

# РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОГО УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ТУК-159

*Д. Ю. Смирнов, А. В. Виноградов, С. В. Леонтьев, И. А. Барченков,  
В. И. Кечин, О. С. Абрашкин, Т. В. Лазуткина*

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

## Введение

В условиях напряженной политической обстановки в мире в отношении Российской Федерации имеется необходимость в разработке российской продукции в сфере атомной энергетики для решения обострившейся за последние годы проблемы импортозамещения. При продвижении российских технологий на мировой рынок исследовательских реакторов существует потребность в сертифицированном в России и за рубежом транспортном упаковочном комплекте для перевозки всеми видами транспорта, включая воздушный, ураносодержащих материалов с обогащением по  $^{235}\text{U}$  до 20 %.

Отсутствие в настоящее время подобных ТУК в РФ, сложности и не выгодные условия аренды ТУК иностранного производства, вызванные конфликтом интересов на мировом рынке топлива для исследовательских реакторов, не позволяют российским предприятиям полноценно решать вопросы по поставкам подобной продукции.

В 2016 году ПАО «НЗХК»/АО «ТВЭЛ» был инициирован проект по разработке и сертификации российского ТУК для перевозки всеми видами транспорта ураносодержащих материалов обогащением по  $^{235}\text{U}$  до 20 % различной физической и химической формы.

Разработку технического проекта на ТУК-159 осуществлял ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, обладающий опытом разработки транспортных упаковочных комплектов и имеющий аттестованную экспериментальную базу для проведения полного комплекса испытаний ТУК на соответствие требованиям Правил МАГАТЭ SSR-6.

## Основание для проведения работы

Основанием для проведения работы являются:

– договор на выполнение опытно-конструкторской работы «Разработка и сертификация транспортного упаковочного комплекта для перевозки ураносодержащих материалов всеми видами транспорта, включая воздушный», заключенный между ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ПАО «НЗХК»;

– техническое задание на опытно-конструкторскую работу, разработанное на основании договора.

## Цель работы

Разработка транспортного упаковочного комплекта для перевозки ураносодержащих материалов (порошок, гранулы, таблетки) всеми видами транспорта.

## Анализ существующего парка контейнеров и выбор конструкции ТУК

Для осуществления экспортных поставок ураносодержащих материалов воздушным транспортом российские предприятия используют либо арендованные транспортные упаковочные комплекты, владельцами которых являются зарубежные компании (ТУК LEUPA – Аргентина, ТУК TN BGC – Франция), либо модернизированные российские транспортные упаковочные комплекты, изначально не предназначенные для поставки данных материалов (ТУК ТК-С16, ТУК ТК-С15).

К современным контейнерам предъявляются высокие требования, прежде всего по обеспечению надежной биологической защиты от ионизирующего излучения, исключению выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду, ядерной безопасности, сохранению герметичности в аварийных ситуациях (пожар, падение контейнера с вагона, падение контейнера в воду и т. п.) и отводу тепла в окружающую среду.

Одна из главных задач разработки ТУК-159 – импортозамещение ТУК типа TN BGC1. Конструкция должна соответствовать требованиям НП-053-16 [4] и МАГАТЭ (SSR-6) [5]. Технические требования представлены в табл. 1. Основные характеристики ТУК-159 в сравнении с TN BGC приведены в табл. 2.

Таблица 1

### Технические требования

Требование	Значение
Максимальный габарит по ширине, мм	800
Индекс безопасности по критичности	$\leq 1$
Обогащение перевозимого материала	до 20 % по $^{235}\text{U}$
Возможность воздушных перевозок	
Соответствие НП-053-16 и МАГАТЭ SSR-6	

Таблица 2

## Характеристики ТУК

Наименование параметра	ТУК-159	TN BGC
Масса порожнего ТУК, кг	448	280
Масса перевозимого содержимого, кг	до 50	35
Габариты корпуса, мм	Ø700×872	1821×600×600
Максимальная температура наружной поверхности, °С	69,8	–
Максимальная суммарная мощность эффективной дозы на поверхности, мЗв/ч	5,02e-3	–
Обогащение перевозимого содержимого по $^{235}\text{U}$ , %	20	–
Срок службы, не менее	30 лет	–



Рис. 1. Общий вид ТУК-159 [6]

## Устройство и работа ТУК-159

При разработке конструкции последовательно рассматривалось 12 вариантов конструкции упаковки ТУК-159. Для каждого варианта конструкции рассматривалось несколько расчетных случаев, отличающихся ориентацией контейнера в момент удара. В результате расчетов определялись слабые места конструкции, факт разрушения или сохранения прочности крепежа, крышек контейнера и силовых корпусов. В итоге 12-ый вариант конструкции признан удовлетворяющим выбранному критерию безопасности – сохранению прочности хотя бы одного из двух силовых контуров.

Основной элемент конструкции транспортного упаковочного комплекта (рис. 1) представляет собой цилиндрический толстостенный кованый стальной корпус, содержащий чехол с пятью гнездами для установки в них емкостей, по две в каждое гнездо. Для обеспечения ядерной безопасности свободные полости чехла вокруг гнезд для емкостей заполнены борсодержащим материалом. Емкость состоит из цилиндрического корпуса и крышки, соединенных между собой резьбой, и предназначена для упаковки перевозимого материала. Чехол и десять емкостей поджимаются во внутреннем корпусе крышкой и закрепляются при помощи 24 усиленных болтов М12. На корпусе внутреннем имеются грузоподъемные элементы, предназначенные для обращения с ним. Масса внутреннего корпуса без перевозимого материала составляет 130 кг.

Корпус внутренний устанавливается в корпусе силовом днищем вверх (крышкой вниз). Корпус силовой представляет собой деревянный демпфер цилиндрической формы с глухим цилиндрическим ступенчатым вырезом по оси вращения, облицованный двухмиллиметровой сталью и с толстостенным кованым стальным стаканом, соединенным болтами с внутренней поверхностью стальной облицовки деревянного демпфера.

Корпус внутренний поджимается в корпусе силовом крышкой и закрепляется при помощи 24 усиленных болтов М16. Уплотнительным элементом между корпусами и крышками является паронит.

Конструкция закрывается заглушкой при помощи 8 гаек М12. Заглушка представляет собой деревянный демпфер цилиндрической формы, облицованный нержавеющей сталью. На наружной поверхности ТУК приварены четыре проушины, предназначенные для закрепления в транспортном средстве и для подъема, а также четыре опоры, предусмотренные для ярусного хранения. Деревянные демпфера покрыты огнезащитным составом и предназначены для защиты перевозимого материала, при аварийных воздействиях. В зазоре между стальной облицовкой и деревянным корпусом располагается теплоизоляционный материал на основе базальтовой ткани. В конструкции ТУК-159 используется нержавеющие стали 12Х18Н10Т, 14Х17Н2. Крепежные элементы выполнены из высоколегированной стали 38ХНЗМА, 07Х16Н4Б.

## Расчетное обоснование безопасности

Компьютерное моделирование динамического деформирования упаковки ТУК-159 выполнено на основе российских программных средств ЛОГОС (модуль «ПРОЧНОСТЬ») разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ, предназначенного для численного решения трехмерных задач статического и динамического деформирования пространственных конструкций при термосиловых воздействиях.

Для проведения исследований принимается, что емкости заполнены ураносодержащим порошком на 90 % объема. После выбора окончательного варианта конструкции контейнера ТУК-159 проводились расчетные исследования прочности упаковки на соответствие требованиям безопасной транспортировки:

свободное падение с высоты 9 м, раздавливание плитой, падение на штырь, воздействие пожара, проведение испытаний на ракетном треке (удар со скоростью не менее 90 м/с).

При анализе результатов расчетов и выдаче заключения о соответствии упаковки предъявляемым требованиям по прочности принимается, что упаковка удовлетворяет требованиям безопасности, если сохраняется прочность хотя бы одного из трех защитных контуров, а именно: емкостей, внешнего или внутреннего корпуса [3].

#### Испытания на удар со скоростью 90 м/с

По результатам расчетов на высокоскоростное столкновение (90 м/с), было рассмотрено 5 расчетных случаев. В результате было определено, что при угловой ориентации контейнера в элементах конструкции возникают наибольшие повреждения. Данная ориентация (рис. 2) была рекомендована для проведения зачетных испытаний. Согласно расчетным данным, в процессе соударения с преградой, обеспечивается сохранение прочности одного из трех контуров защиты, а именно внутреннего бьюкса, поэтому можно сделать вывод, что упаковка выдерживает угловое столкновение через центр масс на крышку.

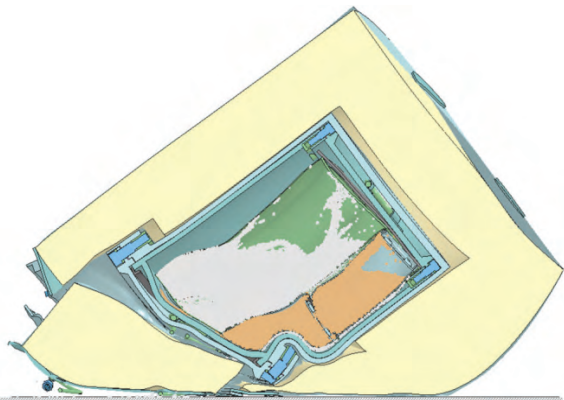


Рис. 2. Деформированное состояние упаковки при ударе со скоростью 90 м/с

#### Испытание на падении с 9 м

При моделировании свободного падения упаковки на недеформируемую преграду с высоты  $H = 9$  м рассмотрено пять вариантов ориентации контейнера при соударении с преградой (два осевых падения, два центральных угловых падения, боковое падение). Прочность упаковки сохраняется с большими запасами прочности (не менее 5), что позволяет сделать заключение о сохранении прочности упаковки при рассмотренных ориентациях падения с  $H = 9$  м. Наибольший уровень деформаций упаковка испытывает при боковом падении (рис. 3), поэтому падение рекомендовано для проведения испытаний на механическое повреждение при падении с  $H = 9$  м.

Все основные элементы конструкции контейнера ТУК-159 в каждом расчетном случае сохраняют свою прочность.

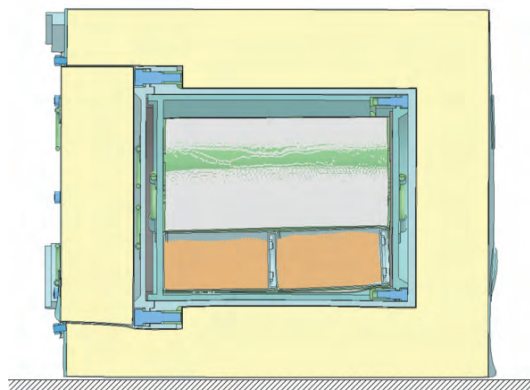


Рис. 3. Деформированная форма упаковки после падения с высоты 9 м

#### Испытание на раздавливание

ТУК-159 подвергается динамическому раздавливанию, при котором он получает максимальное повреждение при падении на него тела массой 500 кг с высоты 9 м (рис. 4).

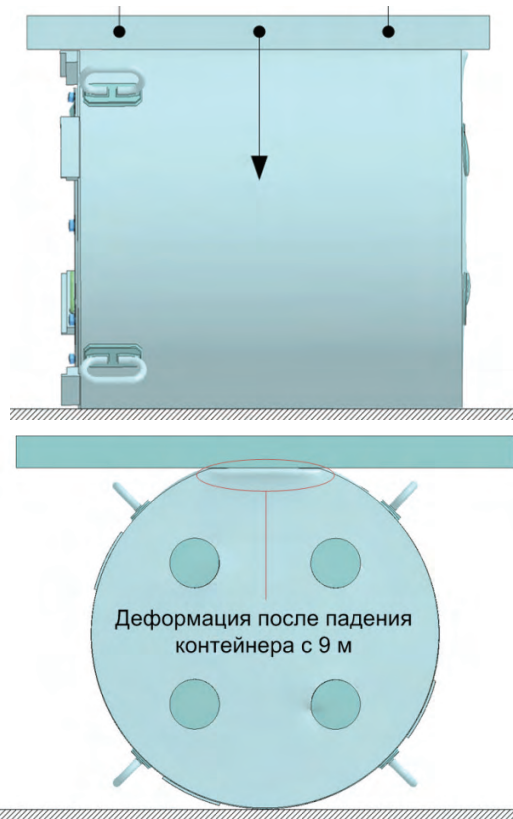


Рис. 4. Расчетный случай падения плиты на контейнер

Анализ результатов показывает, что уровень перегрузок элементов упаковки в среднем на 100–500 ед. выше по сравнению с уровнем перегрузок при боковом падении упаковки с высоты  $H = 9$  м на мишень и составил ~1300...1500 ед. При этом длительность импульсов перегрузок уменьшилась с  $\tau \sim 2 \dots 2,3$  мс до  $\tau \sim 1 \dots 1,3$  мс.

### Испытание на прокол

Опытный образец упаковки должен быть подвергнут разрушающему воздействию твердого штыря, изготовленного из мягкой стали. Положение штыря по отношению к поверхности образца должно быть таким, чтобы вызвать максимальное повреждение при завершении серии испытаний.

Расчетный случай падения упаковки на штырь представлен на рис. 5.

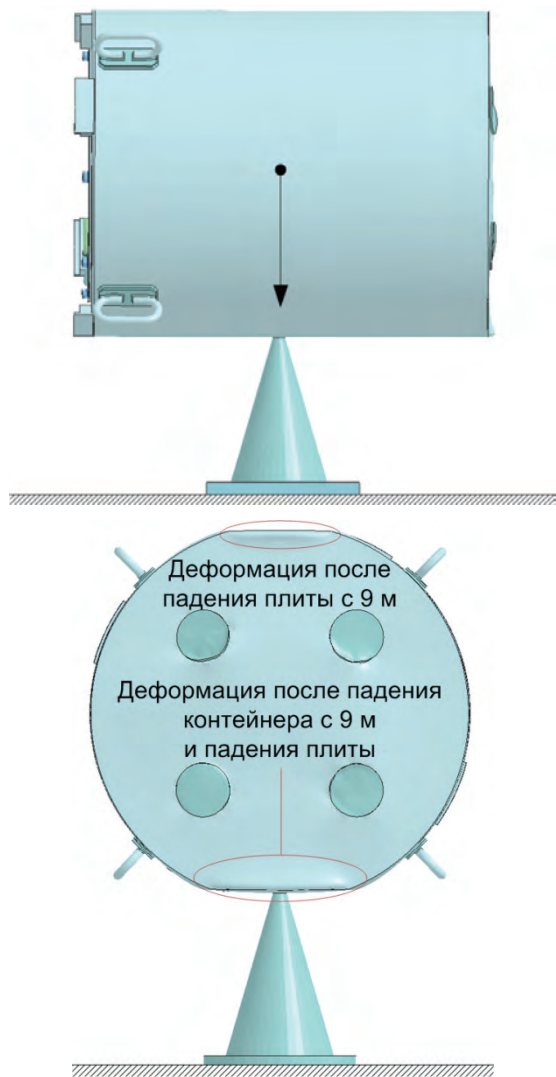


Рис. 5. Расчетный случай падения упаковки на штырь

Все элементы конструкции упаковки ТУК-159 сохраняют прочность, пробитие корпуса контейнера не происходит.

### Усиленное тепловое испытание (пожар)

В аварийных условиях воздействие пожара моделируется на всей наружной поверхности. В качестве начального принимается установившееся распределение температуры, полученное от действия солнечной инсоляции при температуре окружающей среды 38 °С. Остывание контейнера после воздействия пожара происходит в среде с температурой 38°С.

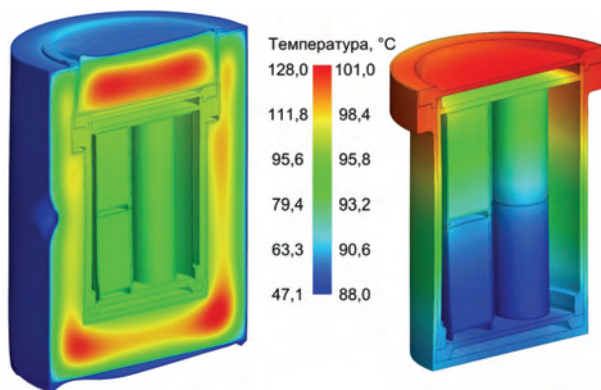


Рис. 6. Распределение температур на момент достижения максимума температуры на содержимом – 7,5 часа

В условиях аварийного теплового воздействия согласно требованиям НП-053-16 и SSR-6, а именно пребывание в среде с температурой 800 °С в течение 60 мин с последующим остыванием в среде с температурой 38 °С, максимум температуры на элементах системы герметизации (на прокладках из паронита и резины) не превышает допустимой температуры применения равной 250 °С (рис. 6).

### Обоснование ядерной и радиационной безопасности

В рамках расчетного обоснования ядерной и радиационной безопасности определен коэффициент размножения нейтронов, мощность эффективной дозы излучения, а также индекс безопасности по критичности. Расчеты проводились с использованием программного комплекса TDMCC. Решение задачи выполнялось по методу Монте-Карло для совместного переноса нейтронов и  $\gamma$ -квантов в трехмерных системах. При этом учитывалось состояние упаковки в нормальных и аварийных условиях перевозки.

Согласно результатам проведенных расчетов, транспортный упаковочный комплект ТУК-159, загруженный урансодержащими материалами общей массой до 50 кг (обогащение до 20 % по  $^{235}\text{U}$ ), обеспечивает выполнение требований НП-053-16 [4], НРБ-99/2009 [2] и правил SSR-6 (МАГАТЭ) [5] по ядерной и радиационной безопасности, как в нормальных, так и аварийных условиях перевозки. Допускается транспортировка всеми видами транспорта, включая воздушный, группы упаковок ТУК-159 в количестве до 50 штук. Индекс безопасности по критичности ИБК = 1. Значение транспортного индекса (ТИ) составляет: ТИ = 0.

### **Испытания макетов ТУК-159**

Испытания проводились в соответствии с правилами SSR-6 и НП-053-16. Для испытаний было изготовлено два макета ТУК-159, а также комплект специальной оснастки.

### Испытание на падение с 9 м

Горизонтально подвешенный (с помощью гибких строп) ТУК-159 крепился на крюке крана и сбрасывался на мишень (стальная плита размерами 2,0×3,0 м, закрепленная на бетонном основании). Место соударения с мишенью находилось между проушинами, предназначенными для подъема и переноса упаковки. Высота сброса составляла 9,0 м и отсчитывалась от поверхности плиты до ближайшей к ней точки ТУК.

Из полученных данных видно (рис. 7), что диаметр макета уменьшился, а высота увеличилась, что связано с замятием зоны контакта макета с мишенью.

### Испытание на раздавливание

Горизонтально расположенный ТУК-159 устанавливался на стальную плиту, закрепленную на бетонном основании таким образом, чтобы поверхность упаковки, деформированная при предыдущем испытании, находилась в месте контакта с падающей плитой. После чего на упаковку с высоты  $H=9,0$  м горизонтально сбрасывалась стальная плита массой 500 кг и габаритами 1х1м. Высота сброса измерялась от верхней точки ТУК-159 до нижней поверхности подвешенной плиты.

После испытания были зафиксированы следующие повреждения макета ТУК-159: замятие внешней облицовки в зоне контакта макета с мишенью и в зоне противоположной зоне контакта макета с мишенью, трещина в сварном шве у одной из опор, вмятина без нарушения целостности на внешней облицовке от удара после отскока плиты.

### Испытание на прокол

Горизонтально подвешенный ТУК-159 (с помощью гибких строп) крепился на крюке крана и сбрасывался с высоты  $H = 3,0$  м на стальной штырь. Штырь представлял собой конус диаметром 20 см в основании, высотой 30 см и диаметром вершины 2,5 см. Штырь закреплялся на мишени в вертикальном положении с помощью восьми болтов М8. Макет ТУК-159 при испытании был расположен таким образом, чтобы удар пришелся на центр масс и место

с наибольшими повреждениями после предыдущих испытаний. Высота сброса измерялась от нижней точки ТУК до верхней точки штыря.

После испытания были зафиксировано пробитие внешней облицовки нижнего демпфера (рис.7). Причиной отличия от результатов расчета является математическая модель материала, используемая для моделирования древесины. При падении на штырь слои древесины работают на сдвиг, что требует дополнительной калибровки математической модели, которая была выполнена в дальнейшем.



Рис. 7. ТУК-159 после испытаний

### Усиленное тепловое испытание (пожар)

В соответствии с требованиями п.п. 3.4.4.3 и 3.4.6.3 НП-053-16 упаковка должна подвергаться тепловому воздействию при среднеобъемной температуре пламени не менее 800 °С в течение 60 минут в условиях пожара (рис. 8).

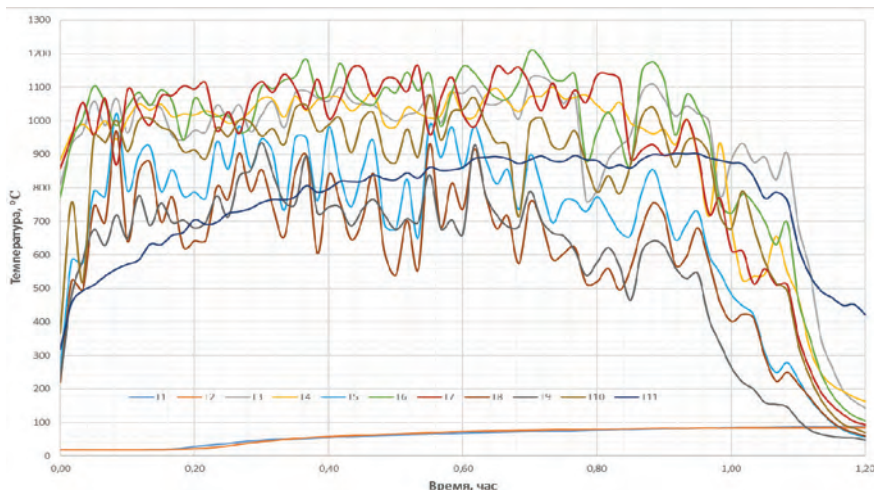


Рис. 8. Показания всех термопар установленных внутри (Т1, Т2) и снаружи (Т3-Т11) макета ТУК-159



По окончании испытаний на усиленное тепловое испытание после охлаждения в естественно-климатических условиях макет ТУК-159 был передан для проведения дефектации. В результате дефектации отмечено:

- целостность паронитовых прокладок крышек не нарушена;
- отсутствие просыпи борсодержающего материала из чехла во внутреннюю полость корпуса внутреннего;
- отсутствие просыпи имитатора перевозимого содержимого из емкостей во внутреннюю полость корпуса внутреннего.

#### Испытания на удар со скоростью 90 м/с

Согласно результатам расчетных исследований, из всех рассмотренных случаев соударения ТУК с преградой со скоростью 95 м/с, наибольшее деформирование конструкции происходит при угловом ударе через центр масс со стороны основания ( $\varphi \sim 57^\circ$ ). Поэтому данное направление было выбрано для проведения испытания. Испытание выполнено с участием межведомственной комиссии, которая назначена Распоряжением Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Задачей испытания являлась экспериментальная проверка:

- эффективности работы демфирующих элементов конструкции ТУК-159;
- отсутствие выхода перевозимого материала из ТУК-159.

Расчетная скорость столкновения ТУК-159 с мишенью –  $95 \pm 5$  м/с, начальный угол между вектором скорости полета макета (после схода с рельсовой направляющей (РН) трека) и его осью –  $47 \pm 5^\circ$  (определен из условия, приводящего к максимальным повреждениям при столкновении с мишенью).

Разгон ТУК-159 до заданной скорости по РН ракетного трека и его столкновение с мишенью, при заданном направлении и угле встречи, обеспечивались комплектом специальной оснастки (рис. 9).



Рис. 9. Общий вид ракетного поезда

После запуска ракетных двигателей ракетный поезд (РП) начинал движение по рельсовой направляющей ракетного трека. По окончании работы ракетных двигателей и достижении ракетным поездом заданной скорости движения были задействованы пороховые аккумуляторы давления тормозного башмака, что привело к остановке РП на рельсовой направляющей ракетного трека. При этом ТУК-159, за счет полученного импульса, продолжал движение по рельсовой направляющей. После схода с рельсовой направляющей ракетного трека ТУК-159 двигался в свободном полете до столкновения с мишенью.

Мишень ракетного трека выполнена в соответствии с рекомендациями Правил НП-053-16 и SSR-6, представляет собой железобетонный блок, облицованный со стороны лобовой стенки стальным листом толщиной 100 мм. Габариты лобовой стенки –  $2,4 \times 3,6$  м. Мишень смонтирована с упором задней стенки в протяженный насыпной вал и дополнительно, с боковых сторон и сверху, обвалована грунтом. Полная масса мишени с учетом обваловки грунтом составляет  $\sim 600$  т.

По результатам испытания, деревянный демпфер был разрушен, при этом внутренний корпус сохранил свою целостность.

Подводя итоги, можно отметить:

- испытания упаковки (макета ТУК-159), загруженной имитатором перевозимого содержимого и изготовленной в ПАО «Русполимет» в 3 квартале 2017 года, проведены в полном объеме, предусмотренном программами испытаний;
- в процессе испытаний параметры нагружения соответствовали требуемым значениям;
- в результате испытаний на механические повреждения: падение на мишень с высоты  $H = 9,0$  м, на динамическое раздавливание (удар плитой), на прокол (разрыв), усиленное тепловое испытание, удар со скоростью не менее 90 м/с макет ТУК-159 сохранил целостность емкостей, загруженных имитатором перевозимого содержимого. Выхода имитатора перевозимого содержимого (материала) из упаковки не произошло.

## Верификация расчетных данных

Результаты испытаний подтвердили соответствие упаковки ТУК-159 требованиям безопасной транспортировки. Кроме этого, в ходе испытаний и по результатам дефектации был получен большой объем данных по деформированному состоянию упаковки.

На рис. 10 представлены деформированные конфигурации элементов упаковки, полученные по результатам расчетов и экспериментов на столкновение при скорости 90 м/с. Видно, что результаты расчетов и экспериментов качественно согласуются между собой.

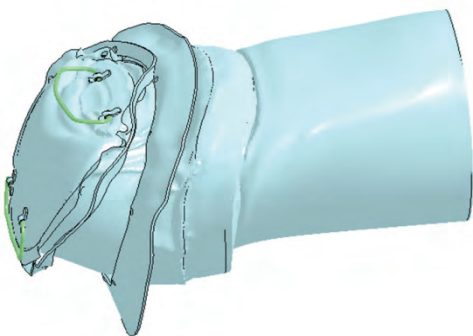


Рис. 10. Деформированная форма элементов ТУК

Близость расчетных результатов и опытных данных по характеру общих деформаций (изменение исходной формы, смятие) конструкции контейнера подтверждает достоверность компьютерного моделирования выполненного на основе отечественного программного комплекса ЛОГОС.

Таким образом, можно заключить, что грамотное использование суперкомпьютерных технологий имитационного моделирования позволило в кратчайшие сроки разработать конструкцию упаковки, удовлетворяющей всем требованиям безопасности при транспортировке радиоактивных материалов, а также выбрать оптимальное положение опытных образцов при проведении испытаний.

### Заключение

Благодаря слаженной работе команды ПАО «НЗХК», г. Новосибирск (заказчик работ по проекту, разработчик рабочей конструкторской документации), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров (разработчик технического проекта, расчетное и экспериментальное обоснование безопасности конструкции), ПАО «Русполимет», г. Кулебаки (изготовитель макетов и головной партии ТУК-159), ФГУП «АТЦ СПб», г. Санкт-Петербург (экспертиза обоснования безопасности), проект по созданию ТУК-159 с колоссальным объемом работ был реализован в строгом

соответствии с директивным графиком верхнего уровня и в рекордный для подобных проектов срок – 12 месяцев.

Результатом проделанной работы является конструкция транспортного упаковочного комплекта, соответствующая требованиям НП-053-16 и МАГАТЭ (SSR-6) по безопасности.

Данная конструкция превосходит зарубежные аналоги по количеству перевозимого материала. Конструкция пригодна для транспортирования ураносодержащих материалов всеми видами транспорта, включая воздушные. В ТУК-159 имеется потенциал для расширения номенклатуры перевозимого радиоактивного содержимого, как по химическому составу, так и по обогащению.

ТУК-159 существенно повышает конкурентоспособность отрасли при поставках ураносодержащей продукции на международные рынках, исключает зависимость отрасли от зарубежных владельцев аналогичных транспортных упаковочных комплектов и обеспечивает импортозамещение данных ТУК. Конструкция является полностью российской разработкой и не зависит от импортных комплектующих.

На данный момент конструкции присвоена литера О1 и изготовлена головная партия из пяти штатных изделий ТУК-159.

### Литература

1. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Артемьева Е. В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 2. С. 49–52.
2. Нормы радиационной безопасности, НРБ-99/2009.
3. Нормы расчета на прочность транспортно-упаковочных комплектов для перевозки ядерных делящихся материалов. НРП-93.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов, НП-053-16, Москва.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the safe Transport of Radioactive material, 2012 Edition, Specific Safety Requirements No. SSR-6, IAEA, Vienna (2012).
6. Пат. RU № 2581648 РФ, МКИ G21F5/00. Транспортный упаковочный комплект для транспортирования и хранения отработавшего ядерного топлива / А. В. Бондарев, С. Ф. Долбищев // Бюллетень изобретений. 2016. № 11.