

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС

Бамбура А.Н., Сазонова И.Р., Гичко В.В.

ГП «Государственный научно-исследовательский институт
строительных конструкций»
г. Киев, Украина

АННОТАЦИЯ: Приведено основні принципи, що використовувались при розробці та розрахунку тривимірної комп'ютерної моделі захисних оболонок енергоблоків АЕС для визначення залишкового ресурсу локалізуючої системи безпеки - системи герметичного огороження в усіх режимах експлуатації, включаючи сполучення навантажень при проектній аварії та проектному землетрусі.

АННОТАЦИЯ: Приведены основные принципы, использованные при разработке и расчете трехмерных компьютерных моделей защитных оболочек энергоблоков АЭС для определения остаточного ресурса локализирующей системы безопасности - системы герметичного ограждения во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектом землетрясении.

ABSTRACT: The main principles used in the design and calculation of three-dimensional computer models of NPP containments to determine the residual life of localizing safety system - a system of hermetic barriers in all modes of operation, including the combination of loads during design basis accidents and design basis earthquake are presented.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защитная оболочка, расчетная модель, цилиндрическая часть, купол.

Большинство энергоблоков атомных станций Украины находятся на стадии исчерпания своего проектного срока эксплуатации. Поэтому очень остро стоит вопрос продления срока эксплуатации энергоблоков АЭС и, следовательно, оценки остаточного ресурса защитных оболочек.

Учитывая сказанное, в ДП НИИСК начаты работы по разработке универсальных компьютерных моделей, учитывающих все особенности сочетаний нагрузок, и возможности вариации уровня предварительного натяжения канатов. Модели предназначены для выполнения оценки работоспособности ЛСБ-СГО во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектном землетрясении. Модели так же будут использованы для выполнения численных экспериментальных исследований влияния определяющих факторов на несущую способность и надежность защитной оболочки (ЗО).

Сложность конструкции защитных оболочек в совокупности с нагрузками, обусловленными протекающими в гермообъеме процессами и внешними воздействиями, не позволяет выполнить оценку работоспособности ЛСБ-СГО (локализирующая система безопасности - система герметичного ограждения) традиционными инженерными методами и требует применения детализированных моделей ЗО и выполнения расчетов современными программными комплексами.

Объектом разработки являются защитные оболочки энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 типа В-302 и В-338.

Цель работы – на основании изучения технической документации разработать расчетную модель ЗО ВВЭР-1000 типа В-302 и В-338 с учетом системы преднапряжения защитной оболочки для выполнения расчетных оценок несущей способности и работоспособности СГО во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектном землетрясении.

Защитная оболочка реакторного отделения (РО) энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 является элементом системы глубокоэшелонированной защиты реакторной установки (РУ), изолируя ее от окружающей природной среды и обеспечивая, при потенциально возможных авариях в РО, локализацию радиоактивных веществ в подоболочечном пространстве.

Надежность и работоспособность защитной оболочки, в том числе ограничение формоизменения (деформаций) железобетонных ограждающих конструкций (ЖОК) и герметизирующей стальной облицовки (ГСО) в условиях потенциально возможной максимальной проектной аварии (МПА), обеспечивается, в частности, системой преднапряжения специальных канатов в защитной оболочке (СПЗО).

Максимальная проектная авария характеризуется существенным повышением давления и температуры в подоболочечном пространстве:

- избыточное давление при МПА – 0.35 МПа;
- температура при МПА:
 - воздушной среды в середине гермообъема – 150°C;
 - внешней среды – минус 5°C.

Распределение температур по толщине стенки ЖОК принято по линейному закону. Принято, что температура ГСО при аварии достигает 100°С.

СПЗО является компонентом ЛСБ и образована совокупностью армоканатов (АК), анкерных устройств, каналов и каналовобразователей в защитной оболочке. Защитная оболочка представляет собой преднапряженную железобетонную конструкцию в виде цилиндра с толщиной стенки 1,200 м. Внутренний диаметр цилиндра составляет 45,000 м. В верхней части цилиндр сопрягается с пологим сферическим куполом толщиной 1,100 м. Внутренний диаметр купола составляет 35,600 м. Цилиндрическая часть сооружения на отметке 11,800 м опирается на железобетонную плиту перекрытия (нижнюю плиту оболочки). Наивысшая точка купола имеет отметку 75,950 м. Для обеспечения герметичности реакторного отделения по внутренней поверхности защитной оболочки (ее железобетонной части) устроена герметизирующая стальная облицовка толщиной 8 мм из углеродистой стали марки ВстЗсп5.

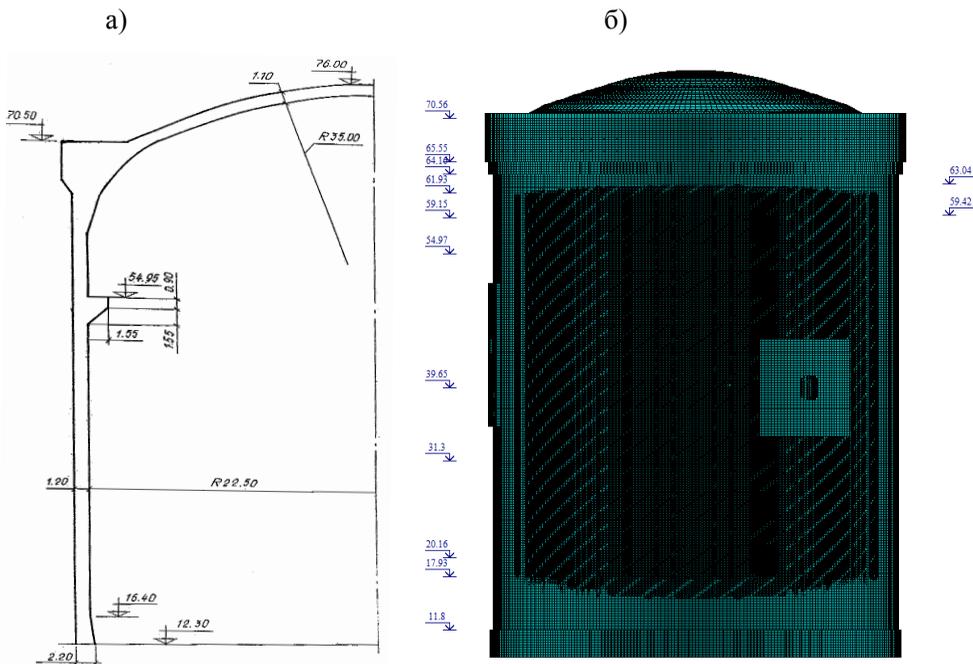


Рис. 1. Меридиональный разрез защитной оболочки (а) и общий вид компьютерной модели ЗО (б)

Зона сопряжения цилиндра и купола ниже отметки 70,500 м усилена жестким железобетонным кольцевым карнизом, который является местом анкеровки армоканатов СПЗО. Местом анкеровки канатов цилиндрической части сооружения для энергоблока также служит стилобат. В цилиндрической части защитной оболочки ниже анкерного карниза на отметке 54,950 находится верх консоли подкрановой балки. Цилиндр ЗО пересекают транспортный люк-шлюз, аварийный люк и технологические проходы.

В целом геометрическая форма сооружения представляет собой тело вращения. Основные опалубочные размеры и форма ЗО показаны на рис. 1а. На основании материалов проекта была сформирована трехмерная подробная компьютерная модель ЗО.

Модель принята в виде пространственной системы, которая в полной мере отражает конструктивное решение защитной оболочки, включая железобетонную нижнюю плиту, на которую опирается конструкция оболочки на отм. 11,800, а также зоны проходов трубопроводов питательной воды и главных паропроводов.

Расчетная схема состоит из объемных конечных элементов (КЭ), моделирующих работу железобетонных конструкций ЗО с отметки 6,350 до отметки 76,000. Общая высота расчетной схемы от основания ЗО до верха покрытия составляет 69,65 м.

Канаты в цилиндрической части расположены в три слоя и огибают оболочку по геликоидальной траектории (рис. 2а). В среднем слое запроектировано 92 каната и по 46 канатов в крайних слоях. Причем, канаты среднего слоя в верхней части цилиндра разделяются.

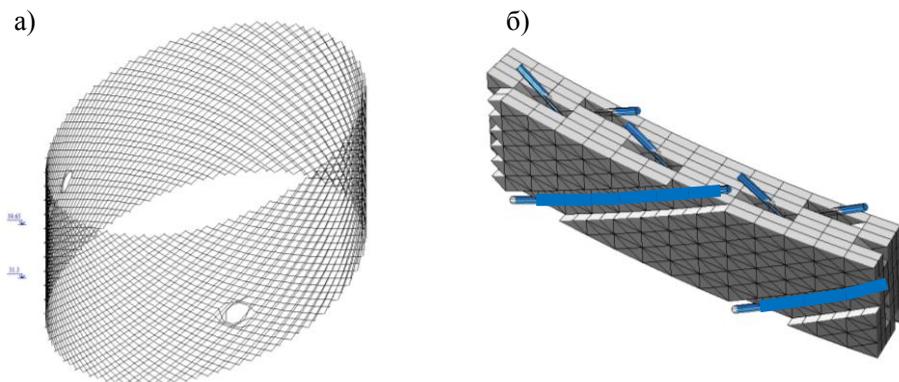


Рис. 2. Фрагмент модели: расположение армоканатов в средней части цилиндра ЗО

При моделировании стенки цилиндра разбиты на 9 основных слоев бетона по толщине (без учета гермооблицовки). Слои нумеруются изнутри наружу и имеют толщину: №1 – 150 мм; №2 – от 640 мм до 125 мм; №3 №8 – 125 мм каждый; №9 – 175 мм (см. рис. 3). ГСО моделируется плоскими КЭ оболочки толщиной 8 мм. Слои №1, №2 и №9 представляют собой 8-узловые объемные элементы. Высота элементов слоев №1, №2 и №9 составляет 278,5 мм. Длина переменная и зависит от номера слоя – всего 368 элементов по длине окружности.

Слои №3-8 представляют собой 6-узловые объемные элементы. Армоканаты имеют общие узлы только со слоем бетона, на который передаются усилия обжатия. Связи с внешним слоем бетона отсутствуют (рис. 2б). Между АК и конечными элементами, моделирующими железобетон, расположены объемные элементы с пониженным модулем деформации. Армоканаты моделируются стержневыми элементами (рис. 2б). Купольная часть при моделировании разбита на 5 слоев бетона по толщине (без учета гермооблицовки). Слои нумеруются изнутри наружу и имеют толщину: №1 – 250 мм; №2 ... №4 – 200 мм каждый; №5 – 250 мм. ГСО цилиндра и купола моделируется КЭ оболочки толщиной 8 мм.

Элементы купола представляют собой 8-узловые и 6-узловые объемные КЭ. В месте сопряжения купола с цилиндрической частью по длине окружности расположено 368 элементов, столько же, сколько и в цилиндрической части. К центру купола количество элементов по длине окружности уменьшается таким образом, чтобы размеры КЭ существенно не отличались. Канаты в купольной части расположены в два параллельных слоя (в слое №3 и №4) с близкой к ортогональной взаимной ориентацией (рис. 3). Усилия обжатия передаются на бетон через элементы, моделирующие упругие связи между узлами. Армоканаты моделируются стержневыми КЭ.

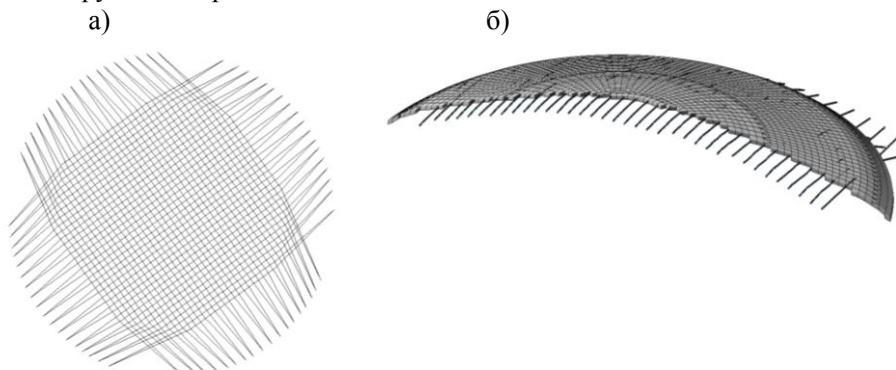


Рис. 3. Купольная часть ЗО: расположение армоканатов (а); фрагмент слоя №3 с армоканатами (б)

Особенностью расчета компьютерной модели является итерационный подход при решении задач. После каждой постановки задачи выполнялся анализ напряженно-деформированного состояния конструкций: определялись напряжения в растянутой арматуре; сжимающие напряжения в бетоне; суммарные усилия в АК и др. Если напряжения в арматуре достигали предела текучести, усилия в канатах превышали их несущую способность или какие-либо другие параметры не отвечали требованиям нормативных документов [1-6], то исходные данные модели корректировались и выполнялась следующая постановка задачи.

В результате расчета модели СГО итерационным путем определены минимально допустимые усилия в канатах, которые обеспечивают работоспособность ЛСБ-СГО во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектном землетрясении (МПА+ПЗ). На рис. 4 - 6 показаны некоторые результаты расчета модели при действии МПА+ПЗ.



Рис. 4. Деформированная схема цилиндрической части защитной оболочки

Пространственная упрощенная динамическая модель разработана и рассчитана сотрудниками отдела автоматизации исследований и сейсмостойкости конструкций зданий и сооружений ГП "НИИСК" [5]. Расчет пространственной динамической модели выполнен на сейсмические воздействия, заданные в виде поэтажных спектров реакции для отметки 12,300 согласно [2]. Данные спектры отклика получены по результатам расчета на воздействия акселерограмм площадки ЮУАЭС, сгенерированных Институтом геофизики НАНУ. Значения суммарных инерционных нагрузок по формам колебаний, полученных для расчетной модели ЗО при воздействии обобщенных расчетных спектров реакции ПЗ,

были приложены к узлам детальной пространственной модели ЗО в виде статического эквивалента сейсмической нагрузки по направлению глобальных осей X, Y, Z.

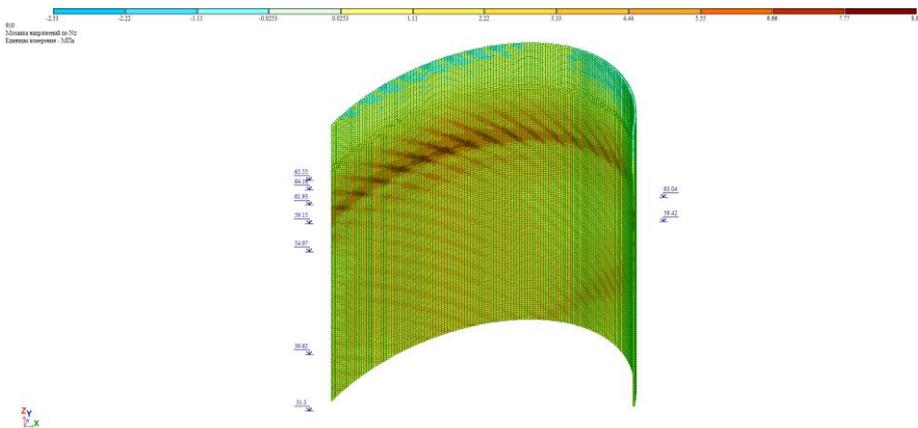


Рис. 5. Распределение вертикальных напряжений в наружном слое цилиндрической части защитной оболочки

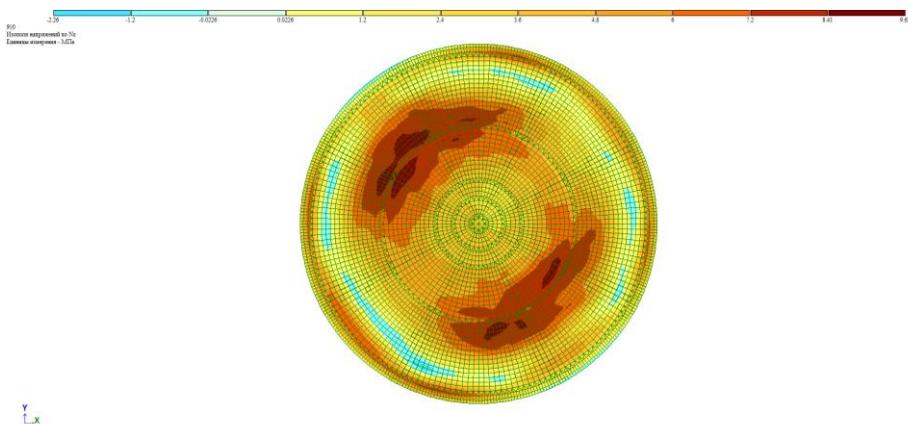


Рис. 6. Распределение радиальных напряжений в наружном слое купольной части защитной оболочки

Выполненная верификация расчетной модели ЗО свидетельствует о том, что величины усилий, напряжений и деформаций, полученные в результате расчета модели, отличаются от теоретических значений не более чем на 11%. Причем, это отличие работает «в запас» и может не

учитываться при выполнении дальнейших расчетов. Следовательно, разработанные компьютерные модели ЗО позволили выполнить расчетные оценки прочности и работоспособности СГО во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектном землетрясении, и могут быть использованы для дальнейших численных исследований.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны конечно-элементные модели защитной оболочки энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 типа В-302 и типа В-338 в составе: внутренняя стальная гермооблицовка, железобетонные ограждающие конструкции с преднапряженными армоканатами и наружным слоем с ненапрягаемой арматурой.

2. Выполнены расчеты моделей итерационным методом.

3. Разработан алгоритм проверки несущей способности железобетонных элементов и определения максимальных усилий в канатах при аварийных воздействиях.

4. В результате расчета моделей итерационным путем определены минимально допустимые усилия в канатах, которые обеспечивают соответствие ЛСБ-СГО требованиям нормативных документов во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектном землетрясении.

5. Разработанные компьютерные модели ЗО позволили решить задачи по продлению срока эксплуатации и могут быть использованы для выполнения численных экспериментальных исследований влияния определяющих факторов на несущую способность и надежность ЗАО.

6. Разработанные компьютерные модели ЗО были приняты государственной экспертизой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будівництво у сейсмічних районах України. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі: ДБН В.1.1-12:2014. – [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2014. – 118 с. - (Будівельні норми України).
2. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6.-98:2009. – [Чинні від 2010-09-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. - (Будівельні норми України).
3. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010. - [Чинний

від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с. – (Національні стандарти України).

4. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа: ПИН АЭ-5.6.
5. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций: ПНАЭ Г-5-006-87.
6. Нормы проектирования железобетонных сооружений локализирующих систем безопасности атомных станций: ПНАЭ Г-10-007-89.

REFERENCES

1. Construction in seismic regions of Ukraine. DBN V.1.1-12:2014 [Acting on 2014-10-01]. Kyiv: Minregion of Ukraine, 2014. – 118 p. (Building norms of Ukraine).
2. Construction of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions: DBN V.2.6.-98:2009. – [Acting on 2010-09-01]. – К.: Minregion of Ukraine, 2011. – 71 p. - (Building norms of Ukraine).
3. Construction of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules: DSTU B V.2.6-156:2010. - [Acting on 2011-06-01]. – К.: Minregion of Ukraine, 2011. – 118 p. – (National standards of Ukraine).
4. Standards of construction design NPPs with reactors of different types: ПИН АЕ-5.6.
5. Norms for earthquake resistant design of nuclear power plants: PNAE G-5-006-87.
6. Design standards for reinforced concrete structures of nuclear power plants localizing safety systems: PNAE G -10-007-89.

Статья поступила в редакцию 20.08.2015 г.