

УДК 539.3

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ
ЭЛЕВАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-800
ДЛЯ АВАРИЙНОГО СЛУЧАЯ СХОДА КАРЕТКИ***

© 2018 г. **Брагов А.М.², Константинов А.Ю.², Лапшин Д.А.¹,
Новосельцева Н.А.², Татарский А.М.¹,
Татарский Ю.Н.¹, Ламзин Д.А.²**

¹АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт механики

Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

sigma@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 03.10.2017

Проведен численный анализ динамического деформирования элеватора механизма внутриреакторной перегрузки топливных сборок реакторов на быстрых нейтронах при нештатном сходе каретки с тепловыделяющими сборками по направляющей и ударном взаимодействии ее с преградой. Актуальность работы определяется имевшими место подобными событиями.

Численному анализу предшествовали экспериментальные и теоретические исследования процессов деформирования и разрушения материала, из которого изготовлены элементы элеватора (сталь 10X18H9), в широком диапазоне изменения скоростей деформаций и температур. Полученные экспериментальные данные использовались для построения математической модели поведения материала. Математическая модель верифицировалась на ряде экспериментов.

Расчетный анализ выполнен с использованием модуля динамических расчетов LS-DYNA аттестованного ПК ANSYS. Модуль LS-DYNA предназначен для расчетного анализа сильно нелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики.

Результаты численного моделирования подтверждают выполнение условий динамической прочности элементов элеватора и сохранность находящейся в ней тепловыделяющей сборки.

Ключевые слова: динамические процессы, пластическое деформирование, прочность, моделирование, реактор, тепловыделяющая сборка, элеватор, аварийная ситуация.

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект №16-19-10237 в части результатов динамических испытаний и проект №17-79-20161 в части теоретических исследований).

Введение

Важным аспектом обеспечения безопасности реакторов на быстрых нейтронах является обоснование динамической прочности элементов механизма внутриреакторной перегрузки применительно к постулируемым авариям, связанным с падением каретки элеватора [1–9].

Для внутриреакторной транспортировки радиоактивных материалов в реакторах на быстрых нейтронах (БН) применяют специально разработанные для этого элеваторы. Элеватор предназначен для перемещения сборок активной зоны при перегрузке реактора от активной зоны до каналов перегрузочной машины и обратно. В состав элеватора входят: привод элеватора, пробка, каретка, гильза, направляющая, штанга, цепь, трубы для перемещения цепи и штанги (рис. 1).

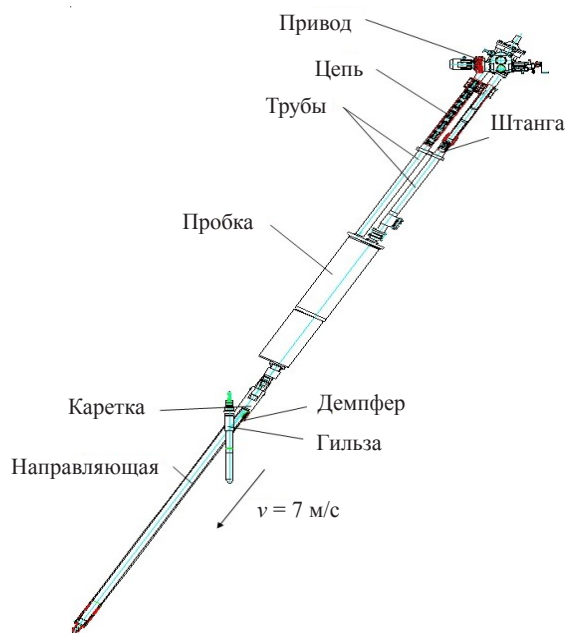


Рис. 1. Общий вид элеватора

Внутриреакторное перегрузочное оборудование входит в состав первого контура. После окончания перегрузки оно из реактора не извлекается и при работе реактора подвергается облучению высокими потоками нейтронов и гамма-частиц. Такие жесткие условия работы и невозможность визуального контроля над процессом перегрузки предъявляют высокие требования к надежности конструкции.

Элеватор должен отвечать требованиям динамической прочности в условиях воздействия ударных нагрузок, обладать определенными демпфирующими качествами, позволяющими снижать динамические перегрузки. При этом конструкция элеватора должна исключать возможность выпадения из него тепловыделяющей сборки (ТВС), а также любые нарушения в ее целостности (герметичности).

Постановка представительных натурных испытаний элеваторов с ТВС при динамических воздействиях затруднена в силу их значительной стоимости. В подобных обстоятельствах особую значимость приобретает возможность отработки конструкции на стадии проектирования путем выполнения расчетных исследований [4, 5].

В настоящей статье для конструкции элеватора механизма внутриреакторной перегрузки топливных сборок реакторов типа БН исследуется случай нештатного схода каретки с ТВС по направляющей, приводящий к взаимодействию каретки с нейтронной подпоркой. Рассматривается соударение каретки элеватора с жестким основанием со скоростью $v = 7$ м/с, что соответствует случаю схода каретки по направляющей с высоты не более 5,355 м.

Расчетный анализ аварии, связанной с падением, выполнен с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA [10–12].

Экспериментальное обеспечение проведения расчетов

Степень достоверности результатов численного моделирования процесса деформирования при соударении во многом определяется качеством математических моделей, адекватно описывающих влияние условий нагружения (скорость деформации и температура) на диаграммы деформирования конструкционных материалов. В качестве конструкционного материала элементов каретки элеватора и демпфера используется коррозионностойкая сталь аустенитного класса 10X18H9. В расчете использованы результаты экспериментальных исследований стали 10X18H9 при растяжении и сжатии при различных скоростях деформации и температурах [9]. Скорости деформации варьировались от 0,001 до 1500 с⁻¹, температуры – от 20 до 350 °С.

Для определения характеристик исследуемой стали при динамическом нагружении использовался метод Кольского и его модификации (в том числе схема Николаса для проведения экспериментов на динамическое растяжение). В [13] показано, что погрешность метода Кольского в определении напряжения не превышает 7%, а деформации образца не превышает 6%.

Исследованный материал (сталь 10X18H9) показал положительную чувствительность предела текучести к росту скорости деформации и отрицательную чувствительность к повышению температуры. Динамическая диаграмма деформирования (~1000 с⁻¹) оказалась на 8% выше статической кривой (по пределу текучести).

По результатам экспериментальных исследований деформирования стали 10X18H9 при статическом и динамическом нагружениях были определены параметры нескольких модификаций модели Джонсона – Кука из библиотеки LS-DYNA [14–17]. Влияние скорости деформации наилучшим образом описывается уравнением в форме Купера – Саймондса [17]. Используемая модель определяет радиус поверхности текучести как функцию деформации, скорости деформации и температуры и имеет следующий вид:

$$\sigma_{JC} = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}^*}{C} \right)^{1/p} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right),$$

где ϵ_p – эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ – безразмерная скорость пластической деформации ($\dot{\epsilon}_0 = 1,0$ с⁻¹); T_0 – начальная температура материала; T – текущая температура материала; T_m – температура плавления материала; A, B, n, C, p, m – постоянные материала.

Параметры модели определялись в ходе решения оптимизационной задачи [18]. На рис. 2 приведены кривые деформирования, рассчитанные в соответствии с этой моделью (сплошные линии), а также экспериментальные диаграммы деформирования

(маркеры), полученные при разных условиях нагружения. На рисунке обозначено: 1 – $0,001 \text{ с}^{-1}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$, $150 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$, $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

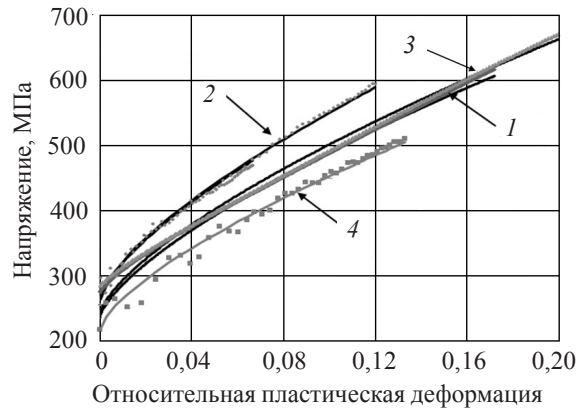


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные кривые деформирования

Для верификации модели деформирования использовались эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями в образцы из исследуемого материала [18, 19], а также эксперименты на высокоскоростное сжатие образцов в направлении диаметра [20].

Результаты сравнения отпечатков инденторов и форм образцов-таблеток, полученных в натурном и численном экспериментах, приводятся на рис. 3. Относительная погрешность расчетного предсказания диаметра отпечатка в случае использования конического индентора составила 2,0%, для сферического индентора 0,4%, в случае с диагональным сжатием образцов относительная погрешность не превысила 9%.

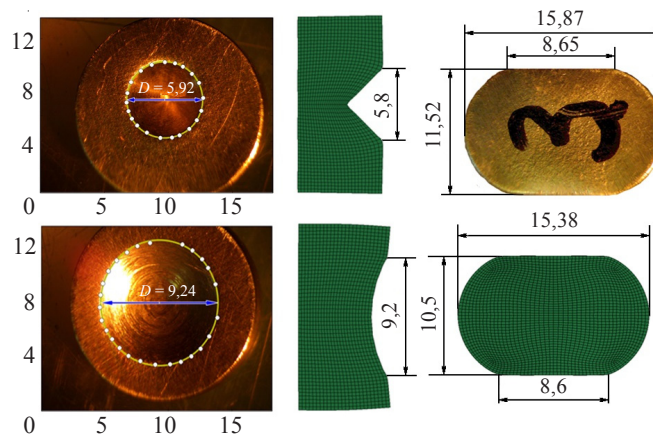


Рис. 3. Сравнение характерных размеров образца после нагружения

Кроме того, для оценки точности численного моделирования в условиях анализа реальной конструкции решена задача удара поршня по демпферу (рис. 4), используемому в предохранительном устройстве DN150. Удар реализуется при аварийном срабатывании предохранительного устройства в составе трубопровода 1-го контура. Демпфер изготовлен из свинца массой 0,56 кг и механическими характеристиками: модуль упругости $E = 0,15 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,24$;

плотность $\rho = 11340 \text{ кг/м}^3$, предел текучести $R_{p0,2}^T = 11 \text{ МПа}$, тангенциальный коэффициент $E_{TAN} = 10^8 \text{ Па}$. Поршень изготовлен из стали 08X18H10T массой 6,4 кг, имеет следующие механические характеристики: модуль упругости $E = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; предел текучести $R_{p0,2}^T = 196 \text{ МПа}$; тангенциальный коэффициент $E_{TAN} = 10^9 \text{ Па}$. Поверхность опирания демфера неподвижна и изготовлена из того же материала, что и поршень. Скорость поршня на момент соударения с демфером 13,2 м/с. В силу наличия циклической симметрии задача решалась для части поршня (см. рис. 4).

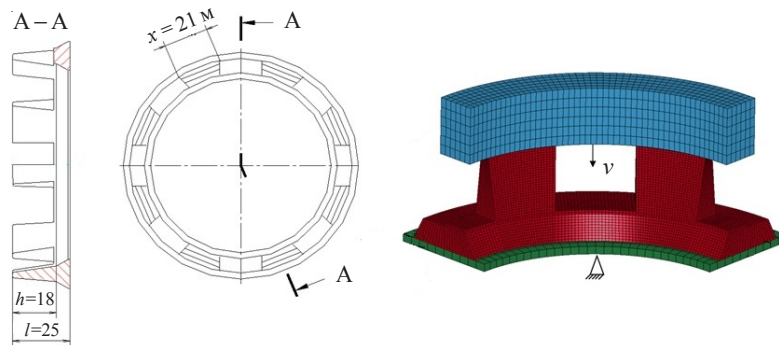


Рис. 4. Демпфер и конечно-элементная модель

На рис. 5 показано сравнение формы демфера, полученной в эксперименте, с расчетной формой.

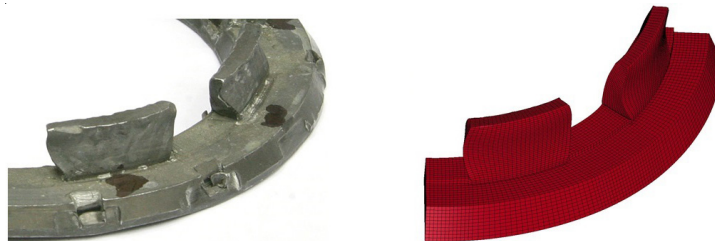


Рис. 5. Сравнение остаточной формы демфера, полученной в эксперименте (слева), с расчетной формой (справа)

Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований позволило сделать вывод о достаточной достоверности и точности построенной математической модели поведения стали 10X18H9 при решении задач динамического деформирования (таблица 1).

Таблица 1

Параметр	Эксперимент	Расчет	Расхождение
Ширина зубца демфера, мм	25,56	25,12	1,8%
Высота зубца демфера, мм	11,50	11,43	0,6%
Высота демфера, мм	18,11	17,81	1,7%

Модель элеватора и результаты моделирования

Исходя из особенностей конструкции и условий нагружения, была разработана расчетная модель элеватора (рис. 6).

Расчетную модель элеватора характеризуют следующие параметры:

- весовые нагрузки, действующие на элементы элеватора;
- начальная скорость, с которой движутся элементы элеватора, $v = 7 \text{ м/с}$;
- контактное взаимодействие частей элеватора с трением.

Конечно-элементная модель создана в ANSYS/LS DYNA с использованием восьмиузловых 3D-элементов SOLID 164. Количество элементов 180000.

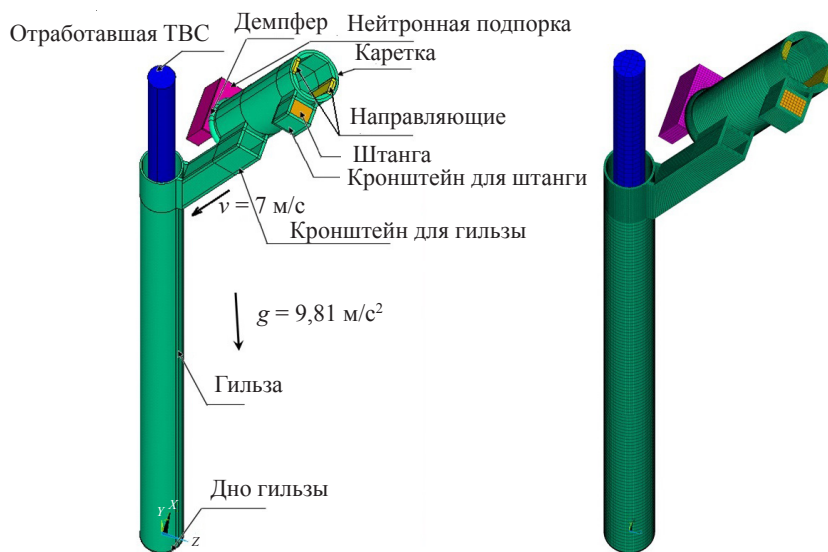


Рис. 6. Общий вид расчетной модели (слева) и конечно-элементная модель (справа)

Предварительный расчетный анализ конструкции показал, что наиболее нагруженными элементами элеватора являются демпфер, кронштейн для штанги и кронштейн для гильзы.

Процесс схода каретки можно условно разделить на два этапа:

а) на первом этапе происходит соударение демпфера каретки с нейтронной подпоркой;

б) на втором этапе происходит отскок каретки, сопровождающийся колебаниями гильзы с находящейся в ней ТВС.

На первом этапе за счет упругопластического деформирования демпфера происходит гашение кинетической энергии каретки, при этом в демпфере имеют место максимальные ускорения, напряжения и деформации. В процессе соударения демпфера каретки с нейтронной подпоркой происходит гашение значительной части кинетической энергии, но часть ее передается на гильзу с находящейся в ней ТВС.

На втором этапе происходит отскок каретки и колебание гильзы с находящейся в ней ТВС, которая совершает хаотичные колебательные движения (биение) в пределах кольцевого зазора, и поступательное движение вдоль гильзы после отскока от дна.

Картина напряженно-деформированного состояния подвижной части элеватора после соударения демпфера каретки о нейтронную подпорку показана на рис. 7.

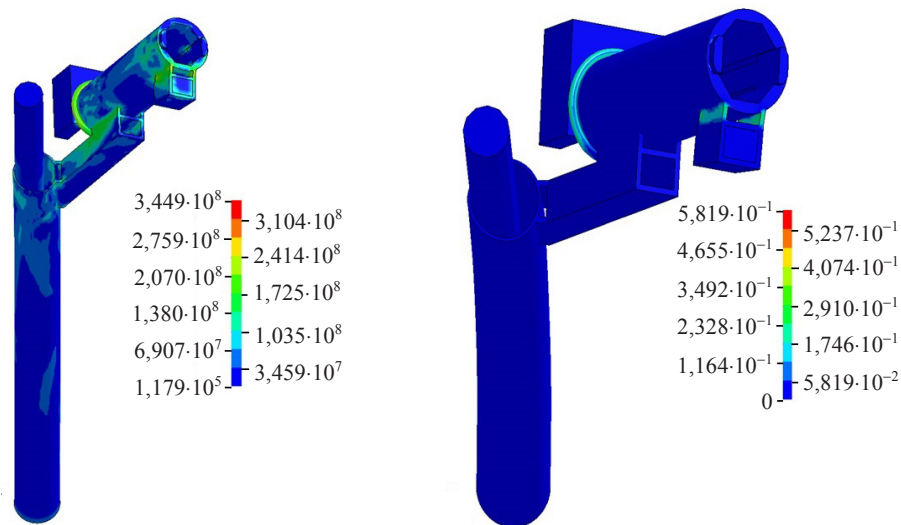


Рис. 7. Распределение интенсивности напряжений (слева, Па) и пластической деформации (справа) в расчетной модели

В качестве основного критерия состояния элеватора и его элементов принималась относительная деформация. Условие динамической прочности определялось соотношением:

$$\epsilon \leq [\epsilon],$$

где ϵ – относительная динамическая деформация, полученная в результате расчета; $[\epsilon] = 59\%$ – допускаемая относительная деформация, определяемая по результатам экспериментов на растяжение по формуле: $[\epsilon] = \ln(100/(100 - \psi))$, ψ – относительное сужение после разрыва.

В результате проведенного анализа напряженно-деформированного состояния подвижной части элеватора установлено, что демпфер практически полностью гасит кинетическую энергию каретки при ее сходе по направляющей. При этом наибольшая величина относительной пластической деформации ϵ в демпфере достигает значения 58%, а уменьшение его высоты составляет 18 мм. Кроме демпфера, наиболее нагруженными элементами элеватора являются кронштейн крепления штанги (пластические деформации $\epsilon = 35\%$), кронштейн крепления гильзы ($\epsilon = 13\%$) и доннышко гильзы в месте контакта с ТВС ($\epsilon = 26\%$). Во всех рассмотренных случаях условие динамической прочности конструкции выполняется, поскольку действующие деформации не превышают допустимых. При этом зоны пластического деформирования в элементах элеватора имеют явно выраженный локальный характер. Следует отметить, что в зоне контакта ТВС с дном гильзы возникает локальная пластическая деформация, которая не приводит к разрушению гильзы и выпадению ТВС. Высота отскока ТВС (при ее длине 3,5 м) от дна гильзы не превышает 120 мм.

Полученные результаты подтверждают выполнение условий динамической прочности элементов элеватора и сохранность находящейся в ней ТВС.

Заключение

Проблема обеспечения прочности и целостности оборудования ядерных энергетических установок при динамических воздействиях при обосновании безопас-

ности является весьма актуальной. Реализованный в работе комплексный подход к выполнению расчетного анализа аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования, включает в себя:

- определение реальных сценариев постулируемых аварий на основании анализа конструкции транспортно-технологического тракта;
- построение расчетных моделей исследуемых конструкций, отражающих реальные жесткостные и весовые характеристики, обеспечивающих получение достоверных результатов;
- использование современных высокопроизводительных аттестованных конечно-элементных вычислительных комплексов расчета напряженно-деформированного состояния и прочности конструкций объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), позволяющих учитывать интенсивные воздействия ударного характера;
- выполнение нормативных требований безопасности, предъявляемых к ОИАЭ, содержащих радиоактивные материалы, применительно к случаям постулирования их аварийных падений.

Использование такого подхода позволяет решать целый класс задач, связанных с падением оборудования и обоснованием динамической прочности различных конструкций ОИАЭ, и на этой основе избежать дорогостоящих натурных испытаний, что способствует повышению конкурентоспособности изделий за счет снижения их себестоимости.

Список литературы

1. НП-061-05. *Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии*. М., 2005. 10 с.
2. Баженов В.Г., Кайдалов В.Б., Кибец А.И., Лапшин Д.А., Фролова И.А. Конечно-элементное решение задачи деформирования внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН при аварийном падении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77. №3. С. 266–273.
3. Виленский О.Ю., Константинов А.Ю., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г., Пристром С.А. Расчетный анализ прочности катковых опор при падении балки перекрытия на корпус реактора БН-600. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 359–367.
4. Тимофеев А.В., Кайдалов В.Б., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г. Применение расчетного комплекса ANSYS/LS DYNA в анализе аварий, связанных с падением оборудования ЯЭУ. *Технически науки: Сб. тез. докл. XIV Нижегородской сессии молодых ученых. 15–19 февр. 2009 г.* Н. Новгород: Нижегородский НИЦ, 2009. С. 86.
5. Кайдалов В.Б., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г. Моделирование ударных процессов при проектировании оборудования обращения с топливом реакторных установок типа БН. *Молодежь в науке: Аннот. докл. VIII научно-технической конференции*. Саров, 2009.
6. 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.
7. 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. Вып. 55. С. 77–83.
8. Рябов А.А., Романов В.И., Сотсков Г.И., Скурихин С.Г., Барченков А.И., Моренко А.И. Компьютерное моделирование поведения системы демпфирования защитного контейнера при его падениях. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Механика*. 2000. №2. С. 98–102.

9. Лапшин Д.А. Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением: *Дисс... канд. техн. наук.* Н. Новгород, 2015. 222 с.
10. *LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 970.* Livermore Software Technology Corporation. 2003.
11. *Программный комплекс ANSYS.* Аттестационный паспорт программного средства №327 от 18.04.2013.
12. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theoretical Manual.* Livermore Software Technology Corporation. 1998.
13. Брагов А.М. Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации 10^2 – 10^5 с⁻¹: *Дисс.... докт. техн. наук.* Нижний Новгород, 1998. 329 с.
14. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic.* The Hague, Netherlands. 1983. P. 541–547.
15. Huh H., Kang W.J. Crash-worthiness assessment of thin-walled structures with the high-strength steel sheet. *International Journal of Vehicle Design.* 2002. Vol. 30. No 1-2. P. 1–21. DOI: 10.1504/IJVD.2002.002022.
16. Allen D.J., Rule W.K., Jones S.E. Optimizing material strength constants numerically extracted from Taylor impact data. *Experimental Mechanics.* 1997. Vol. 37. No 3. P. 333–338.
17. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams. *Applied Mathematics Report No 28.* Providence. Brown University. 1957. 50 p.
18. Константинов А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: *Дисс... канд. техн. наук.* Нижний Новгород, 2007. 144 с.
19. Брагов А.М., Balandin V.V., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Vorobtsov I.V., Kuznetsov A.V., Savenkov G.G. High-rate deformation and spall fracture of some metals. *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 197. P. 260–269.
20. Брагов А.М., Igunnov L.A., Kaidalov V.B., Konstantinov A.Yu., Lapshin D.A., Lomunov A.K., Mitenkov F.M. Experimental study and mathematical modeling of the behavior of St3, 20Kh13 and 08Kh18N10T steels in wide ranges of strain rates and temperatures. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2015. Vol. 56. No 6. P. 977–983.

References

1. *НП-061-05. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии [NP-061-05 Safety Rules for Storage and Transportation of Nuclear Fuel at the Objects of use of Atomic Energy].* Moscow. 2005. 10 p. (In Russian).
2. Bazhenov V.G., Kaydalov V.B., Kibets A.I., Lapshin D.A., Frolova I.A. Konechno-elementnoe reshenie zadachi deformirovaniya vnutriob'ektovykh transportnykh konteynerov reaktorov tipa BN pri avariynom padenii [Finite-element analysis of the problem of deformation of internal transportation containers of a fast neutron reactor in the event of an accidental fall]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity].* 2015. Vol. 77. No 3. P. 266–273 (In Russian).
3. Vilensky O.Yu., Konstantinov A. Yu., Lapshin D.A., Malygin M.G., Pristrom S.A. Raschetnyy analiz prochnosti katkovykh opor pri padenii balki perekrytiya na korpus reaktora BN-600 [Computational analysis of roller supports strength under roof slab block drop on the BN-600 reactor]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity].* 2016. Vol. 78. No 4. P. 359–367 (In Russian).
4. Timofeev A.V., Kaydalov V.B., Lapshin D.A., Malygin M.G. Primenenie raschetnogo kompleksa ANSYS\LS DYNA v analize avari, svyazannykh s padeniem oborudovaniya YaEU [The use of the computational package ANSYS\LS-DYNA in the analysis of accidents related to fall of NPP equipment]. *Tekhnicheskie nauki: Sbornik tezisov dokladov XIV Nizhegorodskoy sessii molodykh uchenykh. 15–19 fevr. 2009 g. [Engineering: XIV Nizhny Novgorod Session of Young Scientists. 15–19 February 2009. The Book of Abstracts].* Nizhni Novgorod. Nizhegorodskiy nauchno-informatsionnyy tsentr Publ. 2009. P. 86 (In Russian).

5. Kaydalov V.B., Lapshin D.A., Malygin M.G. Modelirovanie udarnykh protsessov pri proektirovani oborudovaniya obrashcheniya s toplivom reaktornykh ustanovok tipa BN [Modeling of shock processes in the engineering of the equipment for fuel handling reactor type BN]. *Molodezh v nauke: Annotatsii dokladov VIII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Youth in Science: VIII Scientific-Technical Conference. Abstracts]. Sarov. 2009 (In Russian).
6. 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 upakovchnogo komplekta [Finite element analysis of high-speed impact on the barrier transport packaging]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2004. No 2. P. 118–125 (In Russian).
7. Kibets A.I., Kibets Yu.I., Matveev V.Z. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo deformirovaniya konteynera pri avariynom padenii na nego plity [Numerical simulation of dynamic deformation of the container when an emergency fall on his plate]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Chislennoe modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh protsessov* [Applied Problems of Strength and Plasticity. Numerical Simulation of Physico-Mechanical Processes]. 1997. Iss. 55. P. 77–83 (In Russian).
8. Ryabov A.A., Romanov V.I., Sotskov G.I., Skurikhin S.G., Barchenkov A.I., Morenko A.I. Kompyuternoe modelirovanie povedeniya sistemy dempfirovaniya zashchitnogo konteynera pri ego padeniyakh [Computer simulation of the behavior of the system damping protective container when it drops]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Seriya Mekhanika* [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Series Mechanics]. 2000. No 2. P. 98–102 (In Russian).
9. Lapshin D.A. Raschetno-eksperimentalnyy analiz prochnosti vnutriob'ektovykh transportnykh konteynerov reaktorov tipa BN v avariynykh s padeniem [Numerical and experimental analysis of durability of indoor transport of containers of type BN reactors in accidents with falling] *Diss... kand. tekhn. nauk* [Cand. Sci. (Engineering). Dissertation]. Nizhni Novgorod. 2015. 225 p. (In Russian).
10. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 970. Livermore Software Technology Corporation. 2003.
11. Programmnyy kompleks ANSYS [The Software Package ANSYS]. Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva №327 ot 18.04.2013 [Attestation passport software No 327 from 18.04.2013] (In Russian).
12. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation. 1998.
13. Bragov A.M. Eksperimentalnyy analiz protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov pri skorostyakh deformatsii 10^2 – 10^5 s⁻¹ [Experimental analysis of processes of deformation and fracture of materials under strain rates of 10^2 – 10^5 s⁻¹]. *Diss.... dokt. tekhn. nauk* [D. Sci. (Engineering). Dissertation]. Nizhni Novgorod. 1998. 329 p. (In Russian).
14. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic*. The Hague. Netherlands. 1983. P. 541–547.
15. Huh H., Kang W.J. Crash-worthiness assessment of thin-walled structures with the high-strength steel sheet. *International Journal of Vehicle Design*. 2002. Vol. 30. No 1-2. P. 1–21. DOI: 10.1504/IJVD.2002.002022.
16. Allen D.J., Rule W.K., Jones S.E., Optimizing material strength constants numerically extracted from Taylor impact data. *Experimental Mechanics*. 1997. Vol. 37. No 3. P. 333–338.
17. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams: *Applied Mathematics Report No 28*. Providence. Brown University. 1957. 50 p.
18. Konstantinov A.Yu. Eksperimentalno-raschetnoe issledovanie povedeniya konstruktsionnykh materialov pod deystviem dinamicheskikh nagruzok [Experimental and computational study of the behavior of structural materials under dynamic loads]. *Diss... kand. tekhn. nauk* [Cand. Sci. (Engineering). Dissertation]. Nizhni Novgorod. 2007. 144 p. (In Russian).
19. Bragov A.M., Balandin V.V., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Vorobtsov I.V., Kuznetsov A.V., Savenkov G.G. High-rate deformation and spall fracture of some metals. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 197. P. 260–269.

20. Bragov A.M., Igumnov L.A., Kaidalov V.B., Konstantinov A.Yu., Lapshin D.A., Lomunov A.K., Mitenkov F.M. Experimental study and mathematical modeling of the behavior of St3, 20Kh13 and 08Kh18N10T steels in wide ranges of strain rates and temperatures. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015. Vol. 56. No 6. P. 977–983.

**A SYSTEM APPROACH FOR STRENGTH PROBLEM SOLUTION
OF THE BN-800 REACTOR PLANT ELEVATOR
FOR AN EMERGENCY CASE OF CARRIAGE RUNNING-OFF**

**Bragov A.M.², Konstantinov A.Yu.², Lapshin D.A.¹,
Novoseltseva N.A.², Tatarsky A.M.¹, Tatarsky Yu.N.¹, Lamzin D.A.²**

¹*JSC "OKBM Afrikantov", Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The paper considers numerical analysis of dynamic deformation of the elevator of the in-reactor fuel assembly handling mechanism of BN-type reactors in the case of abnormal running-off of a carriage with a fuel assembly along a guide and impact interaction of this carriage with a barrier. The urgent character of the paper is determined by such type occurred events.

Numerical analysis was preceded by experimental and theoretical studies of deformation and rupture processes of 10Cr18Ni9 steel, which is the material used for manufacture of elevator elements. The processes were studied in a wide range of variations of deformation rates and temperatures. The obtained experimental data were used to build a mathematical model of material behavior. The mathematical model was verified by a number of experiments.

Design analysis was made using the LS-DYNA dynamic analysis module of the certified ANSYS program complex. The LS-DYNA module is intended for design analysis of high-non-linear dynamic processes by means of the explicit scheme of integration of dynamic equations.

The results of numerical simulation confirm fulfillment of strength conditions elevator elements and integrity of fuel assembly being in it.

Keywords: dynamic processes, plastic deformation, strength, simulation, reactor, fuel assembly, elevator, emergency.