

УДК 539.3

Численный анализ прочности ТУК-109Т в нормальных и аварийных условиях

**А. А. Рябов, В. И. Романов,
С. С. Куканов, Е. Е. Маслов,
К. В. Циберев**

Описано применение технологии трехмерного имитационного моделирования для обоснования прочности транспортного упаковочного комплекта ТУК-109Т, предназначенного для транспортирования ампул с пучками ТВЭЛ отработавшего ядерного топлива реакторов РБМК-1000. На основе разработанной детальной конечно-элементной модели анализируется прочность конструкции в нормальных условиях транспортировки и при аварийных механических воздействиях, регламентированных нормами МАГАТЭ. Исследовано 17 сценариев воздействия аварийных нагрузок. Сравнение численных результатов с данными испытаний полномасштабной конструкции ТУК-109Т подтверждает высокую точность компьютерного прогноза, выполненного с помощью пакета программ ЛОГОС-Прочность.

Введение

Актуальная проблема безопасной транспортировки свежего и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) привлекает внимание специалистов разных стран [1–14]. Для ее решения разрабатываются специальные защитные транспортные упаковочные комплекты (ТУК). Одной из важнейших задач при конструировании таких упаковок является обеспечение безопасности конструкции в нормальных условиях эксплуатации и возможных аварийных ситуациях. Согласно международным и национальным требованиям [15, 16] конструкция упаковки должна выдерживать нормальные и регламентированные аварийные условия транспортировки. Одним из наиболее жестких требований является сохранение ударопрочности и герметичности ТУК при аварийных падениях под любым углом с высоты 9 м на жесткое основание.

Вариант конструкции ТУК-109Т, разработанный в РФЯЦ-ВНИИЭФ, предназначен для транспортирования 150 ампул с пучками тепловыделяющих элементов (ПТ) реактора РБМК-1000. Изготовление и испытания ТУК сопряжены с большими материальными и временными затратами. Применение имитационного моделирования на современном уровне развития численных методов и суперкомпьютерных технологий позволяет с высокой точностью прогнозировать механическое состояние конструкций в различных условиях нагружения и существенно снизить затраты на проведение испытаний конструкции, ограничивая объем экспериментов лишь зачетными испытаниями. При проектировании ТУК-109Т на основе имитационного моделирования проведены все не-

обходимые компьютерные расчеты прочности конструкции при воздействии механических ударных, статических, вибрационных, а также тепловых эксплуатационных и регламентированных аварийных нагрузок.

В работе кратко представлены результаты трехмерного имитационного моделирования напряженно-деформированного состояния ТУК, выполненного для обоснования его прочности в нормальных условиях эксплуатации и при аварийных механических воздействиях. Показана высокая точность расчетного прогноза путем сравнительного анализа с результатами испытаний полномасштабной конструкции. Имитационное моделирование деформирования упаковки выполнено на основе пакета программ ЛОГОС (модуль «Прочность») разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ [17].

Пакет программ ЛОГОС

Пакет программ ЛОГОС разрабатывается для численного решения связанных задач газодинамики, теплопроводности, статического и динамического упругопластического деформирования и разрушения конструкций на многопроцессорных вычислительных ресурсах.

В основе пакета ЛОГОС (модуль «Прочность») лежит метод конечных элементов (МКЭ). Пакет ориентирован на решение задач механики сплошных сред в лагранжевой, лагранжево-эйлеровой и эйлеровой постановках на неструктурированных сетках с возможностью использования механизмов подсеточного разрешения (для лагранжевой постановки). Основными особенностями пакета являются:

- применение лагранжево-эйлерова подхода на неструктурированных сетках с использованием аппроксимаций МКЭ;
- возможность выделения контактных границ методом концентраций;
- моделирование процессов контактного взаимодействия материалов с учетом проскальзывания, отскока и трения.

В рамках модуля ЛОГОС-Прочность реализована библиотека конечных элементов, включающая 2D и 3D элементы сплошной среды с полным и неполным интегрированием, оболочечные и балочные элементы. В качестве начальных и граничных условий могут задаваться давление, сосредоточенные и распределенные узловые нагрузки, закрепления по вращательным и/или поступательным степеням свободы, скользящая граница, навязанная скорость, температура/поток/конвекция и т. д.

Одной из особенностей пакета программ ЛОГОС является высокий уровень распараллеливания на смешанной модели (OpenMP + MPI), позволяющий проводить трехмерное комплексное моделирование на супер-ЭВМ с использованием сотен процессорных ядер.

Описание конструкции

Конструктивно-силовая схема контейнера показана на рис. 1. Корпус контейнера представляет собой многослойную цилиндрическую оболочку. Между внутренней и наружной обечайкой установлены массивные стальные кольцевые вставки – радиационная защита, а также блоки нейтронной защиты из алюминиевых колец с полостями, заполненными полипропиленом. Цилин-

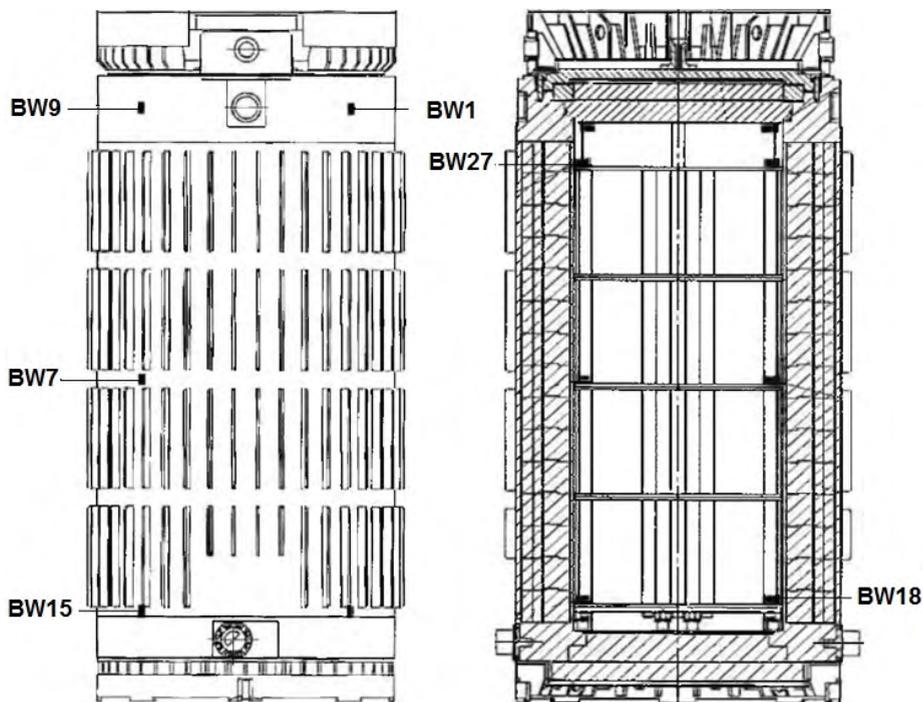


Рис. 1. Конструктивная схема ТУК-109Т и расположение датчиков ускорений

дический корпус с обеих сторон крепится к комингсам. С загрузочной стороны контейнер закрывается внутренней и внешней крышками. Внутренняя крышка прижимается кольцом, которое крепится 36 шпильками к верхнему комингсу. Наружная крышка крепится к верхнему комингсу 24 шпильками.

На внутреннюю крышку и днище контейнера также устанавливаются полипропиленовые блоки нейтронной защиты. На торцах контейнера имеются сварные демпферы – совокупность стальных плоских ребер различной высоты, охваченных по наружной торцевой поверхности стальным кольцом. На боковой поверхности контейнера расположены продольные теплоотводящие ребра, также выполняющие функцию демпфирования ударных нагрузок на контейнер при боковом падении. Внутри контейнера располагается чехол с ампулами ПТ, представляющий собой систему труб различного диаметра, связанных дистанционирующими дисками. В трубы большего диаметра помещаются кассеты, содержащие 30 ампул ПТ, а в трубы меньшего диаметра – отдельные ампулы ПТ. Масса упаковки превышает 100 т.

Методы решения и компьютерная модель

Рассматривается задача динамического деформирования конструкции при падении под разными углами с высоты 9 м на недеформируемую плоскую поверхность. Динамика деформирования описывается в переменных Лагранжа на основе уравнение движения, построенного на вариационном принципе Журдена:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_{\Omega} \rho \ddot{U}_i \delta \dot{U}_i dV = \int_{\Gamma_p} P_i \delta \dot{U}_i d\gamma + \int_{\Gamma_p} P_i^q \delta \dot{U}_i d\gamma \quad (i, j = \overline{1, 3}),$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и σ_{ij} – компоненты тензоров скоростей деформаций и напряжений; U_i – перемещения в общей системе координат X ; ρ – плотность, P_i^q – контактное давление, P_i – распределенная нагрузка, Ω – область, занимаемая конструкцией, Γ_q – поверхность контакта; Γ_p – область действия внешнего давления; точка над символом означает частную производную по времени t . Скорости деформаций определяются в метрике текущего состояния:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{ij})/2 \quad (i, j = \overline{1, 3}),$$

$$\dot{U}_{i,j} = \partial \dot{U}_i / \partial X_j, \quad X_j = X_j|_{t=0} + \int_0^t \dot{U}_j dt$$

Уравнения состояния записываются в соответствии с теорией течения с кинематическим упрочнением [18]. Контактное взаимодействие между элементами конструкции и жестким основанием описывается с коэффициентом трения $f = 0,2$. Учитывается действие гравитационной силы.

Для решения задачи используется явная схема интегрирования уравнения движения и пространственная дискретизация метода конечных элементов, реализованные в ЛОГОС-Прочность.

Для расчетов динамического деформирования конструкции разработана компьютерная конечно-элементная модель, общий вид и фрагменты которой показаны на рис. 2 (см. также цв. вкл.). В модель включены все основные силовые элементы конструкции: обечайки, крышки, демпферы, фланцы, чехол с ампулами ПТ и компенсаторными пружинами, шпильки крепления крышек. Компьютерная модель позволяет изучать принципиально важные особенности, необходимые для анализа безопасности контейнера в аварийных ситуациях:

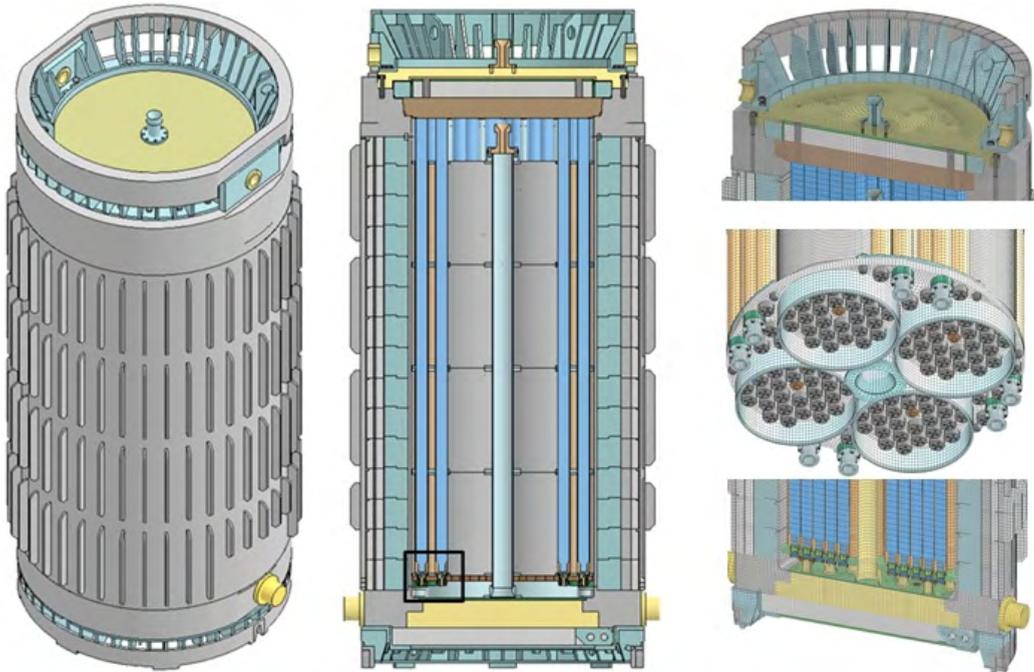


Рис. 2. Компьютерная модель ТУК-109Т

- динамическое упругопластическое деформирование всех силовых элементов конструкции контейнера, включая крепеж, для прогнозирования их прочности при аварии;
- деформирование и перемещение крышек и крепежа для анализа герметичности внутренних полостей контейнера в процессе нагружения и после аварии;
- деформирование демпфирующих элементов для подтверждения их энергоемкости и работоспособности;
- перемещение ампул с ПТ с учетом жесткости компенсаторных пружин.

Компьютерная модель разработана на основе 8-узловых конечных элементов сплошной среды и 4-узловых конечных элементов оболочечного типа (для пространственной дискретизации расчетной области труб чехла) и насчитывает ~6 млн конечных элементов с характерным разрешением по пространству $12 \times 12 \times 17$ мм. Масштаб пространственной дискретизации выбран на основе численных исследований сходимости решения при последовательном кратном сгущении сетки.

Численные исследования проводятся на кластере в параллельном режиме с использованием 300 процессорных ядер. Время расчета одного варианта ~1 ч, эффективность распараллеливания 65 %.

Анализ результатов расчетов

Для обоснования прочности ТУК в нормальных условиях эксплуатации выполнено имитационное моделирование деформирования конструкции при следующих нормативных воздействиях:

- свободное падение ТУК под различными углами к жесткой поверхности с высоты 0,3 м;
- осевое статическое сжатие конструкции усилием, равным пятикратной массе упаковки;
- удар стального стержня массой 6 кг, падающего с высоты 1 м на крышку и в центр боковой поверхности.

Численные исследования показали, что при заданных воздействиях в нормальных условиях эксплуатации конструкция деформируется упруго и демонстрирует достаточные запасы прочности, минимальный из которых ($\eta_v = 1,4$) имеют шпильки внутренней крышки при осевом падении контейнера с высоты 0,3 м на верхний демпфер.

В соответствии с требованиями национальных [15] и международных норм МАГАТЭ [16] анализ прочности ТУК должен проводиться как при однократных, так и при комбинированных аварийных воздействиях. В соответствии с этими требованиями компьютерное моделирование динамического деформирования ТУК-109Т проводится для однократных аварийных нагрузок (падение на жесткую поверхность с высоты 9 м и падение на вертикальный стержень с высоты 1 м) и для последовательных воздействий. При моделировании последовательного нагружения сначала выполняются расчеты падения контейнера с высоты 9 м, а затем деформированная конструкция используется в расчетах падения на стержень с высоты 1 м.

Верификация компьютерной модели осуществляется путем сравнения расчетных и замеренных в натуральных бросковых испытаниях ТУК перегрузок. Схема размещения датчиков ускорения приведена на рис. 1. Датчики BW1 и BW15 зафиксировали вертикальную перегрузку на поверхности контейнера, а датчики BW18 и BW27 – на корзине при осевом падении с высоты 9 м. Датчик BW7 зафиксировал перегрузку при боковом падении с высоты 9 м, а датчик BW9 отразил перегрузку при боковом падении контейнера на вертикальный стержень с высоты 1 м.

Сравнение расчетных и экспериментальных перегрузок при падении продемонстрировано на рис. 3, 4. Анализ результатов показывает, что при осевом падении с высоты 9 м на нижний демпфер

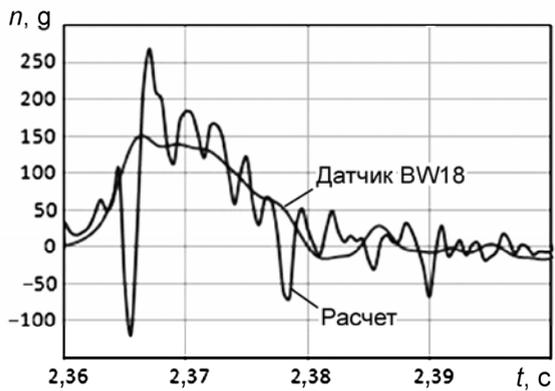
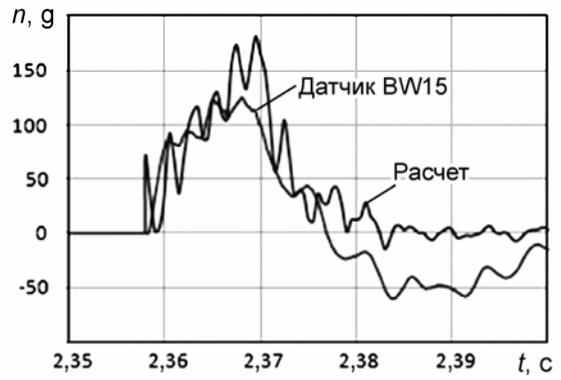
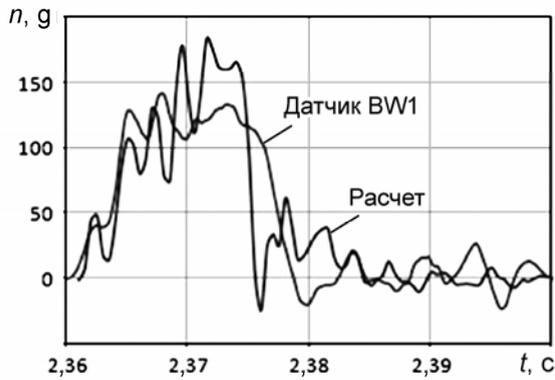


Рис. 3. Перегрузки при осевом падении ТУК-109Т

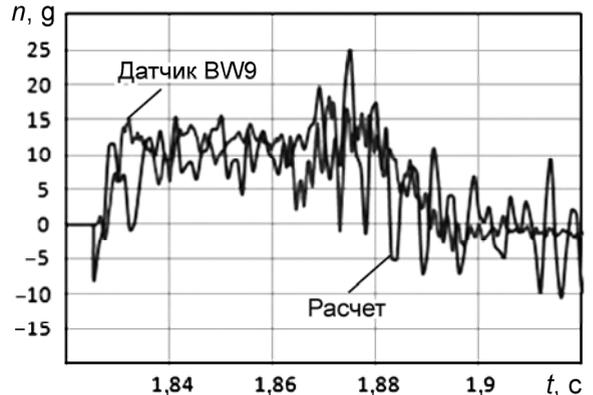
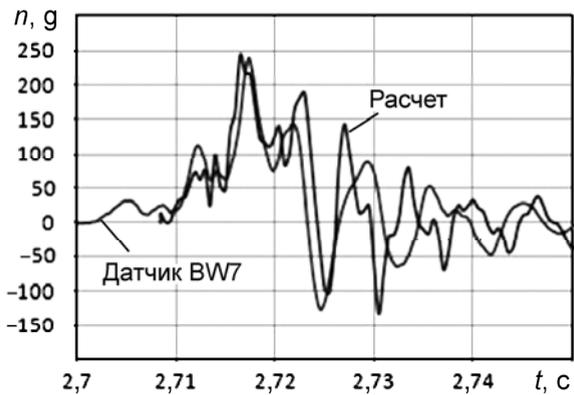


Рис. 4. Перегрузки при боковом падении ТУК-109Т

процесс активного торможения длится $\sim 15\text{--}18$ мс. При этом перегрузки корпуса и нижней части корзины достигают $n_{\max} \sim 150$. По данным испытаний (датчик BW27) и расчетов, перегрузка в верхней части корзины не превышает $n \sim 60$, что указывает на дополнительные демпфирующие свойства корзины. При боковом падении с высоты 9 м длительность процесса торможения несколько ниже, $\Delta t \sim 12\text{--}15$ мс, однако перегрузка корпуса контейнера достигает уровня $n_{\max} \sim 200\text{--}250$. При

падении с высоты 1 м на вертикальный стержень перегрузка на контейнере по расчетам и в опыте на порядок ниже и не превышает $n_{\max} \sim 15-20$. Таким образом, видна близость расчетных и экспериментальных результатов как по характеру изменения во времени, так и по амплитудным значениям, что подтверждает достоверность моделирования.

Для дополнительной верификации и подтверждения точности численных результатов сравнивали характерные размеры деформируемых элементов конструкции после различных испытаний. В натурном эксперименте смятие нижнего демпфера после осевого падения контейнера с высоты 9 м составляет $\Delta_{\text{исп}} \sim 80-100$ мм, что весьма близко к $\Delta_{\text{расч}} \sim 70-110$ мм. При боковом падении ТУК-109Т с высоты 1 м на вертикальный стержень глубина отпечатка в оболочке контейнера $\Delta_{\text{исп}} \sim 75$ мм, зафиксированная в опыте, весьма близка к $\Delta_{\text{расч}} \sim 76$ мм, полученной до испытаний. Необходимо отметить, что при падении на стержень во внешней оболочке контейнера, выполненной из нержавеющей пластичной стали, интенсивность локальных деформаций в зоне удара о стержень достигает $\sim 53\%$, при этом, как показывает эксперимент, оболочка сохраняет прочность.

Для обоснования ударопрочности ТУК-109Т численно исследованы 17 расчетных случаев нагружения конструкции:

- десять ориентаций падения с высоты 9 м на жесткую поверхность (2 осевых, 3 угловых, 5 боковых);
- шесть вариантов падения недеформированного (2) и деформированного (4) контейнера с высоты 1 м на стержень;
- затопление контейнера на глубину 15 м.

По результатам исследований можно отметить следующее:

- максимальный уровень деформации в силовых элементах контейнера не превышает относительного удлинения материалов, что позволяет сделать вывод о сохранении их прочности;
- максимальное раскрытие стыков крышек в зонах установки герметизирующих прокладок не превышает значения сборочного обжатия прокладок; герметичность контейнера сохраняется;
- демфирующие элементы ТУК обеспечивают максимальный уровень перегрузок, не превышающий $n_{\max} \sim 100-200$ во всех рассмотренных вариантах падений;
- данные расчетов деформированного состояния ампул с ПТ используются в качестве исходных в расчетах ядерной и радиационной безопасности ТУК-109Т.

При комбинированном последовательном воздействии, например, при угловом падении с высоты 1 м на стержень контейнера, деформированного после углового падения с высоты 9 м на плиту (рис. 5, см. также цв. вкл.), ТУК получает дополнительные локальные деформации и повреждения. В результате соударения со стержнем разрушаются еще четыре болта, крепящих верхний демпфер к наружной крышке. Общее количество разрушенных болтов крепления верхнего демпфера после падения с 9 м и после падения на штырь – 8 штук. Деформация основных силовых элементов конструкции не превышает уровня, достигнутого при угловом падении с высоты 9 м, за исключением комингса, в котором локальные деформации в зоне соударения со стержнем возрастают с 11 до 16%; при этом прочность всех элементов конструкции сохраняется. Деформационные зазоры в стыках крышек при падении на стержень с высоты 1 м не превышают значений обжатия прокладок, что свидетельствует о сохранении герметичности ТУК.

Исследование взаимного расположения ампул с ПТ в результате аварийных механических воздействий показало, что при боковом падении верхние части некоторых ампул, расположенных в кассетах, деформируются до соприкосновения друг с другом (рис. 6, см. также цв. вкл.).

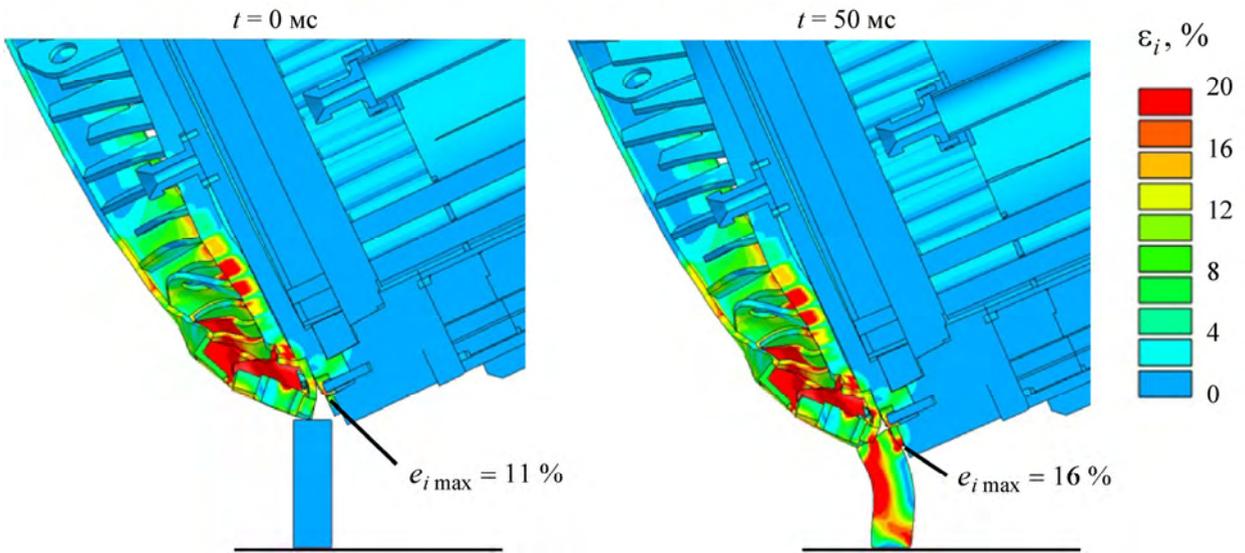


Рис. 5. Деформации при комбинированном нагружении

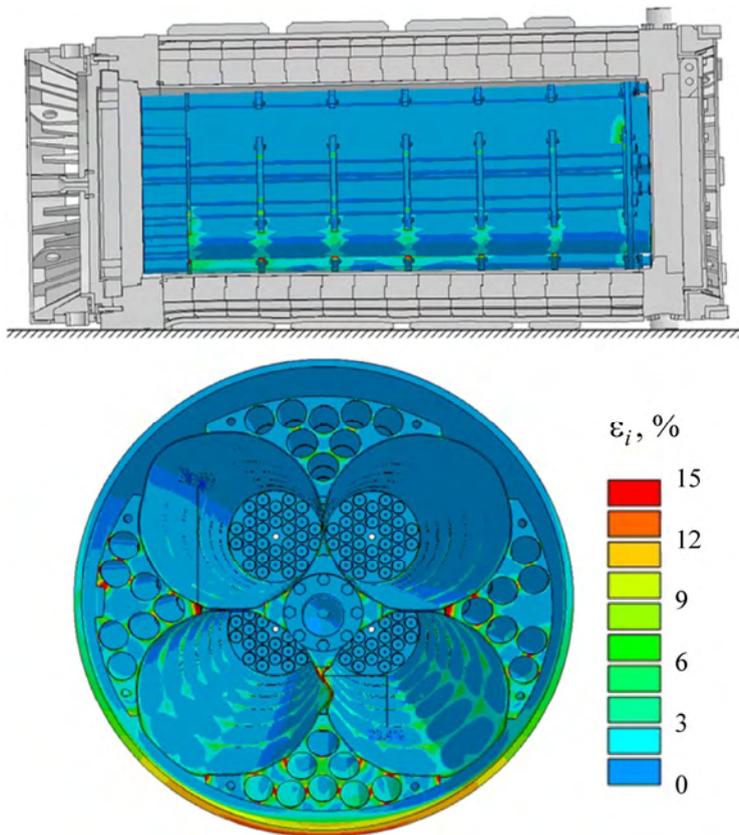


Рис. 6. Деформации при боковом падении с высоты 9 м

Заключение

На основе отечественных высокопараллельных программных средств ЛОГОС (модуль «Прочность»), разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ, и детальной компьютерной модели конструкции размерностью 6 млн конечных элементов проведены численные исследования прочности ТУК-109Т для 17 расчетных случаев нагружения, включая комбинированные режимы в нормальных и аварийных условиях. Достоверность численных результатов подтверждается близостью расчетных и экспериментальных данных по перегрузкам и остаточным деформациям отдельных элементов при аварийных падениях.

Исследования показывают, что при падении ТУК-109Т под разными углами с высоты 9 м на жесткое основание процесс торможения длится 12–20 мс, а максимальная перегрузка на корпусе достигает $n_{\max} \sim 100\text{--}200$. Деформация в элементах конструкции не превышает относительного удлинения материалов, прочность всех деталей ТУК-109Т сохраняется, кроме восьми болтов крепления верхнего демфера к внешней крышке. Деформационные зазоры крепления крышек не превышают уровня предварительного обжатия уплотнений, что подтверждает герметичность конструкции.

При комбинированном нагружении ТУК-109Т угловое падение на крышку с высоты 9 м приводит к разрушению четырех болтов крепления верхнего демфера. Последующее угловое падение деформированного корпуса на стержень с высоты 1 м увеличивает локальные деформации комингса с 11 до 16 % и дополнительно разрушает еще 4 болта крепления демфера; при этом прочность всех силовых элементов и герметичность конструкции сохраняются.

Список литературы

1. Рябов А. А., Романов В. И., Сотсков Г. И., Скурихин С. Г. Численное моделирование динамического деформирования транспортного упаковочного комплекта при аварийных механических воздействиях // Сб. докл. II конф. «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность». – Геленджик, 2002. С. 269–276.
2. Ryabov A. A., Romanov V. I., Sotskov G. I. Numerical simulations of dynamic deformation of air transport fresh fuel package in accidental impacts // Proc. of the WM'03. Tucson, AZ, February 23–27, 2003.
3. Yamamoto K. et al. Take design of a new MOX powder transport packaging to Support FBR cycle development mission // The 14th Int. Symp. PATRAM-2004. Berlin, Germany, September 20–24, 2004. Paper #160.
4. Feldman M. R., Handy K. D. Comparison of analytical and physical testing results for the DPP-2 shipping package // Ibid. Paper #269.
5. Arbital J. G., Byington G. A., Tousley D. R. ES-3100: a new generation shipping container for bulk highly enriched uranium and other fissile materials // Ibid. Paper #296.
6. Romanov V., Ryabov A., Barkanov B., Skurikhin S. Numerical simulation of dynamic deformation of spent fuel transport packages for nuclear power plants in accidental mechanical impacts // RAMTRANS. 2004. Vol. 15, N 3–4. P. 199–206.
7. Staples J. F., Pitzer M., DuBois P. A. Development of shipping package drop analysis capability at westinghouse // 8th Int. LS-DYNA Users Conf. Detroit, 2004. P. C-1–C-15.

8. Баженов В. Г., Кибец А. И., Кибец Ю. И. и др. Конечно-элементный анализ высокоскоростного удара о преграду транспортного упаковочного комплекта // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 118–125.
9. Илькаев Р. И., Барченков А. И., Рябов А. А. и др. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования упаковок для перевозки воздушным транспортом свежего ядерного топлива энергетических и исследовательских реакторов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 8. С. 294–303.
10. Volzke H. et al. Transport and storage cask safety assessment – drop test and numerical calculations // Proc. of the WM'06 Conf. Tucson, AZ, February 26 – March 2, 2006. Paper #6197.
11. Mane J. V., Chavan V. M., Agrawal R. G. Numerical simulations and experimental drop tests on scale model of irradiated thorium bundles transportation cask // 15th Int. Symp. PATRAM-2007. Miami, USA, October 21–26, 2007. Paper #75.
12. Qiao L. et. al Dynamic and quasi-static FE calculation of impact from 9 meter drop of a spent fuel transport cask // Radioactive Materials Transport Conf. 13–14 May 2009, Manchester, UK.
13. Voßnacke A., Nöring R., Schröder J. CASTOR® HAW28M – development and licensing of a cask for transport and storage of vitrified high active waste containers // 16th Int. Symp. PATRAM-2010. October 3-8, 2010, London, UK. Paper #32.
14. Qiao L. et al. Numerical simulation of 9 meter drop of a transport and storage cask with aluminium impact limiter // Ibid. Paper #117.
15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-053-16 «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов».
16. Серия норм МАГАТЭ по безопасности № SSR-6 «Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов».
17. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Цибереv К. В и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Труды XIII международ. семинара «Супервычисления и математическое моделирование». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С. 208–219.
18. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968.

Numerical Stress Analysis of TUK-109T Package in Normal and Accident Conditions

A. A. Ryabov, V. I. Romanov, S. S. Kukanov, E. E. Maslov, K. V. Tsiberev

The TUK-109T package is designed for transportation of the cartridges with bundles of spent fuel elements of RBMK-1000 reactors. The paper presents the results of application of 3D numerical simulation technology to prove the ability of TUK-109T to withstand the normal condition of transport and the hypothetical accident conditions. The detailed finite element model is developed to carry out the analysis. 17 loading cases, including combinations of different loads, are investigated. The comparison of the numerical results to the experimental data, obtained using full-scale model of the package, shows high accuracy of the numerical analysis. The computer simulations are performed using highly parallel computer code LOGOS («STRENGTH» module).