

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039.746

**ОБОСНОВАНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ТРАНСПОРТНОГО  
УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ТРЕБОВАНИЯМ  
БЕЗОПАСНОСТИ**

© 2019 Ю.Ю. Лушина\*, О.Ю. Жабунина\*\*, Н.Ю. Паршукова\*

\*Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,

Снежинск, Челябинская обл., Россия

\*\*Федеральное государственное унитарное предприятие «РФЯЦ-ВНИИТФ  
им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл., Россия

Целью работы является расчетное обоснование соответствия разработанного транспортного упаковочного комплекта (ТУК) нормативным требованиям безопасности в условиях наземного транспортирования отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС). Безопасность перевозки ОТВС должна быть подтверждена сохранением герметичности ТУК при аварийных падениях с высоты 9 м на горизонтальную поверхность и с высоты 1 м на штырь круглого сечения. Указанные испытания были имитированы численными расчетами в программе конечно-элементного анализа, которые показали, что предлагаемая конструкция ТУК удовлетворяет нормативным требованиям.

*Ключевые слова:* безопасность, транспортировка, отработавшие тепловыделяющие сборки, радиоактивный материал, опасный груз, транспортный упаковочный комплект, герметичность, система герметизации, контейнер, пенал, программа конечно-элементного анализа, прочность.

Поступила в редакцию 29.03.2019

После доработки 16.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019

Обеспечение безопасности при наземном транспортировании ОТВС с атомных станций на перерабатывающее предприятие является актуальной задачей.

Нормативные требования к перевозке радиоактивных материалов (РМ) по территории РФ сформулированы в документе НП-053-16 [1], согласно которому транспортировка РМ должна осуществляться в транспортных упаковочных комплектах – ТУК, обеспечивающих герметичность перевозимого опасного груза в нормальных и аварийных условиях перевозки. Способность конструкции ТУК выдержать транспортные аварии должна быть подтверждена следующими регламентированными [1] испытаниями:

- падение упаковки на плоскую горизонтальную поверхность с высоты 9 м;
- падение упаковки с высоты 1 м на штырь круглого сечения диаметром 15 см и высотой 20 см, изготовленный из мягкой стали (сталь 20 [2]).

В настоящее время на различных атомных электростанциях (АЭС) используется свой вид топлива. Так, на Белоярской АЭС используется топливо для реакторов АМБ (уран-графитовый каналный энергетический реактор – атом мирный большой), а на Билибинской АЭС – топливо реактора ЭГП-6 (водно-графитовый гетерогенный реактор каналного типа). Для каждого вида отработавшего топлива требуется своя конструкция упаковки. Для АМБ был разработан ТУК-84/1, конструкция которого удовлетворяет требованиям [1]. Для топлива реактора ЭГП-6 до настоящего времени не

существовало упаковки для транспортировки. ОТВС данного реактора помещены на длительное хранение в бассейны выдержки. Для доставки ОТВС реактора ЭГП-6 на перерабатывающее предприятие планируется разработать транспортную упаковку, которая и будет рассмотрена в данной работе.

С учетом размеров ОТВС (длина  $\approx 8$  м) разрабатывается ТУК, который представляет собой длинномерную конструкцию с габаритными размерами – диаметром от 1160 мм (по фланцу) до 812 мм (в узкой части) и длиной 8726 мм (рис. 1).

Система герметизации (СГ) ТУК имеет две ступени: пенал и контейнер, каждый из которых состоит из крышки и корпуса, соединяющихся шпильками. Корзина с шестью ОТВС размещается в пенале, который устанавливается в контейнер. Контейнер является сварной конструкцией.

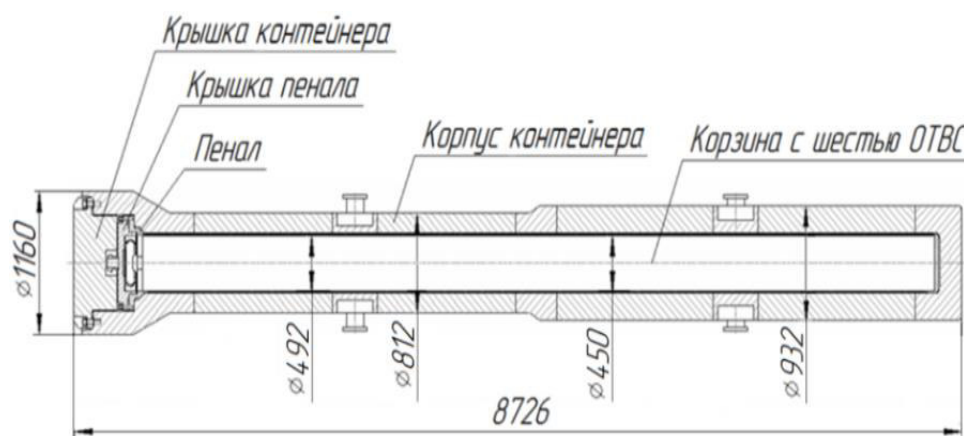


Рисунок 1 – Схема конструкции ТУК [TPS constructional scheme]

Физико-механические характеристики материалов элементов ТУК [3-4] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики материалов [Physical and mechanical characteristics of materials]

Элемент ТУК	Корпус контейнера	Крышка контейнера, пенал	Шпильки
Материал	Сталь 09Г2СА-А	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 38ХНЗМФА
Плотность $\rho$ , г/мм <sup>3</sup>	0,0078		
Модуль упругости $E$ , МПа	$2 \cdot 10^5$		
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,3		
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	245	196	882
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	430	510	980
Относительное удлинение $\delta$ , %	19	35	11

Для обоснования безопасной транспортировки ОТВС в разработанном ТУК при нормальных и аварийных условиях перевозки в программе конечно-элементного анализа [5] были выполнены задачи:

- модальный анализ конструкции ТУК;
- оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) ТУК в условиях аварийного падения упаковки на горизонтальную поверхность с высоты 9 м крышкой, боковой поверхностью и углом крышки;
- оценки НДС ТУК в условиях аварийного падения упаковки на штырь круглого сечения крышкой, боковой поверхностью и углом крышки.

Конечно-элементная модель (КЭМ) ТУК приведена на рисунке 2.

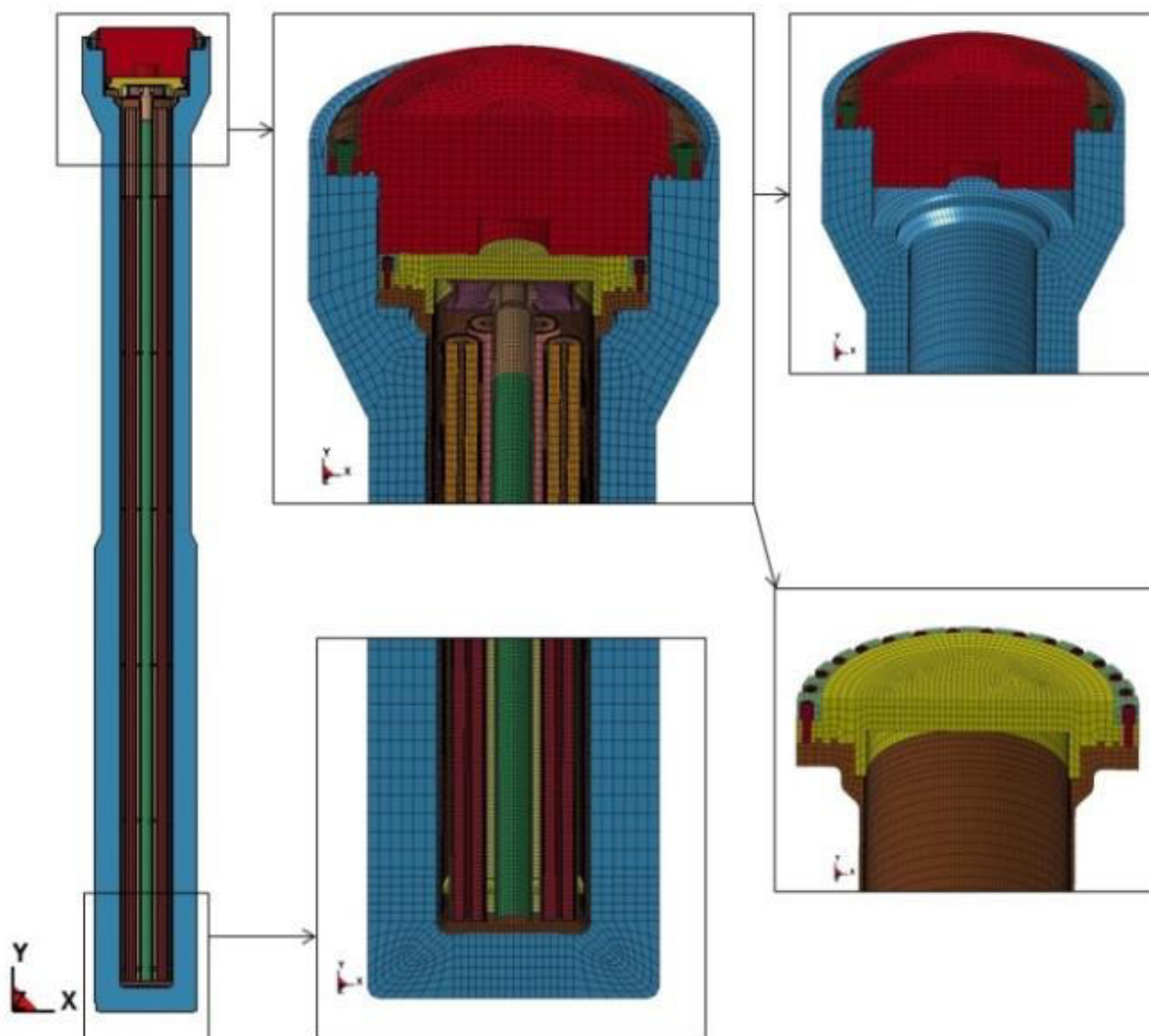


Рисунок 2 – КЭМ ТУК [Finite-element model of TPS]

Для оценки состояния ТУК при нормальных условиях транспортировки был выполнен модальный анализ [5]. Перевозка ТУК будет осуществляться в горизонтальном положении. На данный момент условия закрепления ТУК в транспортном средстве (ТС) достоверно не известны. Поэтому было рассмотрено два случая закрепления ТУК:

- опирание упаковки по двум краям – в области боковых поверхностей фланца и глухого торца;
- опирание упаковки по двум краям и в средней части – по краю утолщенной оболочки корпуса.

В результате расчета получены собственные частоты колебаний конструкции: в первом случае –  $f_2=45$  Гц, во втором случае  $f_3 =145$  Гц. Величина  $f_2$  близка к верхней границе диапазона транспортных частот  $f_m \leq 40$  Гц [6], что может сказаться на увеличении динамичности ТУК при транспортировании. Величина  $f_3$  достаточно удалена от диапазона транспортных частот, поэтому при перевозке рекомендуется использовать опирание упаковки по трем областям – двум краям и в средней части.

При расчетах на аварийные падения упаковки с высоты 9 м нагружение ТУК моделировалось заданием всем узлам конструкции начальной скорости 13,3 м/с, а

падение с высоты 1 м – заданием скорости 4,43 м/с. Указанные скорости соответствуют моменту столкновения упаковки с преградой.

Оценка состояния СГ (целостности герметизирующего контура) проводилась по следующим критериям [7-9]:

– по остаточным деформациям:

$$\varepsilon^{\max} \leq \delta, \quad (1)$$

– по растягивающим напряжениям в местах расположения сварных соединений:

$$\sigma_1^{\max} \leq \sigma_{св.} \quad (2)$$

где  $\varepsilon^{\max}$  – максимальная остаточная деформация, %;

$\delta$  – относительное удлинение материала, %;

$\sigma_1^{\max}$  – максимальное растягивающее напряжение, МПа;

$\sigma_{св.}$  – предел прочности сварного шва, рассчитывается по формуле [10, 11]:

$$\sigma_{св.} = k \cdot \sigma_{\sigma}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент ослабления материала сварного шва,  $k = 0,9$ ;

$\sigma_{\sigma}$  – предел прочности материала,  $\sigma_{\sigma} = 430$  МПа.

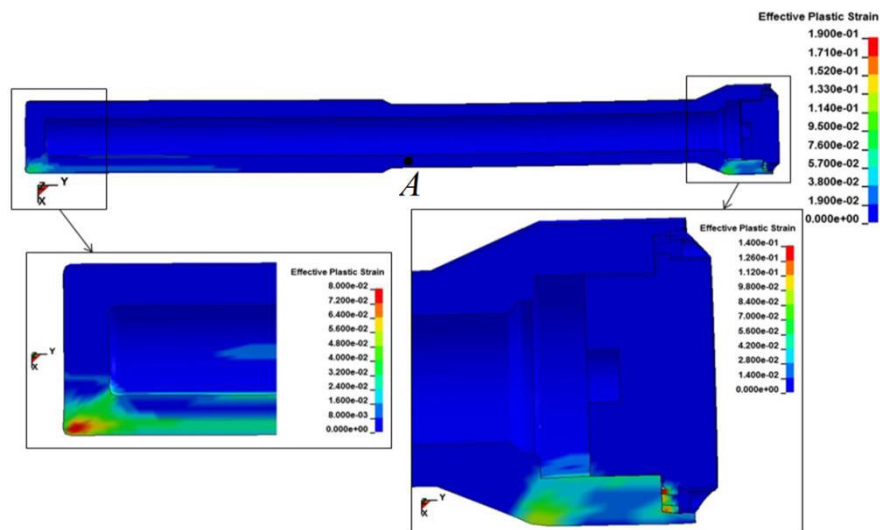
То есть предел прочности сварного шва равен  $\sigma_{св.} = 387$  МПа.

Для сварных швов наиболее опасным случаем аварийного падения является падение боковой поверхностью с высоты 9 м. В наиболее нагруженном сварном шве (т. А на рис. 3а) растягивающие напряжения не превосходят предел прочности сварного шва ( $\sigma_1 = 374,8$  МПа <  $\sigma_{св.} = 387$  МПа). То есть отсутствует угроза разрыва сварного соединения.

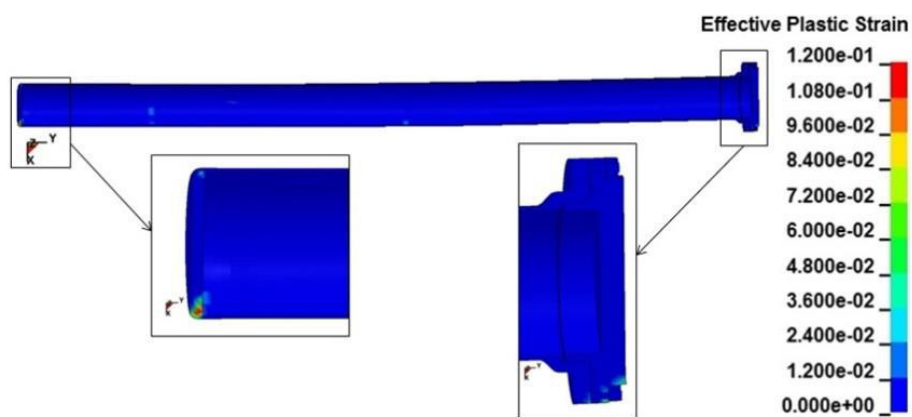
Остаточные деформации контейнера и пенала меньше относительного удлинения (для крышки контейнера –  $\varepsilon^{\max} = 19\% \leq \delta = 35\%$ , для корпуса контейнера –  $\varepsilon^{\max} = 9,8\% \leq \delta = 19\%$ , для пенала –  $\varepsilon^{\max} = 12\% < \delta = 35\%$ ), а для одной шпильки деформации превосходят параметр  $\delta = 11\%$  (см. рисунок 3). Возможное разрушение шпильки не повлияет на разгерметизацию контейнера. Коэффициент запаса прочности по деформациям составляет не менее 1,1.

Для элементов конструкции ТУК наиболее опасным случаем является падение углом крышки с высоты 9 м. Наибольшие деформации контейнера превышают относительное удлинение, но это не приведет к разгерметизации, поскольку область максимальных деформаций локализуется на краю в области сжатия (см. рис. 4). В герметизирующем контуре деформации составляют не более 17,5 %, что меньше параметра  $\delta = 19\%$  для материала крышки контейнера. Деформации пенала удовлетворяют требованиям прочности ( $\varepsilon^{\max} = 15,8\% \leq \delta = 35\%$ ), а в одной шпильке деформации превышают  $\delta$ . То есть, возможно, разрушение одной шпильки контейнера. При этом нарушение герметичности упаковки не произойдет, поскольку плотность стыка сохраняется. Прочность элементов упаковки обеспечивается с минимальным коэффициентом запаса по деформациям 1,1.

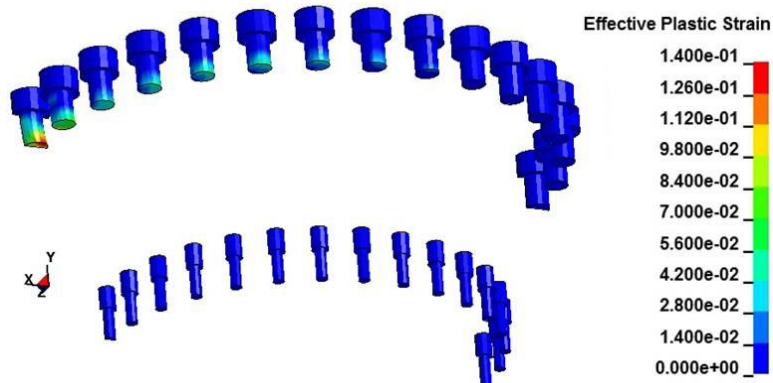
В наиболее нагруженном сварном шве (т. А на рис. 4а) растягивающие напряжения достигают 348,86 МПа, что меньше предела прочности  $\sigma_{св.} = 387$  МПа. Прочность сварных соединений обеспечивается с коэффициентом запаса не менее 1,1.



а) контейнер [container]

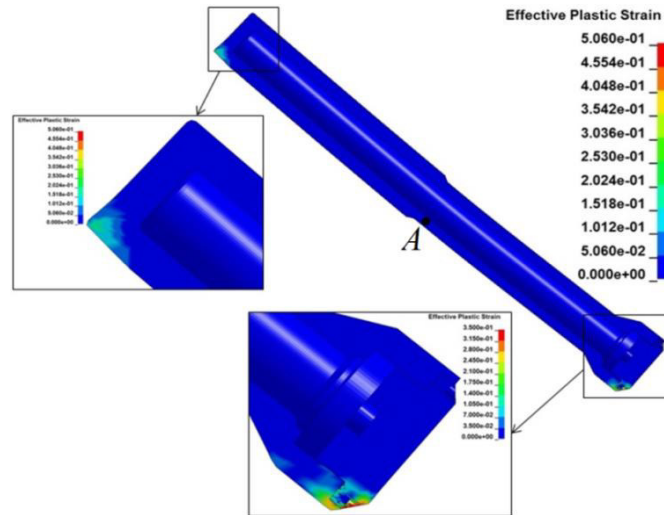


б) пенал [case]

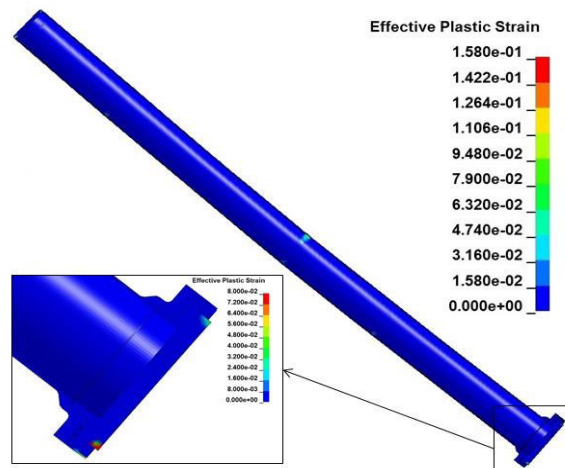


в) шпильки [stud-bolts]

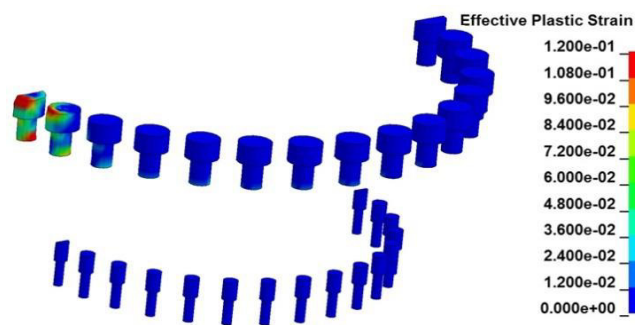
Рисунок 3 – Пластические деформации при падении ТУК боком с высоты 9 м [Plastic deformations when TPS falls sideways from height of 9 m]



а) контейнер [container]



б) пенал [case]



в) шпильки [stud-bolts]

Рисунок 4 – Пластические деформации при падении углом крышки с высоты 9 м [Plastic deformations when the cover corner falls from height of 9 m]

В остальных случаях падения прочность конструкции упаковки обеспечивается со следующими коэффициентами запаса:

– при падении крышкой с высоты 9 м коэффициент запаса для ТУК –  $n_{min} = 3,4$ , для сварных соединений –  $n_{min} = 3,2$ ;

- при падении крышкой на штырь коэффициент запаса для ТУК –  $n > 50$ , для сварных соединений –  $n_{min} = 16,5$ ;
- при падении боком на штырь коэффициент запаса для ТУК –  $n_{min} = 15,8$ , для сварных соединений –  $n_{min} = 3,4$ ;
- при падении углом крышки коэффициент запаса для ТУК и сварных соединений –  $n_{min} = 1,3$ .

Таким образом, по результатам выполненных вычислений можно сделать следующие выводы. Крепление ТУК в ТС рекомендуется осуществлять в трех местах: по фланцу, боковой поверхности глухого торца и по краю утолщенной оболочки. При таком креплении отсутствует вероятность возникновения резонанса, поскольку собственная частота колебаний конструкции превышает диапазон транспортных частот.

В результате расчетов выявлено, что в условиях аварийных падений упаковки с высоты 9 м на горизонтальную поверхность и при падении на штырь с высоты 1 м герметичность ТУК (пенала и контейнера) сохраняется, благодаря чему гарантируется безопасность транспортировки ОТВС.

Следовательно, конструкция ТУК удовлетворяет нормативным требованиям прочности и безопасности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» (НП-053-16) [Текст] / Москва : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2016. – 173 с.
2. ГОСТ 1050-2013. Metallokonstrukcija iz nелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. [Текст] / Введ. 2015.01.01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 32 с.
3. ГОСТ 25054-81. Поковки из коррозионноустойчивых сталей и сплавов. Общие технические условия. [Текст]. – введ. 1983.01.01. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 33 с.
4. ГОСТ 4543-2016. Metallokonstrukcija iz конструкционной легированной стали. Технические условия. [Текст]. – введ. 2017.10.01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 50 с.
5. LS-DYNA: Руководство пользователя [Текст] / Под ред. Б.Г. Рубцова. – Снежинск, 2000. – 160 с.
6. *Челомей, В.Н.* Вибрации в технике: Справочник [Текст]: В 6-ти томах/ В.Н. Челомей. Под ред. К.В. Фролова. – Защита от вибраций и ударов, Москва : Машиностроение, 1981. – Т.6. – 456 с.
7. *Феодосьев, В.И.* Сопrotивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев – 16-е изд., испр. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 543 с.
8. Сопrotивление материалов: учебник для вузов [Текст] / Под ред. Писаренко Г.С. – 5-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища шк., 1986. – 696 с.
9. *Иванов, М.Н.* Детали машин [Текст] / М.Н. Иванов. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва : Высшая школа, 1976. – 388 с.
10. *Биргер, И.А.* и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник [Текст] / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1993. – 640 с.
11. *Решетов, Д.Н.* Детали машин [Текст] / Д.Н. Решетов – 4-е изд., доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1989. – 496 с.

#### REFERENCES

- [1] Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii «Pravila bezopasnosti pri transportirovanii radioaktivnyh materialov» (NP-053-16) [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use «Safety Rules at Transportation of Radioactive Materials» (NR-053-16)]. Moscow. Federal'naya sluzhba po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Federal Agency of Ecological, Technological and Nuclear Supervision]. 2016. 173 p. (in Russian).

- [2] GOST 1050 – 2013. Metallokonstrukciya iz neligirovanneh konstrukcionnyh kachestvennyh i special'nyh staley. Obschie tekhnicheskie usloviya. [Metalware from Unalloyed Constructional Qualitative and Special Steels. The General Specifications]. Moscow. Standartinform [Standartinform Publishing House]. 2014. 32 p. (in Russian).
- [3] GOST 25054-81. Pokovki iz korrozionnostoykih staley i splavov. Obschie tekhnicheskie usloviya. [Forged Piece from Corrosion-Proof Steels and Alloy Materials. The General Specifications]. Moscow. Izdatelstvo standartov [Standartinform Publishing House]. 2003. 33 p. (in Russian).
- [4] GOST 4543-2016. Metallokonstrukciya iz konstrukcionnoy legirovannoy stali. Tekhnicheskie usloviya. [Metalware from Constructional Alloyed Steel. The Specifications]. Moscow. Standartinform [Standartinform Publishing House]. 2017. 50 p. (in Russian).
- [5] LS-DYNA: Rukovodstvo pol'zovatelya [LS-DYNA: user guide]. Snezhinsk, 2000, 160 p. (in Russian)
- [6] Vibracii v tekhnike: Spravochnik. T.6: Zashchita ot vibraciy i udarov [Vibrations in Equipment: Reference book. vol.6: Protection against Vibrations and Impacts]. Moscow. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering]. 1981. 456 p. (in Russian).
- [7] Pheodosyev V.I. Soprotivlenie materialov [Resistance of Materials]. Moscow. Pub. Izdatelstvo MGTU im. N.A.Baumana [Publishing House of MSTU]. 2016. 543 p. (in Russian).
- [8] Soprotivlenie materialov [Resistance of Materials – edited by Pisarenko G.S.]. Kiev. Pub. Vischa shkola [Higher School]. 1986. 696 p. (in Russian).
- [9] Ivanov M.N. Detali mashin [Machine elements]. Moscow. Pub. Vysshaja shkola [Higher School]. 1976. 388 p. (in Russian).
- [10] Birger I.A. etc. Raschet na prochnost detaley mashin: Spravochnik [Strength Calculation of Machine Elements. Reference book]. Moscow. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering]. 1993. 640 p. (in Russian).
- [11] Reshetov D.N. Detali mashin [Machine Elements]. Moscow. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering]. 1989. 496 p. (in Russian).

## Validation of the Transport Packing Set Compatibility to Safety Requirements

**Yu.Yu. Lushina<sup>\*1</sup>, O.Yu. Zhabunina<sup>\*\*2</sup>, N.Yu. Parshukova<sup>\*3</sup>**

*\* Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia*

*\*\* Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics», Snezhinsk, Russia*

*<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-3328-3989*

*Researcher ID: W-3732-2017*

*e-mail: yulyaledy94@mail.ru*

*<sup>2</sup>ORCID: 0000-0001-9823-3651*

*e-mail: O.S.Putilin@vniitf.ru*

*<sup>3</sup>ORCID: 0000-0001-9872-8996*

*Researcher ID: W-3192-2017*

*e-mail: p.i.e@yandex.ru*

**Abstract** – The aim of the article is the computational validation of compatibility of the developed transport packing set (TPS) to normative safety requirements in the conditions of land transportation of used fuel assemblies (UFA). The safety of UFA transportation should be confirmed by TPS tightness preservation at emergency falling from height of 9 m on a horizontal surface and from height of 1 m on the pin with circular section. The mentioned tests are simulated by numerical calculations in the finite-element analysis program which shows that suggested TPS construction meets normative requirements.

**Keywords:** safety, transportation, used fuel assemblies, radioactive material, dangerous cargo, transport packing set, tightness, hermetic sealing system, container, case, finite-element analysis program, strength.