требованиям Правил НП-053-16 в части прочности.