

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В ГИЛЬЗЕ ЭЛЕВАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-800, ПРИ АВАРИЙНОМ СЛУЧАЕ ВО ВРЕМЯ ВНУТРИРЕАКТОРНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ

А. В. Рябцов, Д. А. Лапшин, А. М. Татарский

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

Введение

Современные требования по обеспечению безопасности конструкций систем обращения с ядерными материалами сводятся к необходимости обеспечения их механической прочности, достаточной для сохранения герметичности во время выполнения транспортно-технологических операций [1]. На этапе проектирования указанная задача сводится к всесторонним исследованиям возможных проектных аварий и связанных с ними последствий.

Важным аспектом обеспечения безопасности реакторов на быстрых нейтронах является обоснование динамической прочности тепловыделяющих сборок (ТВС) применительно аварийным ситуациям на оборудовании внутриреакторной транспортировки.

Для внутриреакторной транспортировки радиоактивных материалов в реакторах типа БН применяются специально разработанные для этого элеваторы, к которым предъявляются повышенные требования безопасности. Например, элеватор должен отвечать требованиям динамической прочности в условиях воздействия ударных нагрузок высокой интенсивности, обладать определенными демпфирующими качествами, позволяющими снижать внешние динамические перегрузки. При этом конструкция элеватора должна исключать возможность выпадения из него ТВС, а также любые нарушения в его положении при работе с ядерным топливом.

Выполнение подобных требований обеспечивается в основном за счет сохранения целостности (герметичности) ТВС и отсутствия в ней недопустимого формоизменения. Постановка представительных натурных испытаний элеваторов с ТВС при динамических воздействиях затруднено как в силу их значительной стоимости, так и неочевидности получения представительных результатов при ограниченном числе таких испытаний.

В подобных обстоятельствах особую значимость приобретает возможность отработки конструкции на стадии проектирования путем выполнения представительных расчетных исследований [2, 3]. Подобный анализ, связанный с исследованием высоконелинейных динамических процессов деформирования металла, стал возможен в последнее время благодаря исследованиям процессов деформирования

и разрушения твердых тел в условиях интенсивных динамических нагрузок и разработке на этой основе соответствующих математических моделей и вычислительных комплексов типа ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS и т. д. Реализуемое в подобных программных комплексах полномасштабное математическое 3D-моделирование позволяет выполнять достаточно глубокий и детальный анализ динамических процессов, сократив и удешевив на этой основе сроки проектирования [2–6].

Описание конструкции

В данной статье исследуется напряженно-деформированное состояние (НДС) ТВС, находящейся в гильзе элеватора реактора БН-800, в случае нештатного схода каретки с ТВС по направляющей, приводящего к ее ударному взаимодействию с преградой. Актуальность работы определяется имевшим место подобными событиями.

Элеватор (рис. 1) 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.

Внутриреакторное перегрузочное оборудование реакторов типа БН входит в состав первого контура и обеспечивает его герметизацию. После окончания перегрузки оно из реактора не извлекается и при работе реактора на мощности подвергается облучению высокими нейтронными и гамма потоками. Такие жесткие условия работы и невозможность визуального контроля над процессом перегрузки, предъявляют высокие требования к надежности данной конструкции.

Рассматривается соударение каретки элеватора с жестким основанием при сходе каретки по направляющей с высоты не более $h = 5355$ мм со скоростью $v = 7$ м/с.

Расчетный анализ аварии, связанной с падением выполнен с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA [7].

Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA верифицирован. Для верификации ПК ANSYS/LS-DYNA были решены следующие группы задач:

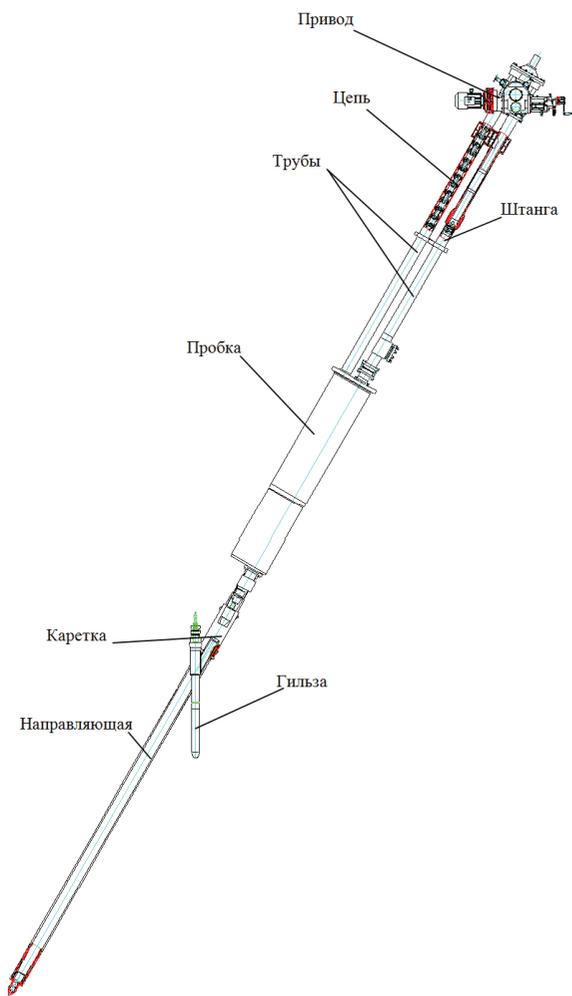


Рис. 1. Общий вид элеватора

– сравнительный анализ результатов расчета по программе ANSYS/LS-DYNA с аналитическими

решениями. Рассматривались аналитические решения, как в квазистатической постановке, так и с учетом возникновения и распространения с конечной скоростью волны напряжений и деформаций в ударяемых конструкциях;

– сравнительный анализ результатов расчета по программе ANSYS/LS-DYNA с результатами экспериментов.

Для анализа прочности ТВС в случае нештатного схода каретки элеватора по направляющей использовалась модель, представленная на рис. 2.

ТВС состоит из трех основных частей: головки, средней части и хвостовика.

Головка предназначена для организации выхода натрия, размещения дистанционирующих платиков, для сцепления ТВС с устройствами системы перегрузки и транспортно-технологического тракта при загрузке и выгрузке ТВС.

Средняя часть представляет собой шестигранную трубу из ферритно-мартенситной стали ЭП-450, к торцам которой приварены головка и переходник. К переходнику на резьбе крепится хвостовик. Внутри шестигранной трубы размещены один над другим пучок теплоделяющих элементов (ТВЭЛ) и пучок поглощающих элементов (ПЭЛ). ТВЭЛы в пучке дистанционируются навитой на них проволокой. Круглой на центральных ТВЭЛх, профильной (овальной) – на периферийных ТВЭЛх.

Хвостовик предназначен для установки ТВС вертикально в гнездо коллектора и обеспечения заданного расхода натрия через каждую ТВС, в зависимости от ее места расположения в реакторе.

В реакторе ТВС дистанционируются с соседними сборками активной зоны при помощи шестигранного выступа в нижней части головки (платики). В исходном состоянии между сборками на уровне платиков существует зазор [8].

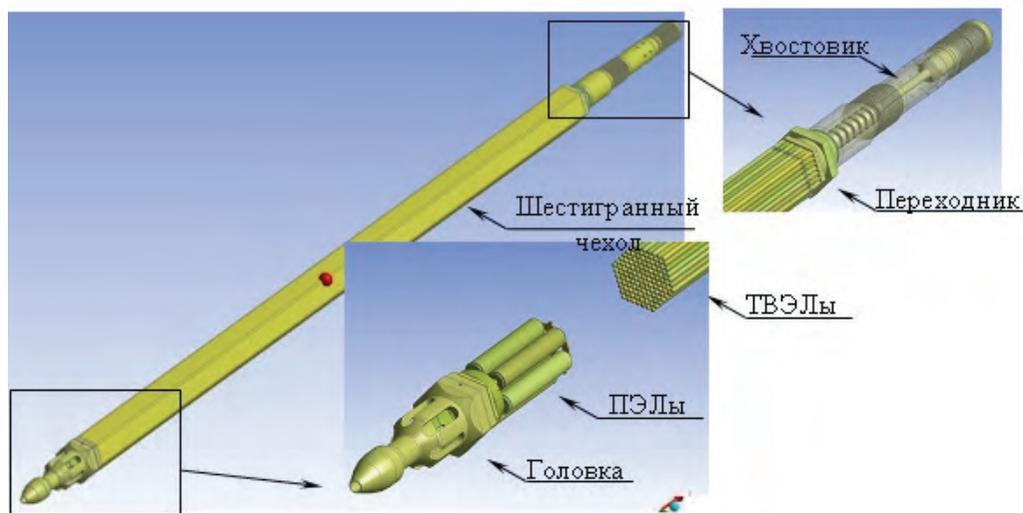


Рис. 2. Общий вид ТВС

Методика построения и описание расчетной модели

Полная расчетная модель, состоящая из модели элеватора и ТВС, показана на рис. 3.

Расчетный анализ прочности элеватора при аварийном сходе каретки проводился на предыдущем этапе работы [9]. При оценке прочности элеватора моделировался только макет ТВС с сохранением массы и габаритов. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов элеватора показал, что условия динамической прочности конструкции выполняется, поскольку действующие деформации не превышают предельных.

Расчетная модель ТВС (рис. 4) выполнялась с использованием модуля динамических расчетов LS-DYNA аттестованного в Ростехнадзоре ПК ANSYS [10], основанного на методе конечных элементов (КЭ).

Исходя из имеющихся требований в ПК ANSYS/LS-DYNA к размеру и количеству конечных элементов, из особенностей конструкции и условий нагружения, строилась расчетная конечно-элементная 3D модель ТВС. При разработке КЭ модели выполнена дискретизация КЭ сетки. Размер гексаэдрических элементов подбирался в соответствии с особенностями геометрии конструкции и особенностями условий нагружения.

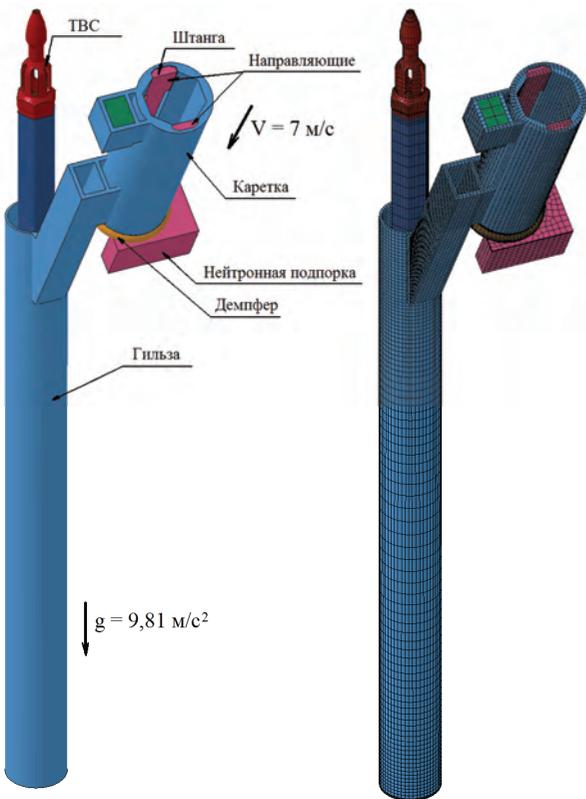


Рис. 3. Общий вид расчетной модели

В зонах концентрации напряжений выполнено сгущение сетки. КЭ модель ТВС состоит из 210000 конечных элементов. Общая КЭ модель, состоящая из элеватора и ТВС – из 250000 конечных элементов.

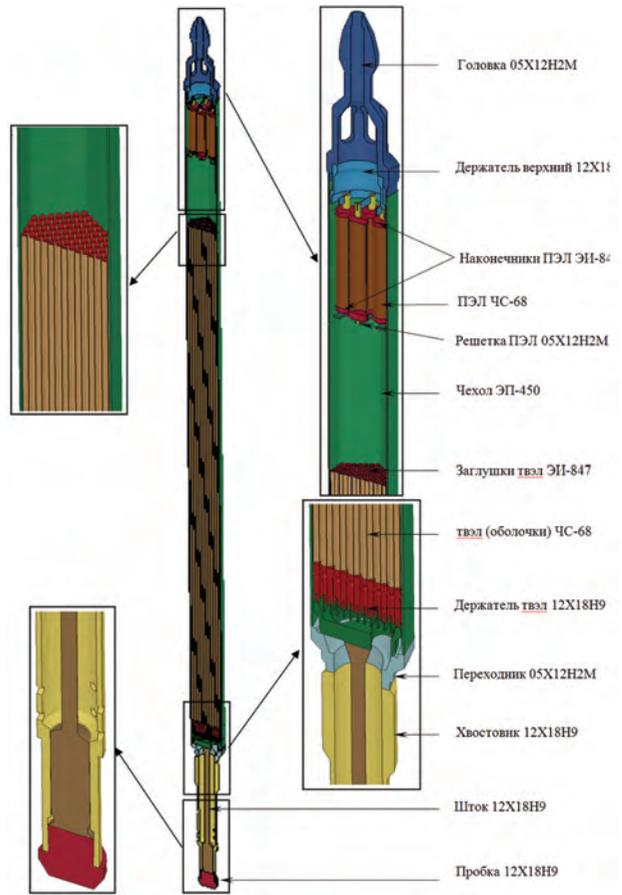


Рис. 4. Расчетная модель ТВС

При построении расчетной модели основным критерием являлось наиболее полное отражение жесткостных и весовых характеристик элементов ТВС, учет взаимодействия различных элементов в процессе деформирования:

- элементы, не влияющие на прочность и жесткость конструкций, не моделировались, но с целью сохранения весовых характеристик конструкций реактора были учтены путем увеличения плотности материала внутрикорпусных элементов;

- элементы, участвующие в процессе деформирования, смоделированы в соответствии с реальной геометрией;

- дистанционирование твэл проволочной навивкой моделировалось введением в модель дистанционирующих решеток с толщиной и шагом соответствующими конфигурации проволочной навивки;

- элементы, вносящие вклад в общую жесткость конструкции, но прямое моделирование которых связано со значительными сложностями или нецелесообразно, смоделированы по критерию эквивалентной жесткости;

- каждая из составляющих конструкции смоделирована как отдельная часть; между частями заданы контактные задачи, учитывающие как статический, так и динамический коэффициенты трения; тип контакта задавался таким образом, что учитывалось не только взаимодействие контактных пар, но и формо-

изменение тела, когда отдельные его области начинают взаимодействовать между собой.

В качестве кинематических граничных условий принималось:

– начальная скорость, приложенная ко всем элементам (кроме абсолютно жестких тел), развиваемая к моменту соударения с жестким основанием $v = 7 \text{ м/с}$;

– ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Для данной модели ТВС проводилась верификация по результатам экспериментально-математического анализа деформирования макетов при падении [8].

Сравнительный анализ результатов расчета НДС макетов ТВС в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA с результатами эксперимента (имитация аварийного падения) позволил сделать вывод о достоверности и точности модели ТВС. Таким образом, можно сделать вывод о применимости данной модели для анализа НДС и прочности исследуемой конструкции.

Экспериментальное исследование и математическое моделирование конструкционных материалов

В случае высокоскоростного динамического нагружения, сопровождающегося значительным пластическим деформированием, необходимо иметь действительные диаграммы деформирования. Действительные диаграммы получаются на основе расчетно-экспериментальных исследований путем определения параметров математической модели деформирования материалов.

Степень достоверности результатов численного моделирования процесса деформирования в процессе соударения во многом определяется качеством математических моделей, адекватно описывающих влияние условий нагружения на диаграммы деформирования конструкционных материалов.

В качестве конструкционного материала держателя верхнего, держателя твэл, хвостовика, штока и пробки ТВС используется коррозионнотойкая сталь аустенитного класса 12X18H9. В расчете использованы результаты экспериментальных исследований данной стали в условиях сжатия и растяжения при различных скоростях деформации и температурах [11].

Для определения характеристик исследуемой стали при динамическом нагружении использовался метод Кольского по схеме Николаса с различными вариантами разрезного стержня Гопкинсона. Образцы испытывались при различных скоростях деформации и температурах.

В результате экспериментальных исследований [11] были получены диаграммы деформирования и предельные характеристики разрушения в диапазоне скоростей деформаций от $0,001$ до 1500 с^{-1} и при температурах от 20 до $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для каждого режима нагружения (скорость деформации, температура) проводились повторные испытания. На основе серии полученных диаграмм для каждого режима испытаний определялась средняя кривая с характеристиками разброса экспериментальных данных (доверительные интервалы).

По результатам экспериментальных исследований деформирования стали 12X18H9 при статическом и динамическом нагружении были определены параметры модели Jonson-Cook из библиотеки LS-DYNA. Модель Jonson-Cook определяет напряжение текучести как функцию деформации, скорости деформации и температуры [13].

Для верификации модели деформирования исследуемой стали использовались эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями в образцы из исследуемого материала [14, 15] и на диагональное сжатие.

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% .

Результаты сравнения позволили сделать вывод о достаточной достоверности и точности используемой математической модели. Таким образом, совокупность экспериментальных данных свидетельствует о возможности применения используемой модели поведения применяемого конструкционного материала для инженерного анализа напряженно-деформированного состояния и прочности исследуемой конструкции в условиях динамического нагружения.

Расчетный анализ процесса схода каретки

Расчетный анализ схода каретки выполнялся в системе ANSYS/LS-DYNA аттестованного в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ программного комплекса ANSYS [10], основанной на методе конечных элементов и предназначенной для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики [7, 16].

Поскольку при ударе в конструкции индуцируются короткие по длине волны вибрационной природы, то для их описания применялись конечные элементы с большим числом степеней свободы.

Было установлено, что процесс схода каретки можно условно разделить на два этапа:

– на первом этапе происходит соударение демпфера каретки с опорой;

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

На первом этапе за счет упруго-пластического деформирования демпфера происходит гашение кинетической энергии каретки, при этом демпфер испытывает максимальные ускорения, напряжения и деформации.

В процессе соударения каретки с опорой происходит гашение значительной части кинетической энергии, но часть ее передается на гильзу с находящейся в ней ТВС.

На втором этапе за счет части непогашенной кинетической энергии происходит отскок каретки и колебание гильзы с находящейся в ней ТВС, которая совершает хаотичные колебательные движения (бие-ние) в пределах кольцевого зазора и поступательное движение вдоль гильзы после отскока от дна.

Поскольку элементы ТВС в процессе удара работают в области упругопластических деформаций, в качестве основного критерия состояния ТВС принималась относительная деформация.

За условие динамической прочности принималось соотношение:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{пред}}, \quad (1)$$

где ε – относительная динамическая деформация, полученная в результате расчета, %; $\varepsilon_{\text{пред}}$ – предельная относительная деформация, %.

В качестве предельной, принимается деформация разрушения при кратковременных стандартных испытаниях на растяжение образца. Она определена по относительному поперечному сужению ψ сечения образца в месте разрыва [15]:

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \ln \left(\frac{1}{1 - 0,01\psi} \right) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

– для стали 12Х18Н9 – $\varepsilon_{\text{пред}} = 73 \%$;

– для материалов, указанных в таблице – $\varepsilon_{\text{пред}} = 92 \%$.

Наибольшие величины относительной пластической деформации элементов ТВС (рис. 9–14) составляют:

– в решетке ПЭЛ $\varepsilon = 7,5 \% < \varepsilon_{\text{пред}} = 92 \%$;

– в держателе верхнем $\varepsilon = 6 \% < \varepsilon_{\text{пред}} = 73 \%$;

– в держателе твэл $\varepsilon = 5,4 \% < \varepsilon_{\text{пред}} = 73 \%$;

– в твэл $\varepsilon = 2,9 \% < \varepsilon_{\text{пред}} = 92 \%$;

– в хвостовике $\varepsilon = 1,2 \% < \varepsilon_{\text{пред}} = 73 \%$;

– в чехле $\varepsilon = 0,9 \% < \varepsilon_{\text{пред}} = 92 \%$.

Для всех элементов конструкции условие динамической прочности выполняется, поскольку величины деформаций не превышают предельных значений.

Также рассматривалось соударение каретки элемента без демпфирующего элемента о жесткое основание. В процессе соударения гашение кинетической энергии происходит за счет упруго-пластического деформирования каретки.

Сравнение величины пластических деформаций в элементах ТВС представлены в таблице.

Относительная деформация в элементах конструкции

Конструктивный элемент	Относительная пластическая деформация ε , %	
	Без демпфирующего элемента	С использованием демпфирующего элемента
Держатель верхний	12	6
Держатель твэл	6,8	5,4
Хвостовик	2,3	1,2

В результате проведенного анализа напряженно-деформированного состояния установлено, что демпфер за счет упругопластической деформации практически полностью гасит кинетическую энергию каретки при ее сходе по направляющей.

При этом величины относительной пластической деформации в элементах ТВС значительно снижаются.

Заключение

В заключении можно отметить, что проблема обеспечения прочности и целостности оборудования ядерных энергетических установок при динамических воздействиях высокой интенсивности при обосновании безопасности является весьма актуальной.

Реализованный в работе комплексный подход к выполнению расчетного анализа аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования, основан на соблюдении следующих принципов:

– 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 НДС 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.

Литература

1. НП-061-05 Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии.
2. 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, // XIV Нижегородская сессия молодых ученых «Технические науки», 15–19 февраля 2009 г. Сборник тезисов докладов. г. Н. Новгород, Нижегородский НИЦ, 2009. С. 86.
3. Кайдалов В. Б., Лапшин Д. А., Малыгин М. Г. Моделирование ударных процессов при проектировании оборудования обращения с топливом реакторных установок типа БН. VIII научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Аннотации докладов. Нижегородская область, г. Саров, 2009.
4. 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.
5. 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. Межвуз. сб. Москва. Товарищество научных изданий КМК, 1997. С. 77–83.
6. 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.
7. LS-DYNA Keyword user's manual. Version 970. Livermore Software Technology Corporation.
8. Виленский О. Ю., Лапшин Д. А., Рябцов А. В. Применение верифицированной расчетной модели тепловыделяющей сборки реактора БН-800 для анализа последствий ее падения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2017. Вып. 3. С. 187–198.
9. Брагов А. М., Константинов А. Ю., Лапшин Д. А., Ламзин Д. А., Новосельцева Н. А., Татарский А. М., Татарский Ю. Н. Применение комплексного подхода к решению задач прочности элеватора реакторной установки БН-800 для аварийного случая схода каретки. Межвузовский сборник «Проблемы прочности и пластичности», № 80(1). г. Н.Новгород, 2018. С. 72–82.
10. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства № 327 от 18.04.2013.
11. Лапшин Д. А. Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением: Дисс... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2015.
12. Брагов А. М. Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации 10^2 – 10^5 с⁻¹: Дисс.... докт. техн. наук. Нижегород. ун-т. 1998.
13. 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, The Netherlands, 1983. P. 541–547.
14. Константинов А. Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дис... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2007.
15. Котов В. Л., Константинов А. Ю., Кибец Ю. И., Тарасова А. А., Власов В. П. Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в упругопластической среде // Проблемы прочности и пластичности. 2013. Т. 75. № 4. С. 303–311.
16. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. 1998.