

УДК 539.3

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРИОБЪЕКТОВЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ
РЕАКТОРОВ ТИПА БН ПРИ АВАРИЙНОМ ПАДЕНИИ***

© 2015 г. **Баженов В.Г.¹, Кайдалов В.Б.², Кибец А.И.¹,
Лапшин Д.А.², Фролова И.А.³**

¹*Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация*

³*Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
Чебоксары, Российская Федерация*

kibec@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 03.08.2015

Рассматривается трехмерная геометрически и физически нелинейная задача упругопластического деформирования внутриобъектовых транспортных контейнеров реактора на быстрых нейтронах при аварийном падении на жесткое основание. Для описания деформирования конструкции применяется текущая лагранжева формулировка. Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей работы. В качестве уравнений состояния используются соотношения теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением. Контактное взаимодействие контейнера с жестким основанием описывается условиями непроникания. Решение задачи основано на методе конечных элементов и явной схеме интегрирования по времени типа «крест». Приводятся результаты численного решения. Использование на этапе проектирования конечно-элементного решения рассматриваемой задачи позволило оптимизировать конструкцию контейнера и снизить ее металлоемкость за счет уменьшения необоснованно заложенных запасов прочности при соблюдении условий обеспечения радиационной безопасности.

Ключевые слова: реактор, радиоактивные материалы, транспортный контейнер, аварийное падение, пластические деформации, прочность, метод конечных элементов.

Введение

Современный этап развития атомной энергетики характеризуется повышенными требованиями безопасности, предъявляемыми к объектам использования атомной энергии (ОИАЭ). Особое место на ОИАЭ занимают системы хранения и транс-

* Выполнено при частичном финансировании программой Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8) и РФФИ (грант 15-48-02126-р_поволжье_а).

портирования ядерного топлива вследствие существования потенциальной возможности возникновения аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования при проведении транспортно-технологических операций, что может привести к серьезным радиационным последствиям.

Для транспортировки тепловыделяющих сборок (ТВС) применяют специально разработанные для этого контейнеры, которые входят в состав внутриобъектового транспортного упаковочного комплекта (ВТУК), обеспечивающего ядерную и радиационную безопасность. В конструктивном исполнении контейнер является сложным и дорогостоящим изделием. Он должен отвечать требованиям динамической прочности конструкции, подвергающейся воздействию ударных нагрузок высокой интенсивности, и обладать при этом определенными демпфирующими качествами, позволяющими снижать внешние динамические перегрузки на транспортируемое оборудование.

Анализ публикаций [1] показал, что стратегия оценки прочности и безопасности контейнеров для хранения и транспортировки радиоактивных материалов в настоящее время существенно изменилась в сторону применения численных методов. В частности, в течение последних 15 лет широкое распространение получило применение метода конечных элементов и реализующих его современных компьютерных кодов [2–9].

Авторами настоящей статьи для оценки прочности ВТУК: а) определены возможные сценарии аварий на основании анализа транспортно-технологического тракта; б) построены расчетные и компьютерные модели, отражающие реальные жесткостные и весовые характеристики исследуемых конструкций; в) проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния ВТУК.

1. Определяющая система уравнений и методика решения

Для описания деформирования конструкции применяется текущая лагранжева формулировка [10–12]. Компоненты тензора скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$ определяются в метрике текущего состояния:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{j,i}}{2}, \quad \dot{U}_{i,j} = \frac{\partial \dot{U}_i}{\partial X_j}, \quad X_i = X_i|_{t=0} + \int_0^t \dot{U}_i dt \quad (i, j = \overline{1, 3}), \quad (1)$$

где U – перемещения в общей системе координат X .

В качестве уравнений состояния используются соотношения теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением [13]. Зависимость шаровых компонент скоростей деформаций и напряжений имеет вид:

$$\dot{\epsilon}^V = \frac{\dot{\epsilon}_{11} + \dot{\epsilon}_{22} + \dot{\epsilon}_{33}}{3}, \quad \dot{\sigma}^V = -3K\dot{\epsilon}^V, \quad (2)$$

где K – коэффициент объемного сжатия. Девиаторные составляющие скорости деформации $\dot{\epsilon}'_{ij}$ раскладываются на упругие $\dot{\epsilon}'_{ij}{}^e$ и пластические $\dot{\epsilon}'_{ij}{}^p$ компоненты:

$$\dot{\epsilon}'_{ij} = \dot{\epsilon}'_{ij}{}^e + \dot{\epsilon}'_{ij}{}^p, \quad \dot{\epsilon}'_{11}{}^p + \dot{\epsilon}'_{22}{}^p + \dot{\epsilon}'_{33}{}^p = 0. \quad (3)$$

Девиаторные составляющие тензора напряжений вычисляются с помощью соотношений

$$D_j \sigma'_{ij} = 2G\dot{\epsilon}'_{ij}{}^e, \quad \dot{\epsilon}'_{ij}{}^p = \lambda S_{ij}, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad \dot{\rho}_{ij} = 2g\dot{\epsilon}'_{ij}{}^p,$$

$$S_{ij}S_{ij} \leq \frac{2}{3}\sigma_T^2, \quad \sigma_T = \sigma_T(\kappa, \dot{I}_{2\varepsilon}), \quad \dot{I}_{2\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}}(\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p)^{1/2}, \quad \kappa = \int_0^t \dot{I}_{2\varepsilon} dt. \quad (4)$$

Здесь D_j – производная по Яуманну, G – модуль сдвига, g – модуль кинематического упрочнения, S_{ij} и ρ_{ij} – компоненты тензоров активных напряжений и микронапряжений; σ_T – предел текучести, λ – параметр, тождественно равный нулю при упругом деформировании и определяемый при упругопластическом деформировании из условия прохождения мгновенной поверхности текучести через конец вектора догрузки.

Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей [12]:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_{\Omega} \rho \dot{U}_i \delta \dot{U}_i dV = \int_{\Gamma_q} P_i^q \delta \dot{U}_i d\gamma \quad (i, j = \overline{1, 3}), \quad (5)$$

где ρ – плотность; P_i^q – контактное давление; Ω – исследуемая область; Γ_q – поверхность контакта; $\delta \dot{\varepsilon}_{ij}$, $\delta \dot{U}_i$ – вариации $\dot{\varepsilon}_{ij}$, \dot{U}_i (на поверхности с заданными кинематическими граничными условиями $\delta \dot{U}_i = 0$).

Для оценки динамической прочности ВТУК в качестве критерия состояния принята относительная деформация. Условие целостности конструкции имеет вид:

$$\kappa \leq \varepsilon_{\text{пред}}. \quad (6)$$

В качестве параметра, характеризующего предельное состояние материала, принимается деформация разрушения $\varepsilon_{\text{пред}}$ при испытаниях на растяжение цилиндрического образца, определяемая по относительному сужению Z^T его поперечного сечения в месте разрыва:

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \ln \left(\frac{1}{1 - 0,01 \cdot Z^T} \right). \quad (7)$$

Поскольку образование шейки в цилиндрическом образце при его растяжении характеризуется сложным напряженно-деформированным состоянием, для определения $\varepsilon_{\text{пред}}$ применяется расчетно-экспериментальный подход, основанный на комплексном использовании компьютерного моделирования и натурного эксперимента [14]. Контакт между контейнером и плитой моделируется условиями непроницаемости [15].

Решение определяющей системы уравнений (1)–(7) основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест» [15, 16]. Расчетная область покрывается лагранжевой сеткой из 8-узловых конечных элементов. В узлах сетки определяются перемещения U , скорости \dot{U} и ускорения \ddot{U} в общей системе координат X , используемой для стыковки конечных элементов (КЭ). В каждом элементе вводится локальный прямоугольный базис x , отслеживающий его вращение как жесткого целого пошаговым пересчетом направляющих косинусов его осей. Конечный элемент, в общем случае искаженный, с помощью полилинейного изопараметрического преобразования отображается на куб. Компоненты скорости деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$ в КЭ аппроксимируются линейными функциями:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^0 + \alpha_1 \dot{\varepsilon}_{ij}^1 \xi_1 + \alpha_2 \dot{\varepsilon}_{ij}^2 \xi_2 + \alpha_3 \dot{\varepsilon}_{ij}^3 \xi_3. \quad (8)$$

По аналогии с теорией оболочек, $\dot{\varepsilon}_{ij}^0$ – значения компонент скорости деформаций

в центре КЭ (безмоментные составляющие), а $\dot{\varepsilon}_{ij}^k = \partial \dot{\varepsilon}_{ij} / \partial \xi_k = \text{const}$ ($k = \overline{1, 3}$) – их градиенты (моментные составляющие). Чтобы не завышать сдвиговую жесткость элемента, в (8) учитываются только компоненты $\dot{\varepsilon}_{ij}^k$, соответствующие изгибающим и крутящим моментам в теории оболочек типа Тимошенко [17]. Весовые коэффициенты α_k вводятся для регулирования влияния моментных составляющих скорости деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}^k$ на численное решение ($0 < \alpha_k \leq 1$, $k = \overline{1, 3}$).

Мощность виртуальной работы в каждом конечном элементе выражается через матрицу масс, узловые ускорения и статически эквивалентные узловые силы. Для выполнения интегрирования в уравнении баланса виртуальных мощностей (1) применяются квадратурные формулы. После замены интегрирования по области Ω суммированием по элементам получается дискретный аналог уравнений движения (5):

$$[M]\{\ddot{U}\} = \{F\}, \quad (9)$$

где $[M]$ – диагональная матрица масс; $\{\ddot{U}\}$, $\{F\}$ – векторы, составленные из ускорений узлов КЭ-сетки и результирующих узловых сил в общей системе координат. Система обыкновенных дифференциальных уравнений (9) интегрируется по явной конечно-разностной схеме типа «крест». Шаг интегрирования во времени Δt^{k+1} определяется из условия устойчивости Куранта. Изложенная методика реализована в рамках вычислительной системы «Динамика-3» [18, 19].

2. Результаты численного решения

Общий вид ВТУК показан на рис. 1. Рассмотрены следующие возможные сценарии соударения ВТУК с основанием, отобранные в процессе анализа транспортно-технологических операций: а) падение с высоты 17,5 м (вертикальное положение ВТУК, рис. 2), б) падение с высоты 7,1 м (горизонтальное положение ВТУК, рис. 3), в) падение с высоты 7,1 м (ВТУК наклонен под углом 50° к горизонтальной плоскости, рис. 4).

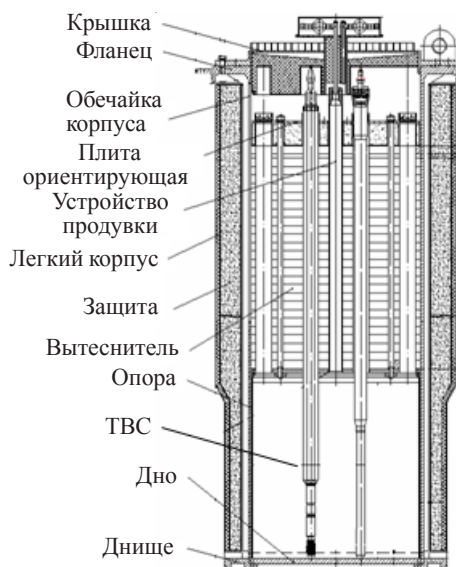


Рис. 1

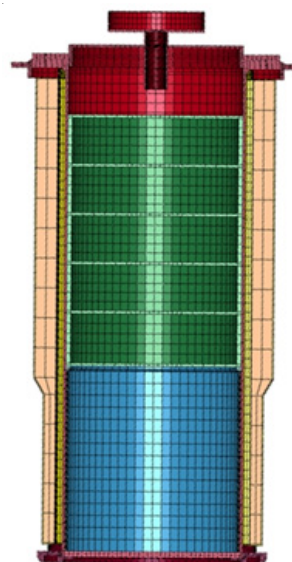


Рис. 2

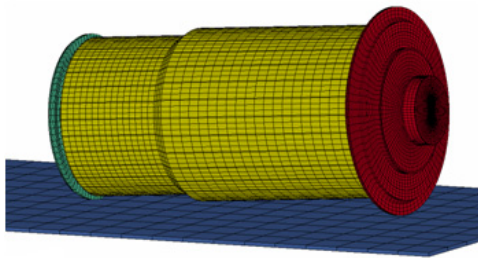


Рис. 3

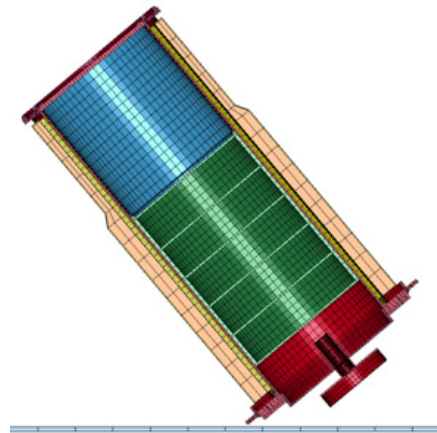


Рис. 4

В качестве конструкционных материалов использованы сталь 08X18H10T (для корпусных элементов), сталь 20X13 (для крепежных элементов). Вытеснитель выполнен из алюминиевого сплава марки АМг6. Основание, на которое падает ВТУК, выполнено из стали Ст3. Деформационные и прочностные характеристики конструкционных материалов приняты по результатам серии динамических экспериментов [20].

Анализ результатов расчетов показал следующее. В первом варианте задачи (см. рис. 2) при отскоке ВТУК от жесткого основания происходит раскрытие основного разъема вследствие разрушения болтового соединения. По результатам серии вычислительных экспериментов было подобрано сечение этих конструктивных элементов, обеспечивающее герметичность ВТУК при аварийном падении. Последующий конечно-элементный анализ установил, что в усовершенствованной конструкции максимальные пластические деформации силового корпуса ВТУК образуются в зоне сопряжения дна с обечайкой корпуса. Вследствие этого происходит закусывание дна корпуса в днище, и днище совершает отскок вместе с ВТУК. Пластические деформации не превышают предельное значение $\epsilon_{\text{пред}}$ и не приводят к разрушению.

Во втором варианте задачи (см. рис. 3) за счет взаимного смещения крышки и корпуса происходит срез болтов. Для разгрузки болтов от срезающего усилия в конструкцию крышки корпуса введен дополнительный конструктивный элемент – опорный бурт. После доработки по результатам расчета было установлено, что пластические деформации образуются в следующих зонах: а) болты крепления крышки с корпусом; б) нижняя часть фланца корпуса в месте контакта ВТУК с основанием; в) легкий корпус в местах контакта с жестким основанием; г) днище; д) силовой корпус ВТУК в зоне сопряжения обечайки корпуса с фланцем. Максимальная величина интенсивности пластических деформаций не превышает предельное значение.

В третьем варианте задачи (см. рис. 4) наиболее нагруженными элементами разъема являются болты крепления крышки с корпусом и фланец корпуса в месте контакта ВТУК с основанием. Пластические деформации, не приводящие к разрушению, образуются в следующих зонах: а) крышка корпуса и фланец в месте контакта с жестким основанием, б) легкий корпус в местах контакта с основанием, в) силовой корпус ВТУК в области сопряжения обечайки корпуса с фланцем.

В процессе численного анализа было выявлено, что толщины стенок основного корпуса ВТУК имеют необоснованный запас прочности. За счет уменьшения толщины стенок удалось снизить металлоемкость конструкции на 20%.

Выводы

Анализ конструкции ВТУК, выполненный на стадии проектирования, позволил выработать рекомендации, направленные на обеспечение радиационной безопасности применительно к ситуациям, связанным с его возможным падением. Использование предварительного полномасштабного 3D конечно-элементного моделирования позволило оптимизировать конструкцию ВТУК и снизить ее металлоемкость за счет уменьшения необоснованно заложенных запасов прочности.

Список литературы

1. Droste B. A survey on 35 years of packaging, transport and storage of radioactive material. *International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013*. Aug. 18–23, 2013. San Francisco. CA. USA. P. 1–10.
2. Кибец А.И., Кибец Ю.И., Матвеев В.З. Численное моделирование динамического деформирования контейнера при аварийном падении на него плиты. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов*. 1997. С. 77–83.
3. 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.
4. Рябов А.Л., Романов В.И., Сотсков Г.И., Скурихин С.Г., Барченков А.И., Моренко А.И. Компьютерное моделирование поведения системы демпфирования защитного контейнера при его падении. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Механика*. 2000. №2. С. 98–102.
5. Ballheimer V., Probst A., Droste B. Numerical assessment of spent fuel casks impacting on real targets. *RAMTRANS*. 2000. V. 11, Nos 1–2. P. 45–51.
6. Quercetti T., Ballheimer V., Wieser G. Analytical, numerical, and experimental investigations on the impact behavior of packagings for the transport of radioactive material under slap down conditions. *Journal of Nuclear Materials Management*. 2002. Vol. 30, Is. 3. P. 18–25.
7. Weber M., Wille F., Ballheimer V., Musolf A. From experiment to appropriate finite element model-safety assessment for ductile cast iron casks demonstrated by means of IAEA puncture drop test. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. 2011. V. 22, No 3. P. 148–153.
8. Zencker U., Weber M., Wille F. Finite element mesh design of a cylindrical cask under puncture drop test conditions. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. 2011. V. 22, No 2. P. 112–116.
9. Lee Y.-S., Ryu C.-H., Kim H.-S., Choi Y.-J. A study on the free drop impact of a cask using commercial FEA codes. *Nuclear Engineering and Design*. 2005. V. 235, No 20. P. 2219–2226.
10. Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И. *Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения*. М.: Наука, 1986. 232 с.
11. Bathe K.-Y. *Finite element procedures*. New Jersey: Upper Saddle River «Prentice Hall», 1996. 1037 p.
12. Баженов В.Г., Гоник Е.Г., Кибец А.И., Шошин Д.В. Устойчивость и предельные состояния упругопластических сферических оболочек при статических и динамических нагружениях. *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55, №1. С. 13–22.
13. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
14. Баженов В.Г., Зефилов С.В., Осетров С.Л., Павленкова Е.В. Совместное физическое

и численное моделирование при изучении деформационных и прочностных свойств упругопластических материалов и конструкций. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Математическое моделирование и оптимальное управление*. 2005. Вып. 1 (28). С. 30–38.

15. Баженов В.Г., Кибец А.И., Цветкова И.Н. Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1995. №2. С. 20–26.

16. Баженов В.Г., Кибец А.И., Петров М.В., Федорова Т.Г., Шошин Д.В., Артемьева А.А. Экспериментально-теоретическое исследование нелинейного деформирования и потери устойчивости оболочек вращения при изгибе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 80–85.

17. *Метод конечных элементов в механике твердых тел*. Под ред. А.С. Сахарова, И. Альтенбаха. Киев: Вища школа; Лейпциг: ФЭБ Фахбухферлаг, 1982. 480 с.

18. Программный продукт «Пакет прикладных программ для решения трехмерных задач нестационарного деформирования конструкций, включающих массивные тела и оболочки, «Динамика-3». Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.МЕ20.Н00338/2000.

19. *Вычислительный комплекс «Динамика-3»*. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013.

20. Брагов А.М., Кадони Э., Крушка Л. Современные методы динамических испытаний материалов. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4(5). С. 2039–2040.

References

1. Droste B. A survey on 35 years of packaging, transport and storage of radioactive material. *International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2013*. Aug. 18–23, 2013. San Francisco. CA. USA. P. 1–10.

2. Kibets A.I., Kibets Yu.I., Matveev V.Z. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo deformirovaniya konteynera pri avariynom padenii na nego plity. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Chislennoe modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh protsessov*. 1997. S. 77–83.

3. 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 upakovnochno komplekta. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2004. №2. S. 118–125.

4. Ryabov A.L., Romanov V.I., Sotskov G.I., Skurikhin S.G., Barchenkov A.I., Morenko A.I. Komp'yuternoe modelirovanie povedeniya sistemy dempfirovaniya zashchitnogo kon-teynera pri ego padeniyakh. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Seriya Mekhanika*. 2000. №2. S. 98–102.

5. Ballheimer V., Probst A., Droste B. Numerical assessment of spent fuel casks impacting on real targets. *RAMTRANS*. 2000. V. 11, Nos 1–2. P. 45–51.

6. Quercetti T., Ballheimer V., Wieser G. Analytical, numerical, and experimental investigations on the impact behavior of packagings for the transport of radioactive material under slap down conditions. *Journal of Nuclear Materials Management*. 2002. Vol. 30, Is. 3. P. 18–25.

7. Weber M., Wille F., Ballheimer V., Musolf A. From experiment to appropriate finite element model-safety assessment for ductile cast iron casks demonstrated by means of IAEA puncture drop test. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. 2011. V. 22, No 3. P. 148–153.

8. Zencker U., Weber M., Wille F. Finite element mesh design of a cylindrical cask under puncture drop test conditions. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. 2011. V. 22, No 2. P. 112–116.

9. Lee Y.-S., Ryu C.-H., Kim H.-S., Choi Y.-J. A study on the free drop impact of a cask using commercial FEA codes. *Nuclear Engineering and Design*. 2005. V. 235, No 20. P. 2219–2226.

10. Pozdeev A.A., Trusov P.V., Nyashin Yu.I. *Bol'shie uprugoplasticheskie deformatsii: teoriya, algoritmy, prilozheniya*. M.: Nauka, 1986. 232 s.

11. Bathe K.-Y. *Finite element procedures*. New Jersey: Upper Saddle River «Prentice Hall», 1996. 1037 p.
12. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Shoshin D.V. Ustoychivost' i predel'nye sostoyaniya uprugoplasticheskikh sfericheskikh obolochek pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzheniyakh. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2014. T. 55, №1. S. 13–22.
13. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami*. M.: Fizmatlit, 2008. 424 s.
14. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Osetrov S.L., Pavlenkova E.V. Sovmestnoe fizicheskoe i chislennoe modelirovanie pri izuchenii deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv uprugoplasticheskikh materialov i konstruksiy. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Seriya Matematicheskoe modelirovanie i optimal'noe upravlenie*. 2005. Vyp. 1 (28). S. 30–38.
15. Bazhenov V.G., Kibets A.I., Tsvetkova I.N. Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov udarnogo vzaimodeystviya deformiruemykh elementov konstruksiy. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 1995. №2. S. 20–26.
16. Bazhenov V.G., Kibets A.I., Petrov M.V., Fedorova T.G., Shoshin D.V., Artem'yeva A.A. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie nelineynogo deformirovaniya i poteri ustoychivosti obolochek vrashcheniya pri izgibe. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2010. Vyp. 72. S. 80–85.
17. *Metod konechnykh elementov v mekhanike tverdyykh tel*. Pod red. A.S. Sakharova, I. Al'tenbakha. Kiev: Vishcha shkola; Leyptsig: FEB Fakhbukhferlag, 1982. 480 s.
18. Programmnyy produkt «*Paket prikladnykh programm dlya resheniya trekhmernykh zadach nestatsionarnogo deformirovaniya konstruksiy, vklyuchayushchikh massivnye tela i obolochki, «Dinamika-3»*». Sertifikat sootvetstviya Gosstandarta Rossii № ROSS RU.ME20.H00338/2000.
19. *Vychislitel'nyy kompleks «Dinamika-3»*. Nauchno-tekhnicheskiiy tsentr po yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti. Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva. Registratsionnyy pasport attestatsii PS № 325 ot 18.04.2013.
20. Bragov A.M., Kadoni E., Krushka L. Sovremennyye metody dinamicheskikh ispytaniy materialov. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. № 4(5). S. 2039–2040.

FINITE-ELEMENT ANALYSIS OF THE PROBLEM OF DEFORMATION OF INTERNAL TRANSPORTATION CONTAINERS OF A FAST NEUTRON REACTOR IN THE EVENT OF AN ACCIDENTAL FALL

Bazhenov V.G.¹, Kaydalov V.B.², Kibets A.I.¹, Lapshin D.A.², Frolova I.A.³

¹*Research Institute of Mechanics of State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*JSC «OKBM Afrikantov», Nizhni Novgorod, Russian Federation*

³*Chuvash State University I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation*

A 3D geometrically and physically nonlinear problem of elastoplastic deformation of internal transportation containers of a fast neutron reactor in the event of an accidental fall on a rigid base is considered. To describe the deformation of the structure, a current Lagrangian formulation is used. The equation of motion is derived from the balance of virtual work capacities. Relations of the theory of flow with kinematic and isotropic hardening are used as equations of state. The contact interaction of the container with a rigid base is described by non-interaction conditions. The problem is analyzed using FEM and an explicit cross-type time-integration scheme. The results of the numerical analysis are presented. The use of the FE-analysis of the considered problem at the design stage made it possible to optimize the design of the container and to reduce its metal consumption by minimizing the unreasonably high design margin of safety, remaining in the framework of radiation safety conditions.

Keywords: reactor, radioactive materials, transportation container, accidental fall, plastic strains, strength, FEM.