

УДК 539.3

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КАТКОВЫХ ОПОР ПРИ ПАДЕНИИ БАЛКИ ПЕРЕКРЫТИЯ НА КОРПУС РЕАКТОРА БН-600*

© 2016 г. **Виленский О.Ю.¹, Константинов А.Ю.²,
Лапшин Д.А.¹, Малыгин М.Г.¹, Пристром С.А.¹**

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

²Научно-исследовательский институт механики

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

sigma@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 13.09.2016

Представлены основные результаты анализа процесса деформирования и оценки воздействия на катковые опоры при падении блока перекрытия на реактор БН-600.

Расчетный анализ падения блока перекрытия выполнен с использованием модуля динамических расчетов LS-DYNA аттестованного программного комплекса ANSYS. Модуль LS-DYNA предназначен для расчетного анализа нелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики.

Использована упрощенная модель упругопластического деформирования материала с линейным изотропным упрочнением (от окончания упругой деформации, соответствующей напряжению предела текучести, до деформации разрушения, соответствующей напряжению предела прочности), дающая консервативную оценку уровня пластических деформаций.

Анализ результатов позволил определить величину нагрузки, передаваемой на катковые опоры реактора, и оценить величину возможного смещения реактора на катковых опорах вследствие падения блока перекрытия.

Ключевые слова: динамические процессы, пластическое деформирование, катковые опоры, прочность, моделирование, реактор.

Введение

В соответствии с «Требованиями к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах» НП-018-05 оценка безопасности атомных станций (АС) должна включать в себя анализ реакций систем и сооружений АС на возможные исходные события. Падение тяжелых предметов на реактор является исходным событием нарушения нормальной эксплуатации. Различные варианты падения тяжелых предметов при нарушении нормальных условий эксплуатации были рассмотрены в [1–5].

* Выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №15-38-20759).

Схема транспортировки грузов в реакторном помещении не предусматривает их перемещения над работающим реактором. Анализ условий эксплуатации показал, что наибольшую опасность может представлять падение деталей строительных конструкций на работающий реактор, например в случае пожара в реакторном помещении. Наиболее серьезные последствия может вызвать падение блока перекрытия, поэтому такая ситуация рассматривается в качестве исходного события для реактора БН-600.

Целью настоящей статьи являются:

- оценка величины нагрузки, передаваемой на катковые опоры реактора вследствие падения блока перекрытия;
- оценка возможного смещения реактора на катковых опорах вследствие падения блока перекрытия.

Расчетный анализ падения блока перекрытия выполнен с использованием модуля динамических расчетов LS-DYNA аттестованного программного комплекса ANSYS [6]. Модуль LS-DYNA предназначен для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики. В расчете использована упрощенная модель упругопластического деформирования материала с линейным изотропным упрочнением (от окончания упругой деформации, соответствующей напряжению предела текучести, до деформации разрушения, соответствующей напряжению предела прочности), дающая консервативную оценку уровня пластических деформаций.

1. Исходные данные для расчета

В качестве параметров исходного события для реактора БН-600 рассматривается падение на него блока перекрытия массой $m = 10$ т, размерами $61 \times 50 \times 6$ м с высоты $H = 44$ м. Скорость блока перекрытия в момент соударения $v = \sqrt{2gH} = 29,4$ м/с. Состояние энергоблока перед исходным событием соответствует работе на номинальной мощности.

С целью оценки прочности катковых опор реактора и возможности его бокового смещения были рассмотрены различные варианты падения блока перекрытия разными гранями на верхние элементы реактора (колпак защитный, главный циркуляционный насос первого контура (ГЦН-1), промежуточный теплообменник (ПТО)).

Колпак защитный опирается на верхнюю неподвижную защиту и не передает воздействия на корпус реактора при падении на него блока перекрытия. ГЦН-1 и ПТО расположены на периферии реактора на опорных стаканах, приваренных к верхней плите опорного пояса, который установлен на опорное кольцо корпуса над катковыми опорами. При падении на ГЦН-1 или ПТО блока перекрытия происходит не только деформация этих элементов, но и боковое смещение реактора за счет скольжения по катковым опорам.

Предварительные расчетные оценки показали, что наиболее неблагоприятным для жесткой передачи усилия на катковые опоры является вариант падения блока перекрытия в вертикальном положении на ГЦН-1. Этот вариант принят в качестве расчетного.

Схема расположения катковых опор корпуса реактора изображена на рис. 1.

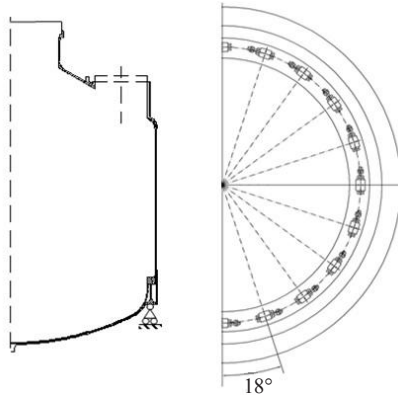


Рис. 1. Схема расположения катковых опор корпуса реактора

Для изготовления корпуса и внутрикорпусных конструкций реактора БН-600 применены коррозионно-стойкие стали аустенитного класса 10X18Н9 и 09X18Н9. Механические характеристики указанных сталей приняты согласно [7]. В расчете использованы модели упругопластического деформирования материалов с линейным изотропным упрочнением, дающие консервативную оценку уровня деформаций. Модель деформирования с изотропным упрочнением рекомендуется использовать, когда имеют место большие деформации. В качестве предельного состояния материала принимается деформация разрушения $\epsilon_{\text{пред}}$ при кратковременных стандартных испытаниях на растяжение образца, которая определяется по относительному поперечному сужению Z^T сечения образца в месте разрыва [8]:

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

Применяемая модель упругопластического деформирования для стали 10X18Н9 при расчетной температуре 450 °С приведена на рис. 2, на котором пунктиром отмечены предел текучести и предел прочности.

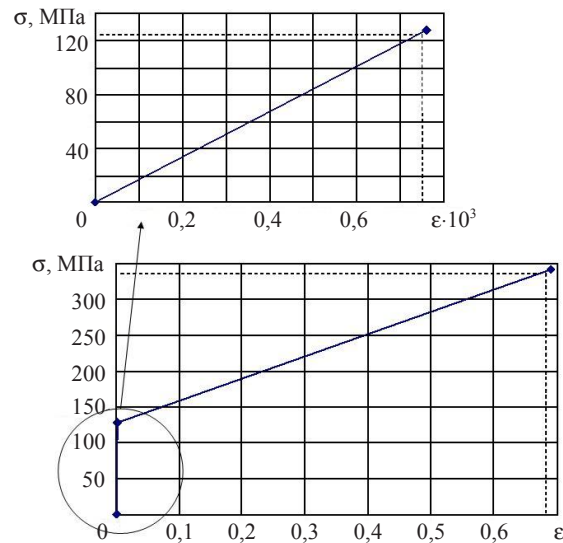


Рис. 2. Модель упругопластического деформирования стали 10X18Н9

2. Исследование динамики процесса падения блока перекрытия

2.1. Методика построения и описание расчетной модели. Исходя из имеющихся требований в программном комплексе (ПК) ANSYS/LS-DYNA к размеру и количеству конечных элементов, из особенностей конструкции и условий нагружения, построена расчетная конечно-элементная 3D-модель конструкции реактора БН-600 (рис. 3).

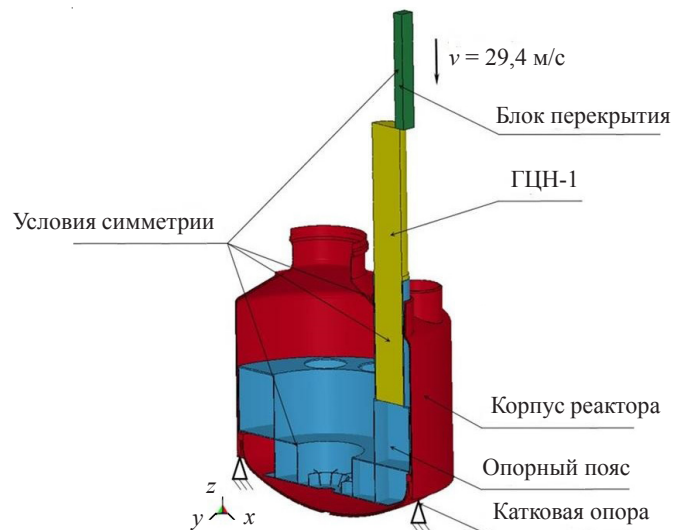


Рис. 3. Расчетная 3D-модель конструкции реактора БН-600

Разработка расчетной модели осуществлялась в соответствии с принципами современной CAD/CAE-технологии. Геометрические 3D-модели корпуса реактора и внутрикорпусного оборудования были разработаны в среде ANSYS/WORKBENCH. Конечно-элементное (КЭ) разбиение модели корпуса и внутрикорпусного оборудования выполнено с помощью LS-DYNA ПК ANSYS. Для построения расчетной модели использовались восьмиузловые трехмерные конечные элементы типа SOLID164.

При разработке КЭ-модели выполнена дискретизация КЭ-сетки. Размер гексаэдрических элементов подбирался в соответствии с особенностями геометрии конструкции и особенностями условий нагружения. В зонах концентрации напряжений выполнено сгущение сетки (рис. 4). Конечно-элементная модель состоит из 250000 конечных элементов.

При построении расчетной модели основным критерием является наиболее полное отражение жесткостных и весовых характеристик элементов реакторной установки (РУ), 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 РУ, участвующие в процессе деформирования (опора насоса, опорный пояс, блок днищ), смоделированы в соответствии с реальной геометрией. Элементы, вносящие вклад в общую жесткость конструкции, прямое моделирование которых связано со значительными сложностями или нецелесообразно, смоделированы по критерию эквивалентной жесткости. ГЦН-1 с электродвигателем смоделирован в виде

массогабаритного абсолютно жесткого тела. Скорость блока перекрытия на момент соударения ($v = 29,4$ м/с) задавалась в виде начального условия. В расчете учитывался собственный вес всех элементов конструкции. Катковые опоры моделировались посредством граничного условия закрепления перемещений в вертикальном направлении в соответствующих узлах корпуса. Для всех компонентов заданы контактные условия, учитывающие как статический коэффициент трения скольжения стали по стали (принят $f_{\text{тр}}^c = 0,2$), так и динамический коэффициент трения (для консервативной оценки принят на порядок меньше $f_{\text{тр}}^d = 0,02$). Тип контакта задан таким, что учитывается не только взаимодействие контактных пар, но и формоизменение тела при больших деформациях, когда отдельные области одного тела начинают взаимодействовать между собой. Таким образом, разработанная расчетная модель позволяет в консервативной постановке проанализировать последствия падения блока перекрытия на РУ БН-600.

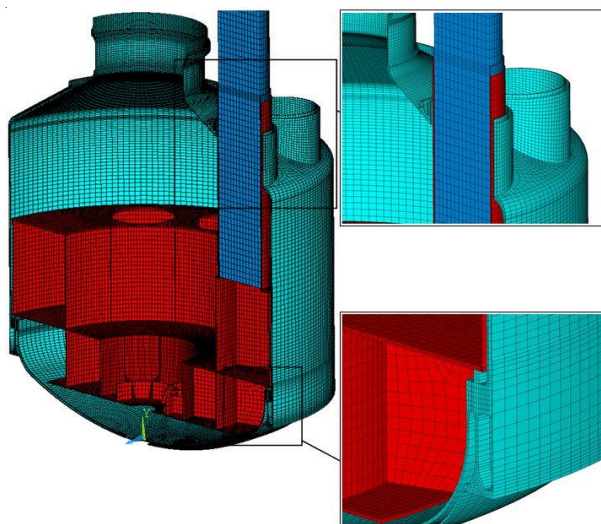


Рис. 4. Конечно-элементная расчетная модель реактора

2.2. Анализ процесса. Процесс падения блока перекрытия на РУ БН-600 можно условно разделить на три временных этапа:

- 1) соударение блока перекрытия с верхней частью электродвигателя ГЦН-1;
- 2) передача ударного импульса через опору ГЦН-1 на опорный пояс с потерей кинетической энергии;
- 3) восприятие ударной нагрузки через опорный пояс катковыми опорами.

На первом этапе происходит локальное пластическое деформирование в зоне соударения.

На втором этапе происходит практически полная потеря кинетической энергии падающего груза за счет локального пластического деформирования опоры насоса. Максимальная величина пластических деформаций в верхней части опорной обечайки насоса и в плите опорного пояса не превышает $\epsilon = 0,076 \ll \epsilon_{\text{пред}} = 0,69$. На рис. 5 приведено распределение эквивалентных пластических деформаций в конструкции. На рис. 6 представлено распределение приведенных (эквивалентных) напряжений в конструкции на момент передачи ударного импульса на опорный пояс. Приведенное (эквивалентное) напряжение SINT определяется по теории максималь-

ных касательных напряжений (Треска, Сен-Венана): $SINT = \sigma_1 - \sigma_3$. Максимальные динамические напряжения реализуются в верхней части опоры ГЦН-1 и составляют 148 МПа. Максимальные динамические напряжения в плите опорного пояса под ГЦН-1 составляют 139 МПа. Условие динамической прочности конструкций реактора выполняется.

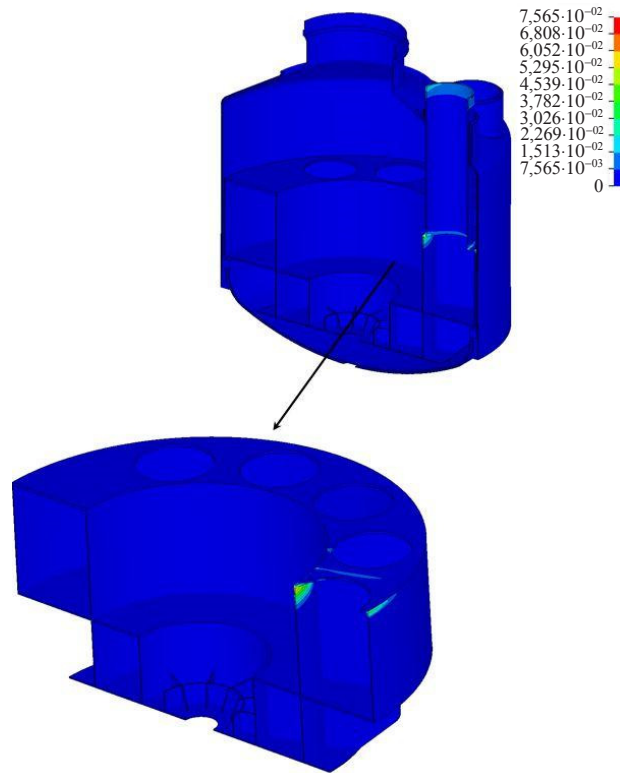


Рис. 5. Распределение эквивалентных пластических деформаций

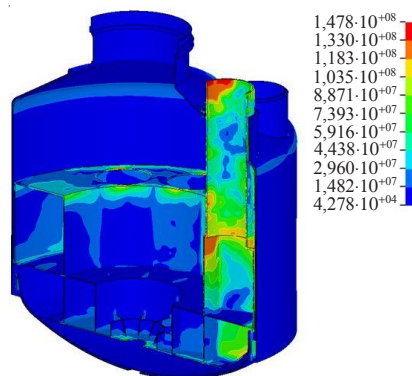


Рис. 6. Распределение напряжений SINT в конструкции на момент передачи ударного импульса на опорный пояс (Па)

На третьем этапе происходит передача ударного импульса от опорного пояса на катковые опоры. Как показал расчет, нагрузка, передаваемая на катковые опоры вследствие падения блока перекрытия (с учетом статической нагрузки от веса ре-

акторного блока), не превышает максимальной (допустимой) статической нагрузки на опору, принятой, согласно ОСТ 95.289-74, $Q_d = 373 \text{ т} < [Q_{ст}] = 500 \text{ т}$. Максимальное перемещение корпуса реактора в процессе его динамических колебаний на катковой опоре в направлении горизонтального хода (перпендикулярно оси катка) составляет $\sim 1,2 \text{ мм}$ (рис. 7). Максимальное перемещение корпуса реактора на катковой опоре перпендикулярно направлению горизонтального хода (вдоль оси катка) составляет $\sim 0,17 \text{ мм}$ (рис. 8). Таким образом, максимальные возможные перемещения корпуса реактора на катковых опорах незначительны.

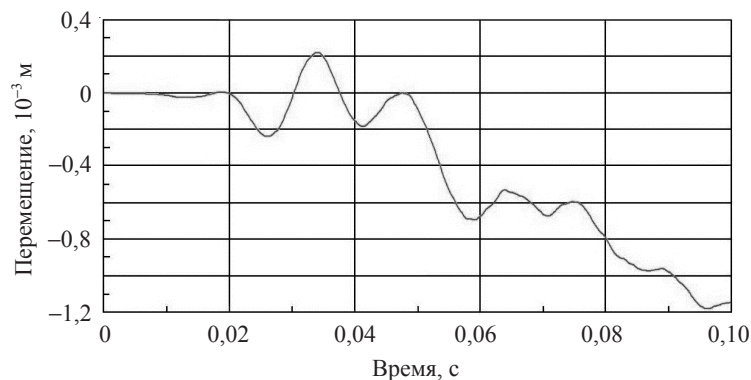


Рис. 7. Перемещения корпуса реактора на катковой опоре, направленные перпендикулярно оси катка

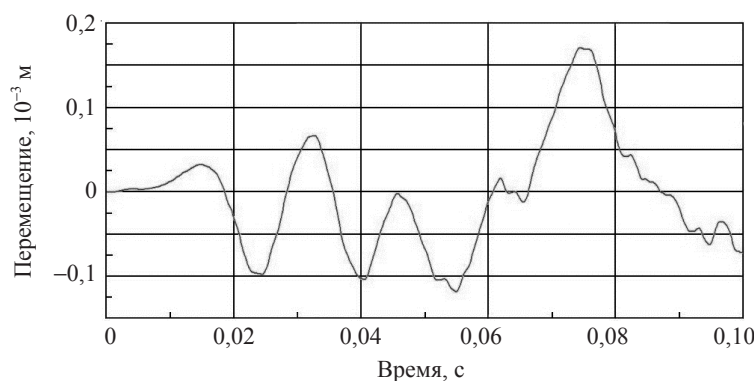


Рис. 8. Перемещения корпуса реактора на катковой опоре в направлении вдоль оси катка

Результаты анализа

На основании анализа результатов расчета сделаны следующие выводы:

- нагрузка, передаваемая на катковые опоры вследствие падения блока перекрытия (с учетом статической нагрузки от веса реакторного блока), не превышает максимальной (допустимой) статической нагрузки на опору;
- вследствие падения блока перекрытия происходят динамические колебания корпуса реактора на катковых опорах. Максимальные перемещения корпуса реактора на катковых опорах незначительны. Это исключает возможность обрыва трубопроводов 2-го контура и линий вспомогательных систем 1-го контура.

Список литературы

1. 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.
2. Ballheimer V., Probst A., Droste B. Numerical assessment of spent fuel casks impacting on real targets. *RAMTRANS*. 2000. Vol. 11. No 1–2. P. 45–51.
3. Quercetti T., Ballheimer V., Wieser G. Analytical, numerical and experimental investigations on the impact behaviour of packagings for the transport of radioactive material under slap down conditions. *JNMM*. 2002. Vol. XXX. No 3. P. 18–25.
4. Nehrig M. et al. Historical view and experiences with crush test for light weight packages. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Materials*. 2011. Vol. 22. No 3. P. 125–129.
5. Musolff A., Quercetti T., Mueller K., Droste B., Komann S. Drop test program with half scale model CASTOR HAW/TB 2. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. 2011. Vol. 22. No 3. P. 154–160.
6. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства №327 от 18.04.2013.
7. ПНАЭГ-7-002-86. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*.
8. Надаи А. *Пластичность и разрушение твердых тел*. М.: Изд-во ИЛ, 1954. Т. 1. 647 с.; Т. 2. 853 с.

References

1. 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).
2. Ballheimer V., Probst A., Droste B. Numerical assessment of spent fuel casks impacting on real targets. *RAMTRANS*. 2000. Vol. 11. No 1–2. P. 45–51.
3. Quercetti T., Ballheimer V., Wieser G. Analytical, numerical and experimental investigations on the impact behaviour of packagings for the transport of radioactive material under slap down conditions. *JNMM*. 2002. Vol. XXX. No 3. P. 18–25.
4. Nehrig M. et al. Historical view and experiences with crush test for light weight packages. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Materials*. 2011. Vol. 22. No 3. P. 125–129.
5. Musolff A., Quercetti T., Mueller K., Droste B., Komann S. Drop test program with half scale model CASTOR HAW/TB 2. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. 2011. Vol. 22. No 3. P. 154–160.
6. *Programmnyy kompleks ANSYS*. Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva №327 ot 18.04.2013 (In Russian).
7. PNAE G-7-002-86. *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok* (In Russian).
8. Nadai A. *Plastichnost' i razrushenie tverdykh tel [Theory of Flow and Fracture of Solids]*. Moscow. IL Publ. 1954. Vol. 1. 647 p.; Vol. 2. 853 p. (In Russian).

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF ROLLER SUPPORTS STRENGTH UNDER ROOF SLAB BLOCK DROP ON THE BN-600 REACTOR

Vilensky O.Yu.¹, Konstantinov A.Yu.², Lapshin D.A.¹, Malygin M.G.¹, Pristrom S.A.¹

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

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

The paper presents the basic results of analysis of deformation process and estimation of impact on roller supports during roof slab block drop on the BN-600 reactor.

Computational analysis of the roof slab block drop was made using the dynamic analysis module LS-DYNA of the certified program complex ANSYS. The module LS-DYNA is intended for the computational analysis of highly non-linear dynamic processes through the explicit scheme of dynamics equations' integration.

The analysis used a simplified model of elasto-plastic deformation of material with linear isotropic hardening (from the finish of elastic deformation, corresponding to yield strength stresses, to destruction deformation, corresponding to ultimate strength stresses), giving a conservative estimation of a plastic deformation level.

The analysis of results made it possible to determine a value of the load transferred to the reactor roller supports and to estimate a value of possible displacement of the reactor on roller supports caused by roof slab block drop.

Keywords: dynamic processes, plastic deformation, roller supports, strength, modeling, reactor.