

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛА ГЕРМЕТИЗАЦИИ КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

**А.З. Гаязов, О.З. Гаязов, В.Ю. Козлов, С.В. Павлов, А.А. Самсонов**

*ООО НПФ «Сосны»*

*433507, Ульяновская обл., г. Димитровград, пр. Димитрова, д. 4а*

**Р**

Одним из показателей безопасности контейнера для транспортирования облученного ядерного топлива является сохранение его герметичности, которая обеспечивается целостностью его корпуса и герметичностью разъемных соединений при нормальных и аварийных условиях транспортирования.

Разрабатываемый контейнер имеет в дне цилиндрическую технологическую проходку, которая герметизируется специальной заглушкой с уплотнением радиального типа, состоящего из двух уплотняющих резиновых колец. Обоснование конструкции данного узла герметизации контейнера выполнялось расчетным способом с помощью программного комплекса ANSYS LS-DYNA. В частности, рассчитывались деформации элементов контейнера при его падении узлом герметизации на вертикальный штырь с высоты 1 м. По характеру и величине этих деформаций делался вывод о герметичности данного соединения. Для подтверждения адекватности результатов расчетов были выполнены компьютерное моделирование и натурные испытания уменьшенного в 2,5 раза макета контейнера при падении на штырь с высоты 1 м. Близость расчетных и экспериментальных данных по величинам ускорения (перегрузок) при соударении макета со штырем и по величинам пластических деформаций основных элементов узла герметизации проходки в днище макета контейнера доказывает адекватность разработанной числовой модели контейнера и эффективность моделирования с помощью многоцелевой программы LS-DYNA. Расчеты показали, что пластические деформации в области проходки приводят к уменьшению силы обжатия стенками проходки внутреннего уплотняющего резинового кольца, что вызывает потерю герметичности внутреннего радиального уплотнения. При этом наружное уплотнение сохраняет герметичность и тем самым обеспечивает герметичность макета контейнера. Результаты натурных испытаний подтвердили сохранение герметичности макета контейнера.

**Ключевые слова:** контейнер, герметичность, испытания, численное моделирование, узел герметизации, деформации, уплотнение.

*Гаязов А.З., Гаязов О.З., Козлов В.Ю., Павлов С.В., Самсонов А.А.* Расчетно-экспериментальные исследования узла герметизации контейнера для транспортирования облученного ядерного топлива. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 81-92. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.07> .

© *А.З. Гаязов, О.З. Гаязов, В.Ю. Козлов, С.В. Павлов, А.А. Самсонов, 2023*

## ВВЕДЕНИЕ

При создании нового контейнера для транспортирования облученного ядерного топлива разработчики руководствуются соответствующими требованиями норм и правил безопасности [1 – 6]. Способы и методы обоснования безопасности конструкции нового контейнера строго регламентированы и должны включать в себя как экспериментальные, так и расчетные работы, направленные на описания поведения конструкции контейнера и его содержимого в обычных, нормальных и аварийных условиях перевозки.

Одним из показателей безопасности конструкции контейнера является сохранение его герметичности, которая обеспечивается сохранением целостности корпуса контейнера и герметичности его разъемных соединений. При обосновании безопасности конструкции контейнера расчетным путем о герметичности разъемных соединений судят по результатам анализа деформации элементов этих соединений и состоянию герметизирующих элементов (прокладок, уплотнений и т.п.), в первую очередь, при аварийных ситуациях: падении с регламентированной высоты на жесткую поверхность, падении на вертикальный штырь, пожар [1, 2].

Адекватность такого подхода к обоснованию сохранения герметичности контейнера может быть доказана путем натурного моделирования с использованием уменьшенных макетов [7] разрабатываемого контейнера или его части с исследуемым узлом герметизации.

В статье приводятся результаты расчетно-экспериментальных исследований деформации и герметичности узла герметизации проходки в дне контейнера в виде заглушки с радиальным типом уплотнения при бросковых испытаниях макета контейнера с высоты 1 м на вертикальный штырь.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разрабатываемый контейнер для транспортирования облученных твэлов ядерных реакторов в днище имеет цилиндрическую проходку для облегчения извлечения выталиванием содержимого контейнера через верхнюю горловину и для слива воды в процессе осушки контейнера после загрузки твэлов (рис. 1). Проходка герметизируется специальной заглушкой с двумя уплотняющими резиновыми кольцами, тип уплотнения – радиальный. Резиновые кольца устанавливаются в специальные пазы заглушки, как это показано на рис. 1. Расстояние  $S$  между поверхностями, обеспечивающими обжатие уплотнительных элементов, заведомо меньше диаметра поперечного сечения данных герметизирующих колец.

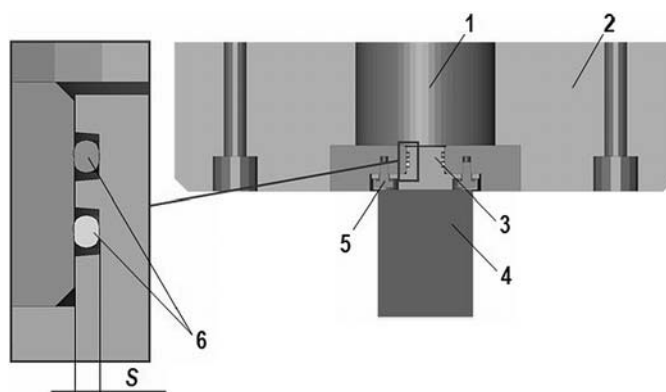


Рис. 1. Конструкция торцевой части контейнера с герметизирующей заглушкой при бросковых испытаниях при падении на штырь с высоты 1 м: 1 – внутренняя полость контейнера; 2 – дно контейнера; 3 – заглушка; 4 – штырь; 5 – крепеж заглушки к дну контейнера; 6 – резиновые уплотняющие кольца

При деформации элементов узла герметизации проходки в дне контейнера возможно увеличение расстояния  $S$ , что приведет к ослаблению обжатия резиновых колец в радиальном уплотнении и, как следствие, к потере герметичности контейнера.

Наиболее опасные деформации элементов узла герметизации контейнера, вероятно, могут возникнуть вследствие аварий при транспортировании, которые в соответствии с нормативными документами [1, 2] моделируются, в частности, падением днищем контейнера с узлом герметизации на штырь (см. рис. 1).

Моделирование деформации узла герметизации проходки в дне контейнера выполнялось численным методом с использованием многоцелевой программы LS-DYNA. Для верификации полученных результатов было выполнено численное и натурное моделирование падения уменьшенного в масштабе 1:2,5 макета контейнера с высоты 1 м на вертикальный штырь диаметром 60 мм.

Макет контейнера для численного и натурального моделирования представляет собой стальной цилиндр диаметром 316 мм, длиной 2197 мм и массой 1217 кг. Внутренняя полость макета заполнена гелием и герметизируется со стороны дна заглушкой с радиальным уплотнением из двух колец типоразмера 020-024-25-2 [8], изготовленных из резинотехнической смеси ТУ 2531-002-2894 3826-009 [9]. Дно контейнера и заглушка были изготовлены из стали 12Х18Н10Т [10]. Заглушка крепится к дну восемью болтами М6, изготовленными из стали 14Х17Н2 [10].

Герметичность уплотнений контролируется масс-спектрометрическим методом [11] по скорости падения давления гелия внутри макета контейнера; в исходном (до испытаний) состоянии она составляет  $3,9 \cdot 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>, что в несколько раз меньше допустимого значения в  $1 \cdot 10^{-6}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>, принятого при проектировании.

Численное моделирование соударения макета контейнера со штырем осуществлялось с использованием программного комплекса для анализа высоконелинейных динамических процессов в задачах механики твердого тела ANSYS LS-DYNA [12, 13]. LS-DYNA – многоцелевая программа, предназначенная для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения, формоизменения и т.п.

Моделирование процесса соударения макета контейнера с вертикальным штырем осуществлялось в несколько этапов:

- создание геометрической модели, пригодной для решения методом конечных элементов;
- разбиение модели на сетку конечных элементов;
- приложение к модели граничных условий (наложение ограничений на перемещение, задание граничных нагрузок);
- численное решение системы уравнений, которое осуществляется автоматически с помощью решателя LS-DYNA;
- анализ результатов.

Трехмерная геометрическая модель макета контейнера разработана в соответствии с конструкторской документацией на контейнер. Конечно-элементная сетка создавалась при помощи встроенного сеточного генератора пре-постпроцессора Workbench [14] программного комплекса ANSYS. Использовалась лагранжева гексаэдрическая сетка, общее количество элементов в расчетной модели составило почти два миллиона.

При численном моделировании соударения макета контейнера с вертикальным штырем были использованы следующие допущения.

1. Контактное взаимодействие деформируемых и жестких тел моделировалось исходя из условия непроникновения на несогласованных сетках с учетом возникающих

сил трения.

2. Крепежные элементы конструкции моделировались объемными элементами, что позволяло определять нагрузки на каждый болт и моделировать его возможное разрушение.

3. Сварные соединения в соответствии с [15] принимались равнопрочными основному материалу и реализовывались в расчетной модели в виде контактов без возможности разделения.

4. Плоское основание, на котором располагается вертикальный штырь, моделировалось жестким недеформированным элементом «Rigid wall» [12].

5. В качестве основной модели поведения конструкционных материалов применялась мультилинейная модель, основанная на кривых деформирования в соответствии с [16] и справочных данных в соответствии с [15, 17, 18].

6. Кинематическое упрочнение в модели материалов консервативно не учитывалось в связи с малой скоростью в момент соударения конструкции с преградой.

7. Для крепежных элементов использовалась модель разрушения материала, основанная на предельных деформациях до разрушения в соответствии с [15] и предполагающая полное удаление элементарного объема, связанного с конечным элементом по достижении критерия разрушения.

При моделировании падения макета контейнера на штырь для учета собственной массы всех частей расчетной модели все узлы конечно-элементной сетки находились в поле ускорения свободного падения. В качестве начального условия всем узлам модели контейнера была назначена начальная скорость  $V_0$  в момент начала соударения ( $t_0 = 0$ ) со штырем, которая вычисляется из закона сохранения энергии

$$V_0 = \sqrt{2gh} \approx 4,43 \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $g = 9,806 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $h = 1 \text{ м}$  – высота падения на штырь.

Напряженно-деформированное состояние расчетной модели анализировалось в момент времени начала отскока контейнера от поверхности штыря.

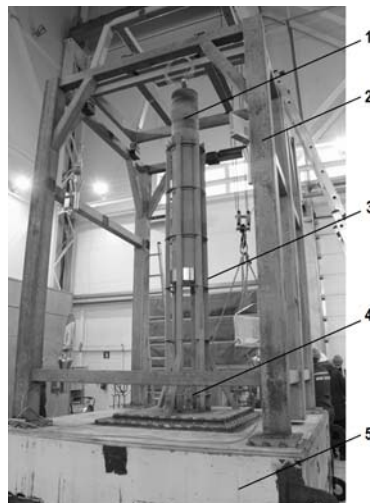


Рис. 2. Испытательный стенд с макетом контейнера: 1 – макет контейнера; 2 – ступень; 3 – шахта; 4 – штырь; 5 – плита

Натурное моделирование падения макета контейнера на штырь проводилось с помощью специального стенда (рис. 2). Макет контейнера подвешивался внутри ступени рамной конструкции, установленного на основание из железобетонных плит массой 20 т, на которых установлен штырь. Штырь был изготовлен из стали Ст.3 [19].

Свободная высота штыря до проведения испытания составляла 200 мм. Центрирование макета контейнера относительно штыря при бросковых испытаниях осуществлялось с помощью направляющих, вдоль которых свободно скользил макет контейнера при падении на штырь. Для измерения ускорения (перегрузок) во время испытаний на корпус макета контейнера установлен ударный ИСР- акселерометр 350С04 [20].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО И НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты численного моделирования удовлетворительно совпали с результатами натуральных испытаний.

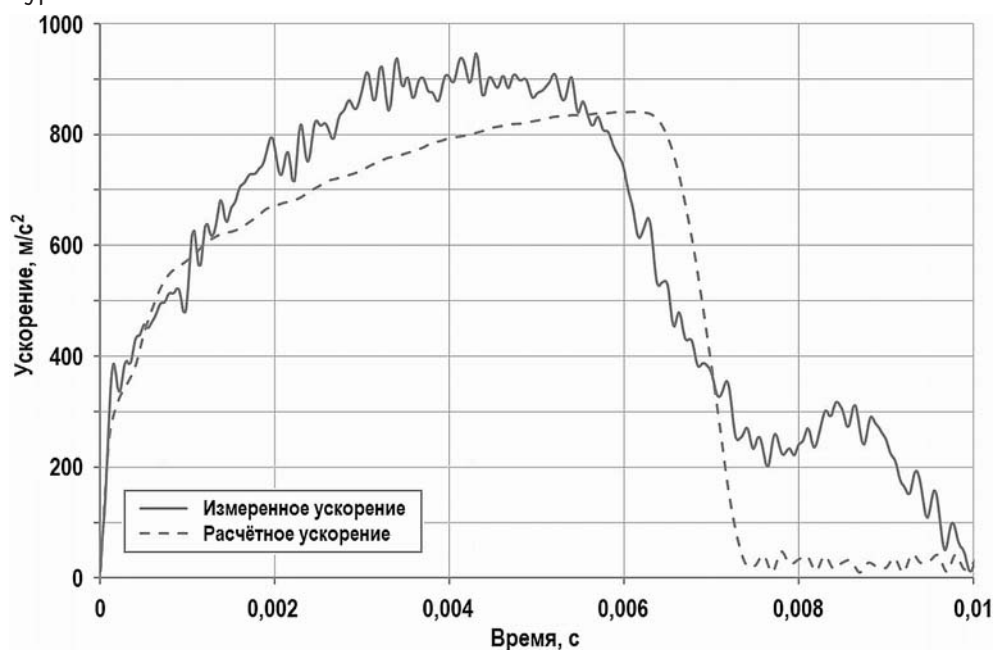


Рис. 3. Графики изменения ускорения (перегрузки) центра масс макета в процессе механического воздействия при падении на штырь

На рисунке 3 приведены графики изменения вертикальной перегрузки макета контейнера начиная с момента касания узлом герметизации поверхности штыря, измеренные акселерометром и полученные расчетным методом, сглаженные методом скользящей средней. Приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных значений перегрузок подтверждает достоверность компьютерного моделирования.

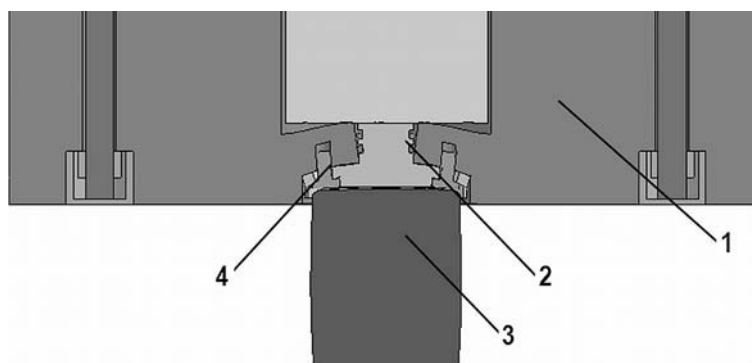


Рис. 4. Модель масштабного макета упаковки в момент начала отскока от штыря: 1 – дно контейнера; 2 – заглушка; 3 – штырь; 4 – крепеж заглушки ко дну контейнера

На рисунке 4 представлена общая картина деформирования узла герметизации макета контейнера в момент его отскока от торца штыря, полученная компьютерным моделированием. В результате удара о штырь поверхность дна, являющаяся опорой для заглушки, смещается в направлении внутренней полости контейнера на 8,5 мм. При этом проходка дна, куда вставляется заглушка, представляющая собой до деформации цилиндрическое отверстие диаметром 24 мм, деформируется, принимая форму усеченного конуса с диаметрами основания 23,92 мм (с внешней стороны дна контейнера) и 28,92 мм (со стороны внутренней полости контейнера). На боковой поверхности заглушки, где находятся два круговых паза для размещения и фиксации уплотнительных колец, пластическая деформация отсутствует.

Таким образом, конусообразная форма проходки дна, образовавшаяся в результате удара макета контейнера о штырь, приводит к уменьшению усилий обжатия резиновых кольцевых прокладок, что может привести к разгерметизации макета контейнера.

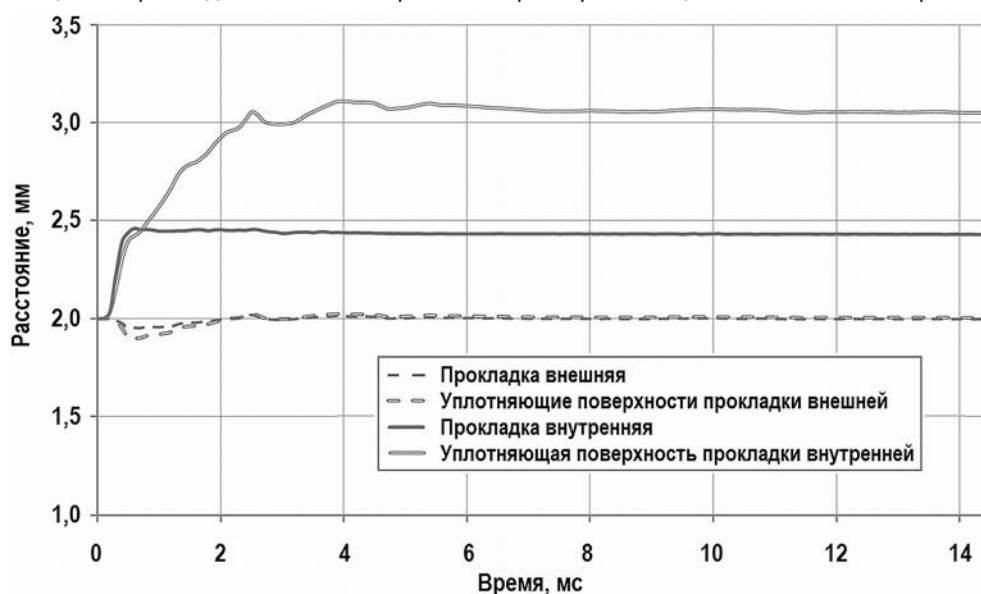


Рис. 5. Изменение толщин уплотнительных колец и расстояний между поверхностями, обеспечивающими их обжатие, в процессе механического воздействия на макет

На рисунке 5 представлены графики изменения толщины уплотняющих колец и расстояния  $S$  между поверхностями, обеспечивающими обжатие этих колец (см. рис. 1), в процессе соударения макета контейнера со штырем. Необходимыми условиями герметичности этих радиальных уплотнений являются следующие требования:

- расстояние  $S$  должно быть меньше диаметра поперечного сечения резинового уплотнительного кольца в свободном состоянии  $2,5 \pm 0,1$  мм;
- толщина резинового уплотнительного кольца в радиальном (горизонтальном) направлении должна быть заведомо меньше величины диаметра его поперечного сечения в свободном состоянии;
- толщина резинового уплотнения в радиальном направлении должна равняться расстоянию  $S$ .

Из рисунка видно, что внутреннее уплотнение полностью потеряло герметичность, так как поверхность проходки не оказывает никакого давления на уплотнительное кольцо. Зазор между кольцом и уплотняющими поверхностями составляет около 0,6 мм, в то время как внешнее уплотнение (по результатам расчетов) должно сохранять герметичность, так как выполняются три вышеперечисленные критерия.

Данный вывод, полученный в результате компьютерного моделирования, был под-



твержден экспериментально измерением скорости падения давления гелия внутри макета контейнера после бросковых испытаний. Скорость падения давления гелия составила  $3,9 \cdot 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>, что совпадает со скоростью падения давления до испытаний и указывает на сохранение герметичности макета контейнера.

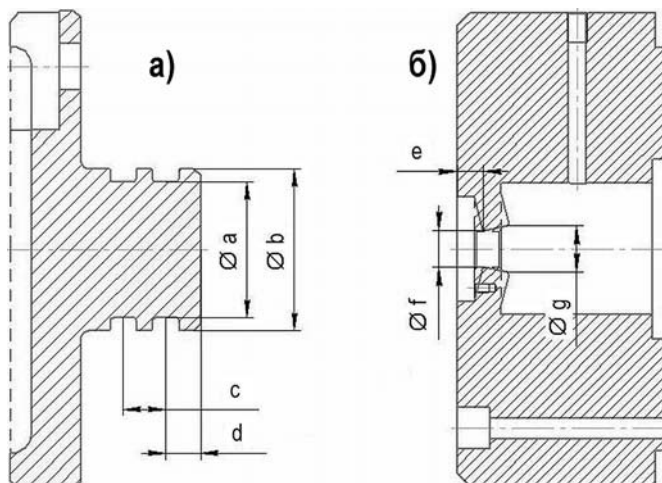


Рис. 6. Обозначения размеров боковой поверхности заглушки проходки, ответственной за фиксацию уплотнительных колец, и элементов дна макета

После завершения бросковых испытаний макета контейнера узел герметизации проходки в дне макета был разобран и выполнены замеры размеров элементов заглушки (рис. 6а) и проходки (рис. 6б), влияющих на герметичность макета контейнера. В таблице 1 для сравнения приведены размеры характерных элементов торцевой части макета контейнера, показанные на рис. 6, до испытаний, после испытаний и после компьютерного моделирования испытаний.

Таблица 1

**Значения характерных размеров элементов макета торцевой части контейнера после падения на штырь с высоты 1 м, полученные по результатам расчетов и испытаний**

Обозначение размера (см. рис. 6)	Значение размера до испытания, мм	Эксперимент		Расчет		Относительное отклонение расчетного значения размера от измеренного после проведения испытания, %
		Значение размера после испытания, мм	Изменение размера после испытания, мм	Значение размера после испытания, мм	Изменение размера после испытания, мм	
a	20,3	20,3	0,00	20,3	0,00	0
b	23,8	23,82	+0,02	23,92	+0,12	0,42
c	6,0	6,0	0,00	6,0	0,00	0
d	5,0	5,0	0,00	5,0	0,00	0
e	11,0	16,8	+5,80	19,52	+8,52	16,19
f	24,0	23,9	-0,10	23,92	-0,08	0,08
g	24,0	28,3	+4,30	28,92	+4,92	2,19

Анализ табличных данных показывает удовлетворительное описание процесса деформирования основных элементов узла герметизации макета контейнера с помощью численного эксперимента (компьютерного моделирования). Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных по деформированию элементов узла герметизации составило 16%, а расхождение диаметров проходки в дне макета контейнера, которые непосредственно влияют на герметичность, составило 0,1% (размер f) и 2,2% (размер g). При этом рассчитанные значения деформации проходки, приводящей к уменьшению усилия обжатия уплотнительных колец, превышают экспериментальные данные, что указывает на консерватизм полученных результатов расчета.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С помощью программного комплекса ANSYS LS-DYNA выполнено численное моделирование падения с высоты 1 м макета контейнера для транспортирования облученного ядерного топлива на вертикальный штырь. В частности, моделировалось соударение узла герметизации проходки в днище макета контейнера со штырем, что является наиболее опасным событием при бросковых испытаниях макета контейнера, потенциально приводящим к его разгерметизации.

Для подтверждения адекватности численной модели и результатов компьютерного моделирования бросковых испытаний был изготовлен макет контейнера с исследуемым узлом герметизации и выполнены его натурные испытания – падение с высоты 1 м узлом герметизации на штырь. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных позволили сделать следующие выводы.

1. Достоверность численных расчетов на основе компьютерной модели макета контейнера размерностью около двух миллионов конечных элементов подтверждается близостью результатов моделирования и натурных испытаний макета контейнера.

2. Компьютерные расчеты показали, что в результате динамического деформирования узла герметизации макета контейнера при падении на штырь развиваются пластические деформации дна макета в районе проходки, которые приводят к потере герметичности внутреннего радиального уплотнения; при этом наружное уплотнение сохраняет герметичность и тем самым обеспечивает герметичность макета контейнера. Данные выводы о герметичности внутреннего и наружного радиальных уплотнений, как и выводы о герметичности макета контейнера в целом, полностью подтвердились результатами натурных испытаний.

## **Литература**

1. НП-053-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. Электронный ресурс: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/1cf/4293748284.pdf> (дата доступа 10.01.2023).
2. SSR-6. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Конкретные требования безопасности. Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/ru/publications/13487/pravila-bezopasnoy-perevozki-radioaktivnyh-materialov> (дата доступа 10.01.2023).
3. ГОСТ Р 51964-2002. Упаковки отработавшего ядерного топлива. Типы и основные параметры. Электронный ресурс: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ecf/4294816146.pdf> (дата доступа 10.01.2023).
4. ПБЯ-06-09-2016. Правила ядерной безопасности при хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов. Электронный ресурс: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746881.pdf> (дата доступа 10.01.2023).
5. СанПиН 2.6.1.1281-03. Санитарные правила по радиационной безопасности персонала и населения при транспортировании радиоактивных материалов (веществ). Электронный ресурс: <https://base.garant.ru/4179203/> (дата доступа 10.01.2023).



6. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Электронный ресурс: [https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb\\_2612612-10.pdf](https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb_2612612-10.pdf) (дата доступа 10.01.2023).
7. РБ 039-07. Справочный материал к Правилам безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. Электронный ресурс: <https://gosthelp.ru/text/RB039070bespecheniebezora.html> (дата доступа 10.01.2023).
8. ГОСТ 9833-73. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Электронный ресурс: <https://rags.ru/gosts/gost/36935/> (дата доступа 10.01.2023).
9. ТУ 2531-002-28943826-2009. Изделия резинотехнические для оборудования атомной энергетики. Технические условия. – М. ООО НПФ «Реатэн», 2009. – 48 с.
10. ГОСТ 5632-2014. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Электронный ресурс: <https://kontinental.ru/upload/gost/gost%205632-2014.pdf> (дата доступа 10.01.2023).
11. ГОСТ Р 50.05.01-2018. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики контроля герметичности газовыми и жидкостными методами. Электронный ресурс: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739651.pdf> (дата доступа 10.01.2023).
12. Программный комплекс LS-DYNA (CD-ROM). – Livermore Software Technology Corp. (240 файлов).
13. Аттестационный паспорт программного средства №394 от 14.07.2016. Программное средство: ANSYS LS-DYNA. / Выдан Федеральным бюджетным учреждением «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности». Москва.
14. Барулина М.А. Использование ANSYS Workbench для работы с геометрическими моделями. – М.: Эдитус, 2012. – 316 с.
15. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Электронный ресурс: <http://vol-nrs.gosnadzor.ru/about/documents/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%8C%20%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D1%85%20%D0%A4%D0%9D%D0%9F/%D0%A4%D0%9D%D0%9F%201-20/%D0%9F%D0%9D%D0%90%D0%AD%20%D0%93-7-002-86.pdf> (дата доступа 10.01.2023).
16. Банкина О.С., Дзюба А.С., Хватан А.М. Метод построения диаграмм деформирования «S-E» по справочным механическим характеристикам материала // Труды ЦАГИ. – 2000. – № 2639. – С. 36-38.
17. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник. / Под ред. Б.Е. Неймарка. – М.: Энергия, 1967.
18. Хорошкина Г.П., Михайлов Н.Я., Учаев А.А. Физико-механические свойства конструкционных материалов и некоторые современные методы их исследования. Справочное пособие. – М.: ЦНИИАтомИнформ, 1982.
19. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. Электронный ресурс: <https://internet-law.ru/gosts/gost/5550/> (дата доступа 10.01.2023).
20. Акселерометры серии 350. Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 62537. ФБУ «Ростест-Москва», 2015.

Поступила в редакцию 14.01.2023 г.

#### Авторы

Гаязов Артем Зуферович, начальник отдела  
E-mail: [gaz@sosny.ru](mailto:gaz@sosny.ru)

Гаязов Олег Зуферович, инженер-конструктор  
E-mail: [goz@sosny.ru](mailto:goz@sosny.ru)

Козлов Вячеслав Юрьевич, ведущий инженер  
E-mail: [kvy@sosny.ru](mailto:kvy@sosny.ru)

Павлов Сергей Владленович, заместитель директора, д. т. н.  
E-mail: pavlov@sosny.ru

Самсонов Александр Анатольевич, заместитель директора – главный конструктор  
E-mail: saa@sosny.ru

UDC 621.039.546

## Calculation and Experimental Studies for the Spent Nuclear Fuel Shipping Cask Sealing Assembly

Gaiazov A.Z., Gaiazov O.Z., Kozlov V.Yu., Pavlov S.V. Samsonov A.A.

Sosny R&D Company

4a Dimitrova St., 433507 Dimitrovgrad, Ulyanovsk Reg., Russia,

### ABSTRACT

One of the safety requirements with respect to the shipping cask for spent nuclear fuel is that its leak-tightness should be maintained by preserving the cask body structural integrity and the sealing system tightness under normal and emergency transportation conditions.

The cask under design has a cylindrical process penetration (port) in its bottom which is sealed using a plug with a radial seal composed of two rubber O-rings. The cask sealing assembly design was justified by the ANSYS LS-DYNA code calculation results. In particular, strains of the cask components were calculated that are caused by the cask drop from a height of 1 m with the cask sealing assembly hitting a vertical bar. The cask was concluded to be leak-tight or leaky based on the strain nature and amount. To verify the adequacy of the results, computer-aided and realistic simulations were undertaken with a 1:2.5-scale mockup cask dropped onto a bar from a height of 1 m. The computational and experimental results show a good agreement in terms of the impact response accelerations (overloads) for the mockup cask and bar collision and in terms of the plastic strains for the key components of the mockup bottom port sealing assembly. This proves the adequacy of the numerical cask model that has been developed and the efficiency of the LS-DYNA simulations. The calculations show that the plastic strains in the cask bottom port region lead to a smaller force of the inner rubber O-ring compression by the port walls, this causing the inner radial seal to lose its tightness. At the same time, the outer seal remains leak-tight ensuring so the mockup cask tightness. The physical test results have also confirmed that the mockup cask remains leak-tight.

**Key words:** cask, leak-tightness, tests, numerical simulation, sealing assembly, strain, seal.

Gaiazov A.Z., Gaiazov O.Z., Kozlov V.Yu., Pavlov S.V. Samsonov A.A. Calculation and Experimental Studies for the Spent Nuclear Fuel Shipping Cask Sealing Assembly. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 81-92; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.07> (in Russian).

### REFERENCES

1. NP-053-16. *Federal Standards and Regulations for the Use of Nuclear Energy. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials*. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/1cf/4293748284.pdf> (accessed Jan. 10, 2023) (in

Russian).

2. SSR-6. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. Specific Safety Requirements*. Available at: <https://gnssn.iaea.org/CSN/School%20of%20Drafting%20Regulations%20RIDP/SSR-6%202012%20Edition.pdf> (accessed Jan. 10, 2023).

3. GOST R 51964-2002 *Packages with Spent Nuclear Fuel. Types and Main Parameters*. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ecf/4294816146.pdf> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

4. PBYa-06-09-2016. *Nuclear Safety Regulations for Storage and Transportation of Nuclear Fissile Materials*. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746881.pdf> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

5. SanPiN 2.6.1.1281-03. *Sanitary Rules for Radiation Safety of Personnel and Public during Transportation of Radioactive Materials (Substances)*. Available at: <https://base.garant.ru/4179203/> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

6. SP 2.6.1.2612 10. *Main Sanitary Regulations for Radiation Safety (OSPORB 99/2010)*. Available at: [https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb\\_2612612-10.pdf](https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb_2612612-10.pdf) (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

7. RB 039-07. *Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*. Available at: <https://gosthelp.ru/text/RB039070bespecheniebezopa.html> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

8. GOST 9833-73. *Rubber Toroidal Sealing Rings for Hydraulic and Pneumatic Equipment*. Available at: <https://rags.ru/gosts/gost/36935/> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

9. TU 2531 002-28943826-2009. *Rubber Sealing Rings for Nuclear Equipment. Technical Specifications*. Moscow. Reaten R&D Company Publ., 2009, 48 p. (in Russian).

10. GOST 5632-2014. *High-Alloy Steels and Corrosion-Proof, Heat-Resisting and Heat Treated Alloys. Grades*. Available at: <https://kontinental.ru/upload/gost/gost%205632-2014.pdf> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

11. GOST R 50.05.01-2018. *Conformity Assessment System for the Use of Nuclear Energy. Conformity Assessment as Examination. Unified Procedures. Leak Testing. Gaseous and Liquid Methods*. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739651.pdf> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

12. LS-DYNA Software (CD-ROM). Livermore Software Technology Corp. (240 files).

13. Software Certificate No. 394 dated July 14, 2016. Software: ANSYS LSDYNA. Issued by the Federal Budgetary Institution «Research and Development Center for Nuclear and Radiation Safety», Moscow.

14. Barulina M.A. *Application of ANSYS Workbench for Geometrical Models*. Moscow. Editus Publ., 2012, 316 p. (in Russian).

15. PNAE G-7-002-86. *Strength Analysis Standards for Equipment and Piping of Nuclear Power Installations*. Available at:

<http://vol-nrs.gosnadzor.ru/about/documents/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%8C%20%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D1%85%20%D0%A4%D0%9D%D0%9F/%D0%A4%D0%9D%D0%9F%201-20/%D0%9F%D0%9D%D0%90%D0%AD%20%D0%93-7-002-86.pdf> (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

16. Bankina O.S., Dzyuba A.S., Khvatan A.M.. *Plotting Methods of «S-E» Deformation Curves Basing on the Reference Mechanical Characteristics of Material*. *Central Aerohydrodynamic Institute Publications*. 2000, iss. 2639, pp. 36-38 (in Russian).

17. *Physical Properties of Steels and Alloys Used in the Power Industry. Handbook*. Ed. B.E. Neimark. Moscow – Leningrad. Energia Publ., 1967 (in Russian).

18. Khoroshkina G.P., Mikhailov N.Ya., Uchaev A.A. *Physical and Mechanical Properties of Structural Materials and Some Modern Techniques for Their Study. Reference Book*. Moscow, TsNIIAtomInform Publ., 1982 (in Russian).

19. GOST 380-2005. *Common Quality Carbon Steel. Grades*. Available at: <https://>

[internet-law.ru/gosts/gost/5550/](http://internet-law.ru/gosts/gost/5550/) (accessed Jan. 10, 2023) (in Russian).

20. Акселерометры серии 350. Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 62537. ФБУ «Ростест-Москва», 2015.

20. *Accelerometers Series 350*. Pattern Approval Certificate of Measuring Instruments No. 62537. Rostest-Moscow, 2015 (in Russian).

#### **Authors**

Artem Z. Gaiazov, Head of the R&D and Safety Analysis Department

E-mail: [gaz@sosny.ru](mailto:gaz@sosny.ru)

Oleg Z. Gaiazov, Design Engineer, Design and Development Division

Email: [goz@sosny.ru](mailto:goz@sosny.ru)

Viacheslav Yu. Kozlov, Leading Engineer, R&D and Safety Analysis Department

E-mail: [kvy@sosny.ru](mailto:kvy@sosny.ru)

Sergey V. Pavlov, Deputy Director for Science and Technology, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [pavlov@sosny.ru](mailto:pavlov@sosny.ru)

Aleksandr A. Samsonov, Deputy Director, Chief Engineer

E-mail: [saa@sosny.ru](mailto:saa@sosny.ru)