

ВЛИЯНИЕ ДЕМПФЕРА НА ПЕРЕГРУЗКИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕВАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БН-800 ПРИ АВАРИЙНОМ СХОДЕ КАРЕТКИ

О. Ю. Виленский, Д. А. Лапшин, А. М. Татарский, Ю. Н. Татарский

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

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 элементов механизма внутриреакторной перегрузки применительно к постулируемым авариям, связанным с падением каретки элеватора.

Для внутриреакторной транспортировки радиоактивных материалов в реакторах типа БН применяют 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 теплоделяющей сборки (ТВС), а также любые нарушения в его положении при работе с ядерным топливом.

Выполнение подобных требований обеспечивается в основном за счёт 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 путём выполнения представительных расчётных 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].

В данной работе на примере отработки конструкции элеватора механизма внутриреакторной перегрузки топливных сборок реакторов типа БН исследуется случай нештатного схода каретки с ТВС по направляющей, приводящий к её ударному взаимодействию с преградой. Актуальность работы определяется имевшими 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 надёжности 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 решались следующие группы задач:

– 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.

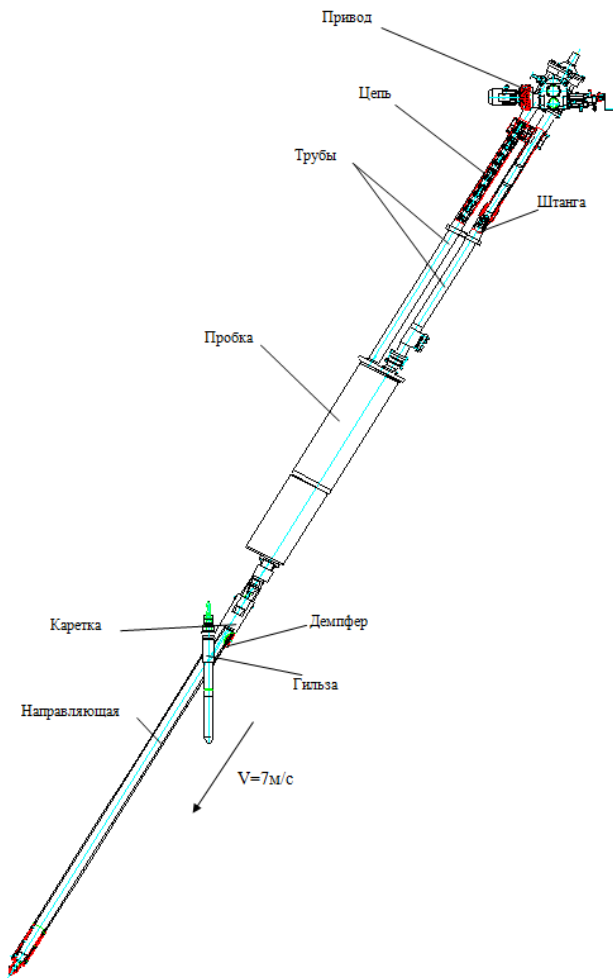


Рис. 1. Общий вид элеватора

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 элементов каретки элеватора и демпфера используется коррозионноустойчивая сталь аустенитного класса 10X18H9. В расчете использованы результаты экспериментальных исследований данной стали в условиях сжатия и растяжения при различных скоростях деформации и температурах [8].

Исходя из особенностей конструкции и условий нагружения, была разработана расчетная модель, показанная на рис. 2.

Данную модель элеватора характеризуют следующие граничные условия:

- начальная скорость, приложенная ко всем элементам элеватора (кроме абсолютно жестких тел), развиваемая к моменту соударения с жестким основанием $v = 7 \text{ м/с}$;
- ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
- каждая из составляющих модели элеватора смоделирована как отдельная часть; между частями

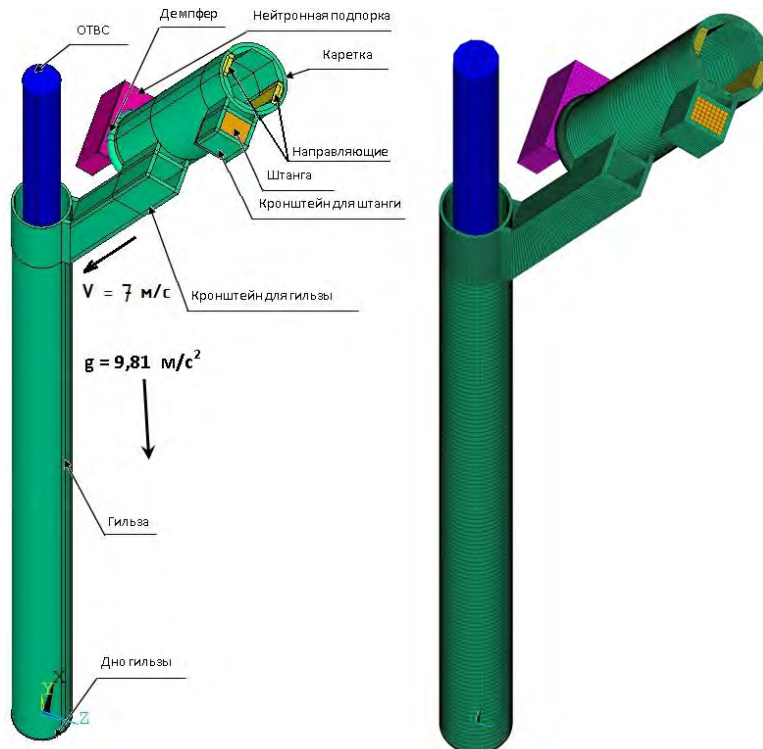


Рис. 2. Общий вид расчетной модели

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

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

Целью отработки конструкции являлось максимальное снижение ударного воздействия путем оптимизации конструкции гасителя удара, которым является демпфер.

Расчетный анализ схода каретки выполнялся в системе ANSYS/LS-DYNA аттестованного в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ программного комплекса ANSYS [9], основанной на методе конечных элементов и предназначенной для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики [7, 10].

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

В качестве модели поведения материала использовалась упруго-пластическая модель Купера-Саймондса с кинематическим упрочнением материала, позволяющая учитывать влияние скорости деформации, а также кинематическое, изотропное или совместное кинематическое и изотропное упрочнение.

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

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

а) на первом этапе происходит соударение демпфера каретки с опорой;

б) 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) в пределах кольцевого зазора и поступательное движение вдоль гильзы после отскока от дна.

Величины пластической деформации в элементах конструкции представлены в таблице.

Относительная деформация в элементах конструкции

Конструктивный элемент	Относительная пластическая деформация ϵ , %	
	Без демпфирующего элемента	С использованием демпфирующего элемента
Демпфер	–	36
Кронштейн крепления штанги	42	34
Кронштейн крепления гильзы	14	11
Дно гильзы	39	20

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

При этом наибольшая величина относительной пластической деформации в элементах элеватора снижается с 42 до 34 %. Размер зон пластических деформаций значительно снижается при использовании демпфирующего элемента.

В заключении можно отметить, что проблема обеспечения прочности и целостности оборудования ядерных энергетических установок при динамических воздействиях высокой интенсивности при обеспокоенности 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 напряженно-деформированного состояния и прочности конструкций, позволяющих учитывать интенсивные воздействия ударного характера;

– выполнение, нормативных требований безопасности, предъявляемых к объектам использования атомной энергии (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. Применение расчетного комплекса ANSYS\LS-DYNA в анализе аварий, связанных с падением оборудования ЯЭУ, Тимофеев А. В., Кайдалов В. Б., Лапшин Д. А., Малыгин М. Г. XIV Нижегородская сессия молодых ученых «Технические науки», 15 – 19 февраля 2009г. Сборник тезисов докладов. г. Н.Новгород, Нижегородский НИЦ, 2009. С. 86.

3. Математическое моделирование и оценка демпфирующей способности конструктивных элементов при аварийном сходе каретки элеватора на РУ БН-800. / Лапшин Д. А., Татарский А. М., Татарский Ю. Н. // Молодежная отраслевая научно-техническая конференция «Развитие технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем» БН-2016. АО «ОКБМ Африкантов», 9-10 ноября 2016, Н.Новгород. Сборник тезисов. С. 35–36.

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 г. № 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. Лапшин Д. А. Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением: Дисс... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2015.

9. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства № 327 от 18.04.2013.

10. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. 1998.