

УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ТУК-109Т В НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2016 г. **Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С.,
Маслов Е.Е., Циберев К.В.**

*Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной
физики, Саров, Российская Федерация*

AAryabov@vniief.ru

Поступила в редакцию 20.11.2015

Представлены результаты применения 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, в том числе комбинированных. Сравнение численных результатов с данными испытаний полномасштабной конструкции ТУК-109Т подтверждает высокую точность компьютерного прогноза. Компьютерное моделирование выполнено на основе российских высокопараллельных программных средств ЛОГОС (модуль ПРОЧНОСТЬ), разработанных в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики.

Ключевые слова: транспортный упаковочный комплект, демпфирующая система, нормальные и аварийные условия, комбинированное воздействие, метод конечных элементов, численное моделирование, анализ динамических напряжений.

Введение

Проблема безопасной транспортировки свежего и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) является актуальной и привлекает внимание специалистов разных стран [1–14]. Для ее решения разрабатываются специальные защитные транспортные упаковочные комплекты (ТУК). Одна из важнейших задач при конструировании таких упаковок – обеспечение безопасности конструкции в нормальных условиях эксплуатации и в 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 герметично-

сти ТУК при аварийных падениях под любым углом с высоты 9 метров на жесткое основание.

Вариант конструкции ТУК-109Т, разработанный в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (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 снижать затраты на проведение испытаний конструкции, ограничивая объем экспериментов лишь зачетными испытаниями. При проектировании ТУК-109Т на основе имитационного моделирования проведены все необходимые компьютерные расчеты прочности конструкции при действии механических ударных, статических, вибрационных, а также тепловых эксплуатационных и регламентированных аварийных нагрузок.

В статье 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 российских программных средств ЛОГОС (модуль ПРОЧНОСТЬ), разработанных в РФЯЦ–ВНИИЭФ [17].

Пакет программ ЛОГОС

Пакет программ ЛОГОС разрабатывается для численного решения связанных задач газодинамики, теплопроводности, статического и динамического упруго-пластического 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 ЛОГОС (модуль 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), позволяющей проводить трехмерное комплексное моделирование на суперЭВМ 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 обечайками установлены массивные стальные кольцевые вставки – радиационная защита, а также блоки нейтронной защиты из алюминиевых колец с полостями, которые заполнены полипропиленом. Цилиндрический корпус с обеих сторон крепится к комингсам. С загрузочной стороны контейнер закрывается двумя крышками: внутренней и внешней. Внутренняя крышка прижимается кольцом, которое крепится 36 шпильками к верхнему комингсу. Наружная крышка крепится к верхнему комингсу 24 шпильками.

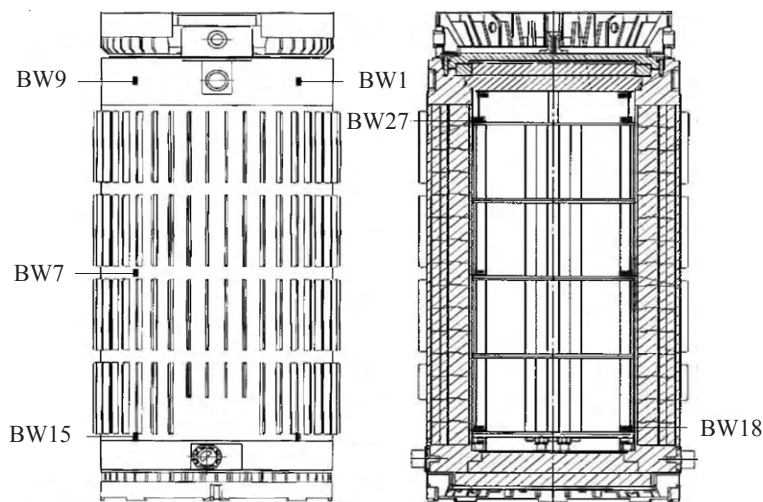


Рис. 1. Конструктивная схема ТУК-109Т и расположение датчиков ускорений

На внутреннюю крышку и днище контейнера также устанавливаются полипропиленовые блоки нейтронной защиты. На торцах контейнера имеются сварные демпферы, состоящие из совокупности стальных плоских ребер различной высоты, охваченных по наружной торцевой поверхности стальным кольцом. На боковой поверхности контейнера расположены продольные теплоотводящие ребра, выполняющие также 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.

Метод решения и компьютерная модель

Рассматривается задача динамического деформирования конструкции при падении под разными углами с высоты $H = 9$ м на недеформируемую плоскую повер-

хность. Динамика деформирования описывается в переменных Лагранжа на основе уравнения движения, построенного на вариационном принципе Журдена:

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

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ 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:

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

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

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 (модуль ПРОЧНОСТЬ).

Для расчетов динамического деформирования конструкции разработана компьютерная конечно-элементная модель, общий вид и фрагменты которой показаны на рис. 2.

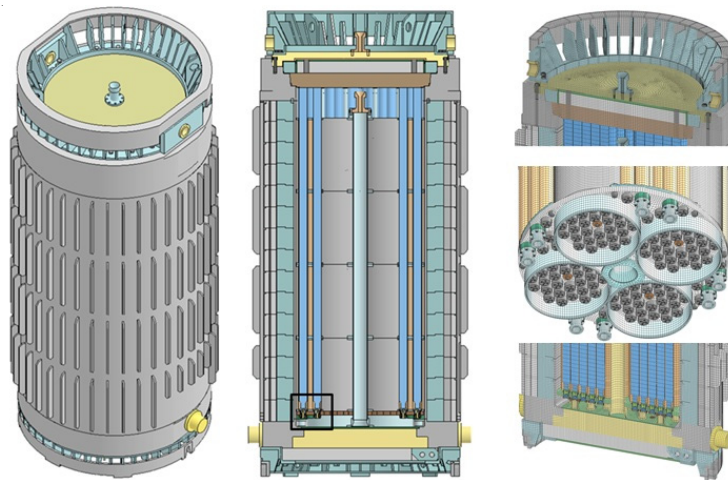


Рис. 2. Компьютерная модель ТУК-109Т

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 проводить анализ следующих принципиально важных особенностей, необходимых для анализа безопасности контейнера в авариях:

- динамического упругопластического деформирования всех силовых элементов конструкции контейнера, включая крепеж для прогноза их прочности в аварии;
- деформирования и перемещения крышек и крепежа для анализа герметичности внутренних полостей контейнера в процессе нагружения и после аварии;
- деформирования демпфирующих элементов для подтверждения их энергоемкости и работоспособности;
- перемещения ампул с ПТ с учетом жесткости компенсаторных пружин.

Компьютерная модель разработана на основе восьмиузловых конечных элементов сплошной среды и четырехузловых 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 проводились на кластере в параллельном режиме с использованием 300 процессорных ядер. Время расчета одного варианта ~1 часа, эффективность распараллеливания 65%.

Результаты расчетов и их анализ

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 $H = 0,3$ 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.

Результаты численных исследований показывают, что при заданных воздействиях в нормальных условиях эксплуатации конструкция деформируется упруго и демонстрирует достаточные запасы прочности, минимальный из которых $\eta_b = 1,4$ имеют шпильки внутренней крышки при осевом падении контейнера с высоты $H = 0,3$ 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, поэтому компьютерное моделирование динамического деформирования ТУК-109Т проведено для однократных аварийных нагрузок – падение на жесткую поверхность с высоты $H = 9$ м и падение на вертикальный стержень с высоты $H = 1$ м – и для двух последовательных воздействий. При моделировании последовательного нагружения сначала выполнялись расчеты падения контейнера с высоты $H = 9$ м, а затем деформированная конструкция использовалась в расчетах падения на стержень с высоты $H = 1$ м.

Верификация компьютерной модели проводилась путем сравнения расчетных и экспериментальных перегрузок, замеренных в натурных бросковых испытаниях ТУК. Схема размещения датчиков ускорений (BW1, BW7, BW9, BW15, BW18, BW27) приведена на рис. 1. Датчики BW1 и BW15 фиксировали вертикальную перегрузку на поверхности контейнера, а датчики BW18 и BW27 – на корзине при осевом па-

дении с высоты $H = 9$ м. Датчик BW7 фиксировал перегрузку при боковом падении с высоты $H = 9$ м, а датчик BW9 отразил перегрузку при боковом падении контейнера на вертикальный стержень с высоты $H = 1$ м.

Сравнение численных и экспериментальных результатов по изменению перегрузок при падениях приведено на рис. 3 и 4. На рисунках и в тексте значения перегрузок приведены в величинах ускорения свободного падения.

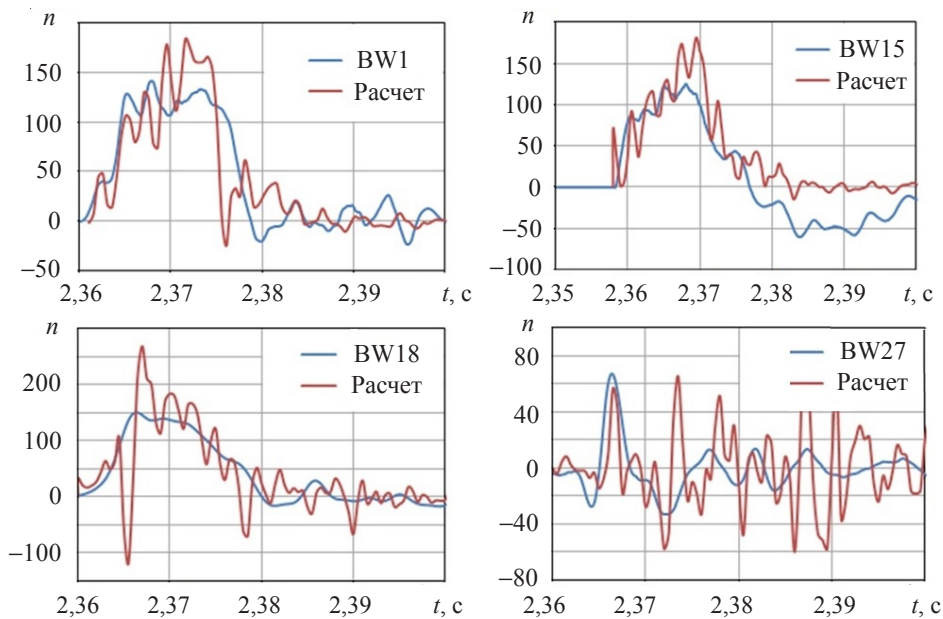


Рис. 3. Перегрузки при осевом падении ТУК-109Т

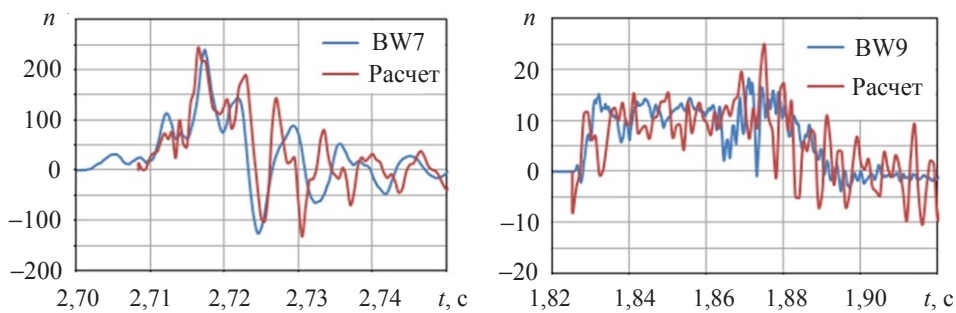


Рис. 4. Перегрузки при боковом падении ТУК-109Т

Анализ результатов показывает, что при осевом падении с высоты $H = 9$ м на нижний демпфер процесс активного торможения длится $\Delta t \sim 15\text{--}18$ 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 $H = 9$ 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 $H = 1$ м на вертикальный стержень перегрузка на контейнере по расчетам и в опыте на порядок ниже и не превышает

$n_{\max} \sim 15-20$. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных результатов показывает их близость как по характеру изменения во времени, так и по амплитудным значениям, что подтверждает достоверность моделирования.

Для дополнительной верификации и подтверждения точности численных результатов проведено сравнение характерных размеров деформируемых элементов конструкции после различных испытаний. В натурном эксперименте смятие нижнего демпфера после осевого падения контейнера с высоты $H = 9$ м составляет $\Delta_{\text{исп}} \sim 80-100$ мм, что весьма близко к расчетной величине $\Delta_{\text{расч}} \sim 70-110$ мм. При боковом падении ТУК-109Т с высоты $H = 1$ м на вертикальный стержень глубина отпечатка в оболочке контейнера, зафиксированная в опыте $\Delta_{\text{исп}} \sim 75$ мм, весьма близка к расчетной величине $\Delta_{\text{расч}} \sim 76$ 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 $\varepsilon_{i\max} \sim 53\%$, 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 $H = 9$ м на жесткую поверхность (2 – осевых, 3 – угловых, 5 – боковых);

- шесть вариантов падения недеформированного и деформированного контейнеров с высоты $H = 1$ м на стержень (2 – для недеформированных, 4 – для деформированных контейнеров);

- затопление контейнера на глубину $H = 15$ м.

По результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

- максимальные уровни деформации в силовых элементах контейнера не превышают величины относительного удлинения материалов, что позволяет сделать вывод о сохранении их прочности;

- максимальные раскрытия стыков крышек в зонах установки герметизирующих прокладок не превышают величины сборочного обжатия прокладок, герметичность контейнера сохраняется;

- демпфирующие элементы ТУК обеспечивают максимальные уровни перегрузок, не превышающие $n_{\max} \sim 100-200$ во всех рассмотренных вариантах падений;

- деформированное состояние ампул с ПТ, полученное по результатам расчетов, используется в качестве исходных данных для проведения расчетов ядерной и радиационной безопасности ТУК-109Т.

При комбинированном последовательном воздействии, например при угловом падении на стержень с высоты 1 м контейнера, деформированного после углового падения с высоты 9 м на плиту (рис. 5), 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 достигает 8 штук. Деформации основных силовых элементов конструкции не возрастают выше уровней, достигнутых при угловом падении с высоты $H = 9$ 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 $H = 1$ м не превышают величин обжатия прокладок, что свидетельствует о сохранении герметичности ТУК.

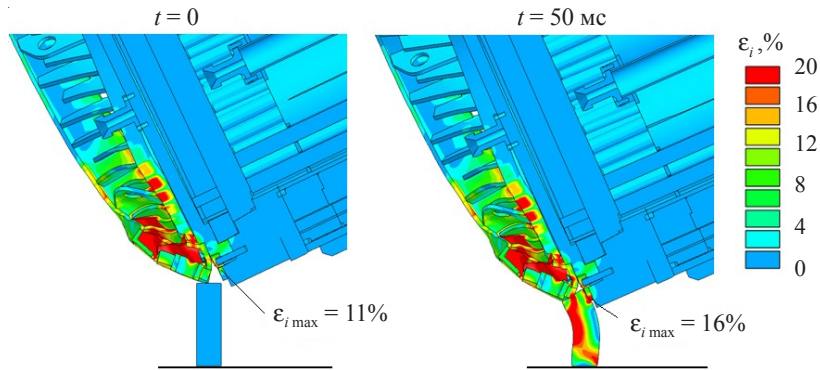


Рис. 5. Деформации при комбинированном нагружении

Исследовано взаимное расположение ампул с ПТ в результате аварийных механических воздействий. Показано, что при боковом падении верхние части некоторых ампул, расположенных в кассетах, деформируются до соприкосновения друг с другом (рис. 6).

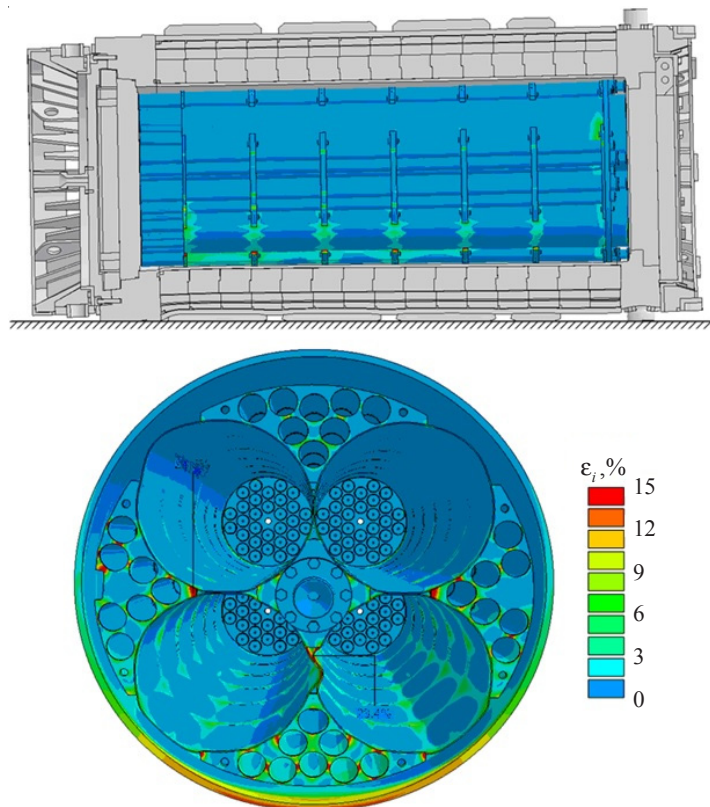


Рис. 6. Деформации при боковом падении с высоты $H = 9$ м

Выводы

1. 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.

2. Исследования показывают, что при падениях ТУК-109Т под разными углами с высоты $H = 9$ м на жесткое основание длительность процесса торможения лежит в диапазоне $\Delta t = 12\text{--}20$ мс, а максимальные перегрузки на корпусе $n_{\max} \sim 100\text{--}200$. Деформации в элементах конструкции не превышают относительные удлинения материалов, прочность всех деталей ТУК-109Т сохраняется за исключением восьми болтов крепления верхнего демпфера к внешней крышке. Деформационные зазоры крепления крышек не превышают уровни предварительных обжатий уплотнений, что подтверждает герметичность конструкции.

3. При комбинированном нагружении ТУК-109Т угловое падение на крышку с высоты $H = 9$ м приводит к разрушению четырех болтов крепления верхнего демпфера. Последующее угловое падение деформированного корпуса на стержень с высоты $H = 1$ м увеличивает локальные деформации комингса с 11 до 16% и дополнительно разрушает еще 4 болта крепления демпфера, 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. *Методы и программное обеспечение расчетов на прочность. Вторая конф.*: Сб. докл. 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. *The WM'03 Conference*. Tucson, AZ. February 23–27, 2003. P. 1–7.
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 No 160.
4. Feldman M.R., Handy K.D. Comparison of analytical and physical testing results for the DPP-2 shipping package. *The 14th Int. Symp. PATRAM-2004*. Berlin, Germany. September 20–24, 2004. Paper No 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. *The 14th Int. Symp. PATRAM-2004*. Berlin, Germany. September 20–24, 2004. Paper No 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. No 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., Лаптев П.В., Рябов А.А., Романов В.И., Сотсков Г.И. 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., Файков Ю.И., Шаповалов В.И. и др. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования упаковок для перевозки воздушным транспортом свежего ядерного топлива энергетических и исследовательских реакторов. *Труды ВНИИЭФ*. Саров, 2005. Вып. 8. С. 294–303.
10. Volzke H. et al. Transport and storage cask safety assessment – drop test and numerical calculations. *WM'06 Conf.* Tucson, AZ. February 26 – March 2, 2006. Paper No 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. *The 15th Int. Symp. PATRAM-2007*. Miami, USA. October 21–26, 2007. Paper No 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 Conference*. 2009. Manchester, UK. May 13–14, 2009.
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. *The 16th Int. Symp. PATRAM-2010*. London, UK. October 3–8, 2010. Paper No 32.
14. Qiao L. et al. Numerical simulation of 9 meter drop of a transport and storage cask with aluminium impact limiter. *The 16th Int. Symp. PATRAM2010*. London, UK. October 3–8, 2010. Paper No 117.
15. Фрейман Э.С., Щупановский В.Д., Калосин В.М. *Основы безопасности перевозки радиоактивных веществ*. М.: Энергоатомиздат, 1986. 176 с.
16. International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the safe transport of radioactive material. 2009 Edition. *Safety Standard Series* No. TS-R-1. Vienna, 2009.
17. Дьянов Д.Ю., Спиридонов В.Ф., Циберев К.В., Корсакова Е.И., Борляев В.В., Стародубов С.В., Симонов Г.П., Волков А.Ю., Шувалова Е.В., Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С. Пакет программ ЛЮГОС. Модуль решения динамических задач прочности. *Супервычисления и математическое моделирование: Труды XIII международ. семинара*. 3–7 октября, 2011. Саров. С. 208–219.
18. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. М.: Машиностроение, 1968. 400 с.

References

1. Ryabov A.A., Romanov V.I., Sotskov G.I., Skurikhin S.G. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo deformirovaniya transportnogo upakovochnogo komplekta pri avariynykh mekhanicheskikh vozdeystviyakh. *Metody i programmnoe obespechenie raschetov na prochnost'*. *Vtoraya konf.*: Sb. dokl. Gelendzhik, 2002. S. 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. *The WM'03 Conference*. Tucson, AZ. February 23–27, 2003. P. 1–7.
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 No 160.
4. Feldman M.R., Handy K.D. Comparison of analytical and physical testing results for the DPP-2 shipping package. *The 14th Int. Symp. PATRAM-2004*. Berlin, Germany. September 20–24, 2004. Paper No 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. *The 14th Int. Symp. PATRAM-2004*. Berlin, Germany. September 20–24, 2004. Paper No 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. No 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. Bazhenov V.G., Kibets A.I., Kibets Yu.I., Laptev P.V., Ryabov A.A., Romanov V.I., Sotskov G.I. Konechno-elementnyy analiz vysokoskorostnogo udara o pregradu transportnogo upakovochnogo komplekta. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2004. №2. S. 118–125.

9. Il'kaev R.I., Barchenkov A.I., Ryabov A.A., Faykov Yu.I., Shapovalov V.I. i dr. Raschetno-teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya upakovok dlya perevozki vozdušnym transportom svezhego yadernogo topliva energeticheskikh i issledovatel'skikh reaktorov. *Trudy VNIIEF*. Sarov, 2005. Vyp. 8. S. 294–303.
10. Volzke H. et al. Transport and storage cask safety assessment – drop test and numerical calculations. *WM'06 Conf.* Tucson, AZ. February 26 – March 2, 2006. Paper No 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. *The 15th Int. Symp. PATRAM-2007*. Miami, USA. October 21–26, 2007. Paper No 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 Conference*. 2009. Manchester, UK. May 13–14, 2009.
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. *The 16th Int. Symp. PATRAM-2010*. London, UK. October 3–8, 2010. Paper No 32.
14. Qiao L. et al. Numerical simulation of 9 meter drop of a transport and storage cask with aluminium impact limiter. *The 16th Int. Symp. PATRAM2010*. London, UK. October 3–8, 2010. Paper No 117.
15. Freyman E.S., Shechupanovskiy V.D., Kaloshin V.M. *Osnovy bezopasnosti perevozki radioaktivnykh veshchestv*. M.: Energoatomizdat, 1986. 176 s.
16. International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the safe transport of radioactive material. 2009 Edition. *Safety Standard Series* No. TS-R-1. Vienna, 2009.
17. D'yanov D.Yu., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V., Korsakova E.I., Borlyayev V.V., Starodubov S.V., Simonov G.P., Volkov A.Yu., Shuvalova E.V., Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S. Paket programm LOGOS. Modul' resheniya dinamicheskikh zadach prochnosti. *Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie: Trudy XIII mezhdunarodnogo seminara*. 3–7 oktyabrya, 2011. Sarov. S. 208–219.
18. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti*. M.: Mashinostroenie, 1968. 400 s.

NUMERICAL STRESS ANALYSIS OF TUK-109T PACKAGE IN NORMAL AND ACCIDENT CONDITIONS

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

*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

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), developed in Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics.

Keywords: transport package, damping system, normal and accident conditions, combined loading, finite element method, numerical simulation, dynamic stress analysis.