

УДК 539.3

## ПАДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ПРЕДМЕТОВ НА РЕАКТОР

© 2013 г. В.Б. Кайдалов, Д.А. Лапшин, М.Г. Малыгин, А.В. Рябцов

ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

silaev@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 12.04.2012

Проведены анализ и оценка последствий падения контейнера с загруженным оборудованием на реактор при выполнении операции по замене оборудования реактора, оценена возможность потери герметичности внутренней полости реактора.

Анализ и оценка последствий падения проведены с использованием программного комплекса ANSYS/LS-DYNA, основанного на методе конечных элементов и предназначенного для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики. В расчете использованы модели упругопластического деформирования материалов с линейным изотропным упрочнением. В качестве предельного состояния материала принимается деформация разрушения.

Результаты анализа процесса и оценка последствий контактного взаимодействия падающего контейнера с оборудованием и внутренними конструкциями реактора легли в основу определения критериев обеспечения безопасности реакторной установки и возможности ее дальнейшей эксплуатации. Указанные цели достигнуты путем ограничения высоты подъема контейнера.

*Ключевые слова:* динамические процессы, деформация разрушения, обеспечение безопасности.

### Введение

Современный этап развития атомной энергетики характеризуется повышением требований безопасности, предъявляемых к объектам, использующим атомную энергию.

Оценка безопасности атомных станций (АС) включает в себя анализ реакции систем и сооружений АС на возможные исходные события (ИС). На стадии обоснования безопасности АС определяются сценарии прогнозируемых событий и их последствия, а также оцениваются возможности вмешательства в работу систем с целью контроля за ходом процессов [1]. Указанный анализ является основой организации управления безопасностью систем АС в различных ситуациях.

Одним из требований обоснования безопасности атомных энергетических установок (АЭУ) является анализ и оценка последствий падения на оборудование АС перемещаемых грузов, реализация которого постулируется. В соответствии с [2] падение тяжелых предметов на реактор является исходным событием.

Наиболее вероятной является ситуация падения перемещаемых грузов. Схема транспортировки грузов в реакторном помещении не предусматривает их перемещения над работающим реактором, поэтому в качестве исходного состояния энергоблока перед ИС рассматривается состояние, в котором реактор остановлен для проведения перегрузки и/или планово-предупредительного ремонта с заменой оборудования, требующей вскрытия основного контура циркуляции теплоносителя.

Для реакторной установки в качестве наиболее значимого ИС с падением предметов рассмотрено падение контейнера, транспортируемого с загруженным оборудованием, на реактор при выполнении операции по его замене.

Цель настоящей работы – расчетный анализ последствий падения контейнера с загруженным оборудованием и оценка возможных последствий с точки зрения безопасности реакторной установки.

Анализ и оценка последствий падения контейнера выполнены с использованием программного комплекса ANSYS/LS-DYNA [3], основанного на методе конечных элементов и предназначенного для расчетного анализа сильнонелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики.

## 1. Исходные данные для расчета

В качестве ИС рассмотрено несанкционированное несоосное вертикальное падение контейнера с загруженным оборудованием, имеющего максимальный вес из всех грузов, перемещаемых над остановленным реактором ( $G \approx 130$  т), с высоты  $h$ .

Падение контейнера с оборудованием на патрубок корпуса реактора обусловлено требованием [2] и конструктивным исполнением реакторного блока, при котором падение контейнера с оборудованием вне патрубка возможно только на верхнюю неподвижную защиту, последствия чего менее тяжелые.

После проведения анализа транспортно-технологического тракта были выявлены минимально и максимально возможные высоты подъема контейнера над патрубком корпуса реактора и проведена серия расчетов с варьированием скоростей падения контейнера в момент соударения с патрубком. Скорость движения контейнера в момент соударения с площадкой крепления оборудования на реакторе при падении с высоты  $h$  равна  $v = \sqrt{2gh}$ , где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Для изготовления контейнера и оборудования реактора применяются коррозионно-стойкие стали аустенитного класса 12X18H10T и 10X18H9, для изготовления деталей крепежа – высоколегированная высокохромистая сталь 07X16H4Б. В расчете консервативно использованы модели упругопластического деформирования материалов с линейным изотропным упрочнением. Модель деформирования с изотропным упрочнением рекомендуется использовать, когда имеют место большие деформации. В качестве предельного состояния материала принимается деформация разрушения  $\varepsilon_{\text{пред}}$  при кратковременных стандартных испытаниях на растяжение образца. Она определена по относительному поперечному сужению  $Z^T$  сечения образца в месте разрыва:

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

Указанная модель для стали 12X18H10T приведена на рис. 1.

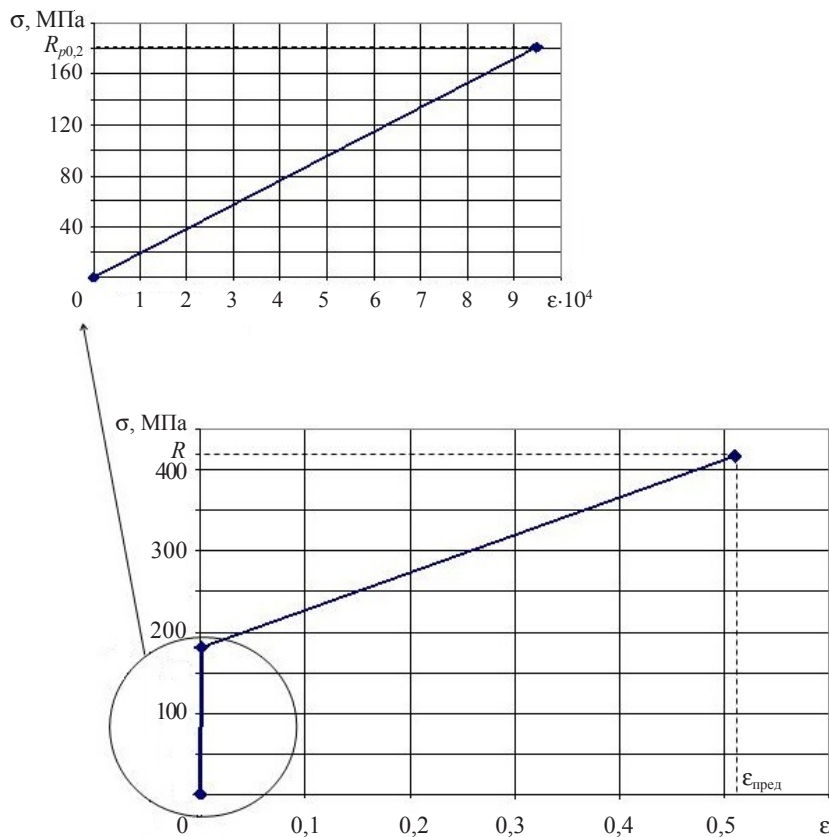


Рис. 1. Модель упругопластического квазистатического деформирования стали 12X18H10T

## 2. Расчет динамики процесса падения контейнера в вертикальном положении

**2.1. Методика построения и описание расчетной модели.** При построении расчетной модели основным критерием является наиболее полное отражение жесткостных и весовых характеристик конструктивных элементов, учет их взаимодействия в процессе динамического нагружения. Элементы, не влияющие на прочность и жесткость, учитывались с целью сохранения весовых характеристик.

Для всех компонентов заданы контактные задачи, учитывающие как статический, так и динамический коэффициенты трения, зависящие от относительных скоростей поверхностей контакта. Заданный тип контакта учитывает не только взаимодействие контактных пар, но и формоизменение тела при больших деформациях, когда отдельные элементы одной конструкции начинают взаимодействовать между собой. Такой вид контакта высокоэффективен в задачах «самоконтакта» (складкообразования) и в задачах с большими деформациями.

Для построения расчетной модели использовались трехмерные конечные элементы типа SOLID164. Конечно-элементная модель состоит из 237000 конечных элементов. Расчетная модель представлена на рис. 2.

Модели контейнера, контактируемого оборудования реактора и разъемных соединений со шпилечным креплением построены в полном соответствии с реальной

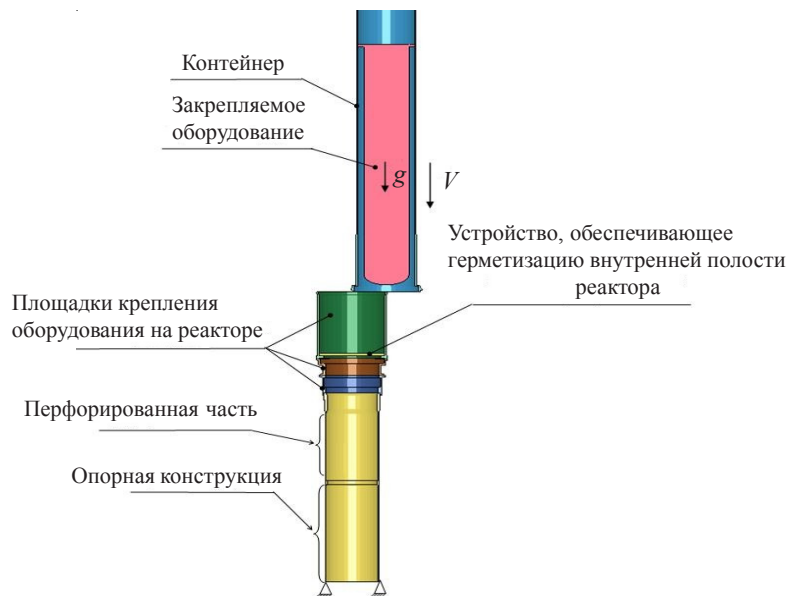


Рис. 2. Расчетная модель

геометрией с учетом всех конструктивных особенностей.

Модели закрепляемого оборудования реализованы в виде массо-габаритного макета. Построена модель устройства, обеспечивающего герметичность внутренней полости реактора. Опорная конструкция реактора моделируется цилиндрической обечайкой по критерию эквивалентной жесткости.

**2.2. Анализ процесса.** Процесс взаимодействия контейнера с элементами реактора пошагово показан на кинограмме, изображенной на рис. 3.

Данный процесс имеет несколько характерных этапов:

а) соударение контейнера с оборудованием реактора, в процессе которого происходит упругопластическое деформирование контактирующих поверхностей, и гашение большей части кинетической энергии падающего контейнера;

б) продолжение движения контейнера по инерции в направлении приложения первоначальной скорости. Распределение интенсивности напряжений и интенсивности пластических деформаций (по Мизесу) в месте расположения упоров при достижении несущей способности показано на рис. 4 и 5 соответственно;

в) соударение закрепляемого оборудования с оборудованием реактора, во время которого в месте контакта возникают наибольшие ускорения. Во время соударения на оборудование реактора передается часть кинетической энергии. Изменение интенсивности пластических деформаций по предельному состоянию шпилек показано на рис. 6;

г) деформация перфорированной части опорной части реактора. Распределения интенсивности напряжений в опорной части реактора и интенсивности пластических деформаций по предельному состоянию показаны на рис. 7 и 8. В результате изгиба опорной части реактора в районе перфорации может происходить отклонение опорной части от первоначального положения;

д) прекращение действия инерционных сил и «заваливание» контейнера.

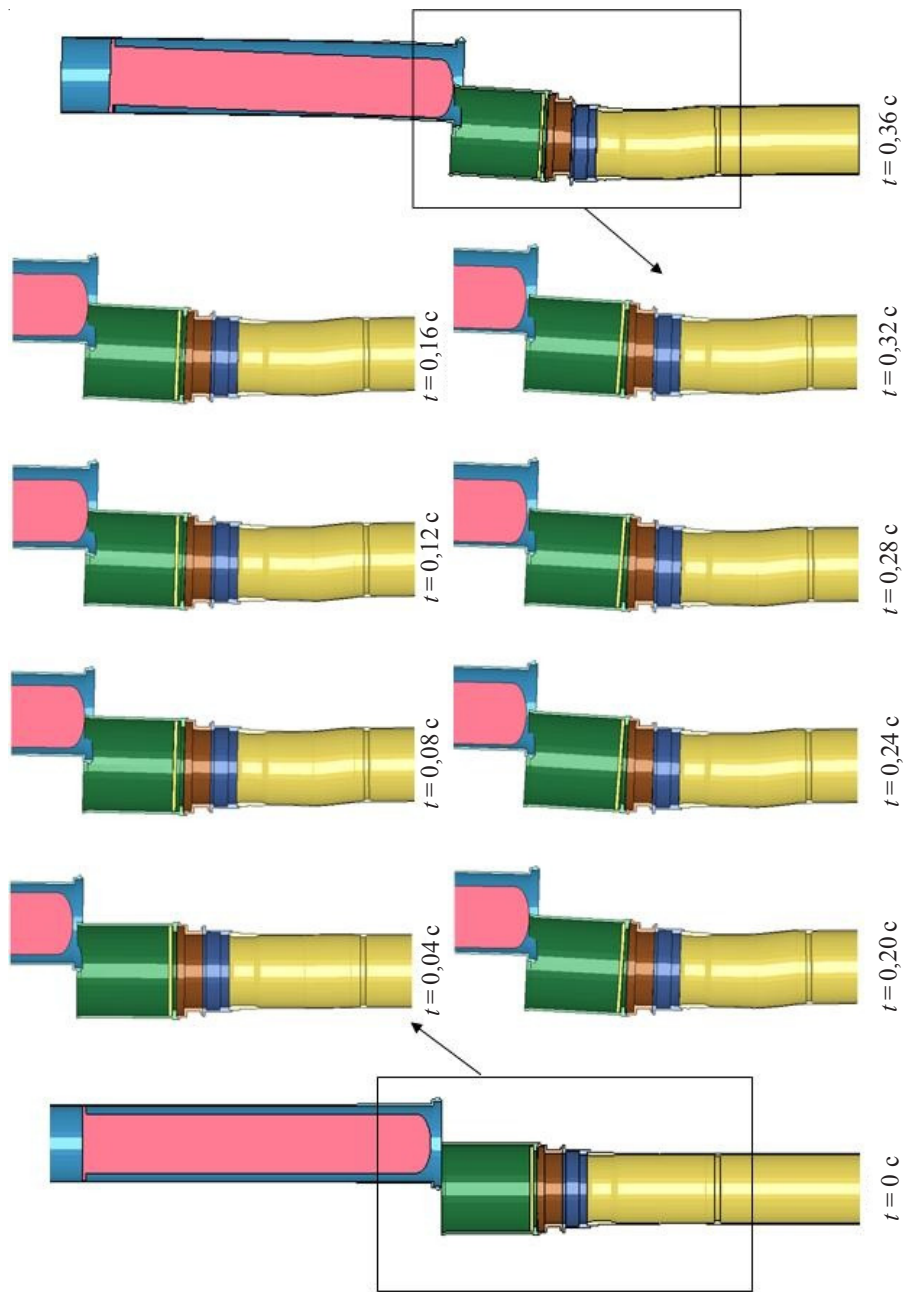


Рис. 3. Процесс взаимодействия контейнера с оборудованием реактора

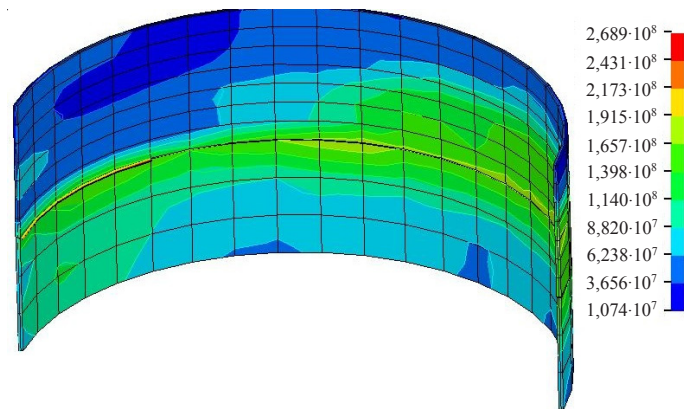


Рис. 4. Распределение напряжений (интенсивность напряжений) в месте расположения упоров, Па

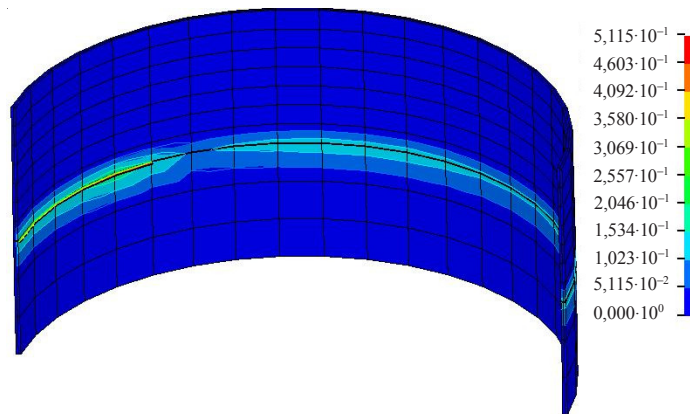


Рис. 5. Распределение пластических деформаций в месте расположения упоров

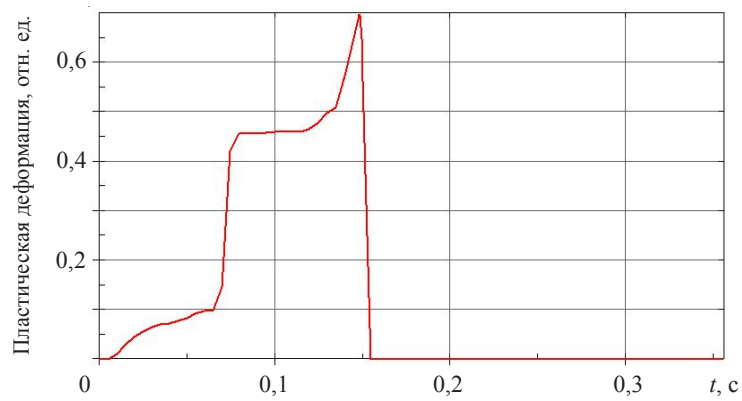


Рис. 6. Пластические деформации шпилечного соединения

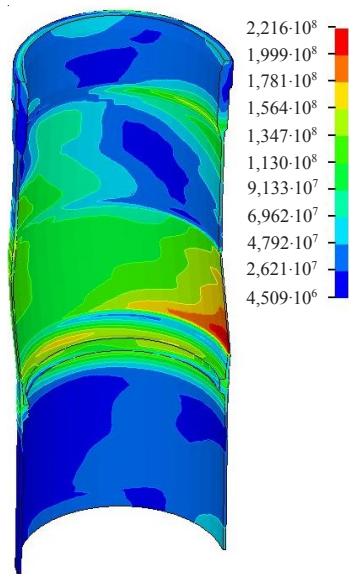


Рис. 7. Распределение напряжений (интенсивность напряжений) в опорной части реактора, Па

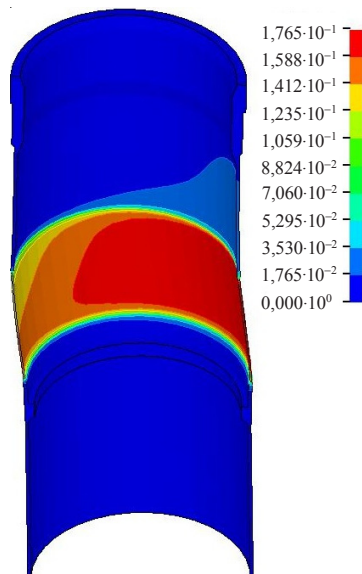


Рис. 8. Распределение пластических деформаций в опорной части реактора

### Результаты анализа

Для случая несанкционированного несоосного вертикального падения контейнера с загруженным оборудованием весом 130 т на реактор определена предельно допустимая высота подъема контейнера над площадкой крепления оборудования на реакторе, допускающая дальнейшую эксплуатацию реактора в соответствии с требованиями безопасности.

Результаты анализа процесса и оценка последствий контактного взаимодействия падающего контейнера с оборудованием реактора и его внутренними конструкциями легли в основу определения критериев обеспечения безопасности реакторной установки и возможности ее дальнейшей эксплуатации.

### Список литературы

1. Трехмерный анализ процессов запроектной аварии реакторов на быстрых нейтронах интегральной компоновки / В.Г. Баженов, В.В. Жуков, В.А. Замятин, А.И. Кибец, Ю.И. Кибец, П.В. Лаптев, С.А. Пристром // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2004. Вып. 66. С. 114–122.
2. НП-018-05 «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах».
3. LS-DYNA Keyword user's manual. Version 970. Livermore Software Technology Corporation.



## **DROPPING HEAVY OBJECTS UPON THE REACTOR**

**V.B. Kaidalov, D.A. Lapshin, M.G. Malygin, A.V. Ryabtsov**

The paper presents the analysis and estimation of the consequences of dropping a container loaded with equipment upon a reactor when replacing the reactor equipment. The probability of the loss of integrity of the reactor inner cavity is evaluated.

Consequences of dropping a container are analyzed and assessed using the ANSYS/LS-DYNA software package based on the finite element method and designed for computationally analysing highly non-linear dynamic processes using the explicit integration scheme of dynamics equations. Deformation models for elastic and plastic materials with linear isotropic hardening are used in the calculations. Failure deformation was taken as the ultimate state of materials.

The results of the process analysis and the assessment of the consequences of contact interaction between a container with equipment and the internal structures of the reactor served as the basis for identifying criteria for providing the safety of the reactor plant and the possibility of its subsequent operation. The requirements specified are met by limiting the elevation height of the container.

*Keywords:* dynamic processes, failure deformation, providing the safety.