

НЕЛИНЕЙНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ЭНЕРГБЛОКА АЭС ПОСЛЕ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

Марьенков Н.Г., Бабик К.Н., Недзведская О.Г.
ГП «Государственный научно-исследовательский институт
строительных конструкций»

Крицкий В. Б.
Государственное предприятие «Государственный научно-технический
центр по ядерной и радиационной безопасности»
г. Киев, Украина

АННОТАЦІЯ: Запропонована інженерна методика оцінки граничного стану залізобетонних конструкцій захисної оболонки реакторного відділення енергблоку АЕС при сукупності впливів від проектної аварії та проектного землетрусу; виконано МСЕ-розрахунки НДС споруди від сейсмічних впливів, заданих акселерограмами і проектними спектрами, за методиками нормативних документів.

АННОТАЦИЯ: Предложена инженерная методика оценки предельного состояния железобетонных конструкций защитной оболочки реакторного отделения энергоблока АЭС при совокупности воздействий от проектной аварии и проектного землетрясения, выполнены МКЭ-расчеты НДС сооружения от сейсмических воздействий заданных акселерограммами и проектными спектрами по методикам нормативных документов.

ABSTRACT: Engineering method of assessment of limit condition of reinforced concrete constructions of NPP reactor containment at impacts of design accident and seismic loads is offered, the FEM-analysis at influences accelerograms and design spectra by methods of normative documents is performed.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защитная железобетонная оболочка, АЭС, расчетные модели, максимальная проектная авария, проектное землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные конструкции защитной оболочки (ЗО) реакторных отделений (РО) энергоблоков АЭС должны обеспечивать герметичность РО при совокупности внутренних технологических и внешних природных экстремальных воздействий, в частности, при температурно-силовых воздействиях в условиях максимальной проектной аварии (МПА) и при последующих динамических воздействиях от проектного землетрясения. Принимая во внимание существенные деформации железобетона ЗО при МПА, для обоснования несущей способности конструкции ЗО при знакопеременных сейсмических воздействиях в соответствии с [6...9] в расчетах необходимо учитывать особенности физически нелинейной работы бетона и арматуры.

1. НЕРЕШЕННЫЕ ЗАДАЧИ

В нормах [8, 9] содержатся требования по расчету зданий и сооружений, эксплуатируемых в сейсмических районах, с обязательным использованием инструментальных записей ускорений грунта, или сгенерированных акселерограмм (по результатам работ по сейсмическому микрорайонированию строительной площадки), а также с применением физически нелинейных динамических моделей сооружений. Уточненные нелинейные расчетные модели и результаты поверочных расчетов ЗО на воздействие максимальной проектной аварии (МПА) и проектного землетрясения являются основой для оценки прочности и герметичности железобетонных конструкций ЗО при эксплуатации энергоблока АЭС в течение проектного и сверхпроектного периодов.

2. КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ЗО

Защитная оболочка (рис. 1) является преднапряженной железобетонной конструкцией и выполнена в виде цилиндра толщиной 1,200 м с внутренним диаметром 45,000 м, сопряженного в верхней части с пологим сферическим куполом толщиной 1,100 м и внутренним радиусом 35,000 м. Цилиндрическая часть сооружения на отметке +11,800 м опирается на мощную железобетонную плиту перекрытия (стилобат). 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. Зона сопряжения цилиндра и купола ниже отметки +70,500 м усилена жестким железобетонным кольцевым карнизом, который является местом

анкеровки (АК) системы преднапряжения ЗО. Местом анкеровки АК цилиндрической части сооружения также служит стилобат.

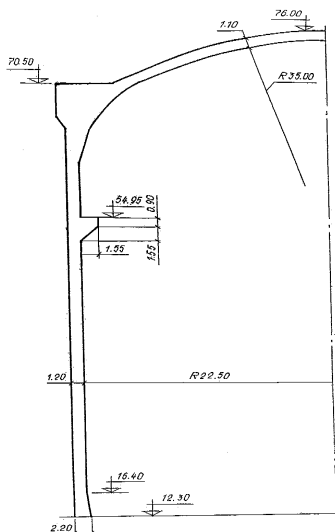


Рис. 1. Меридиональное сечение защитной оболочки реакторного отделения энергоблока АЭС

В целом геометрическая форма сооружения представляет собой тело вращения.

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЗО

Для проведения численных исследований были разработаны две трехмерные динамические компьютерные модели ЗО – детализированная (рис. 2, а) и упрощенная (рис. 2, б). Необходимость применения упрощенной модели обусловлена сложностями практической реализации шагового нелинейного статического расчета с учетом сейсмического воздействия, как это предусмотрено методом спектра несущей способности [7, 9, 13, 14].

Обе расчетные модели отражают пространственный характер сооружения, однако с разной степенью детализации учитывают конструктивные особенности защитной оболочки.

При формировании расчетных моделей, исходя из возможностей ПК ЛИРА САПР [2] использованы КЭ оболочки (универсальный треугольный и четырехугольный элемент оболочки), а также универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический элемент.

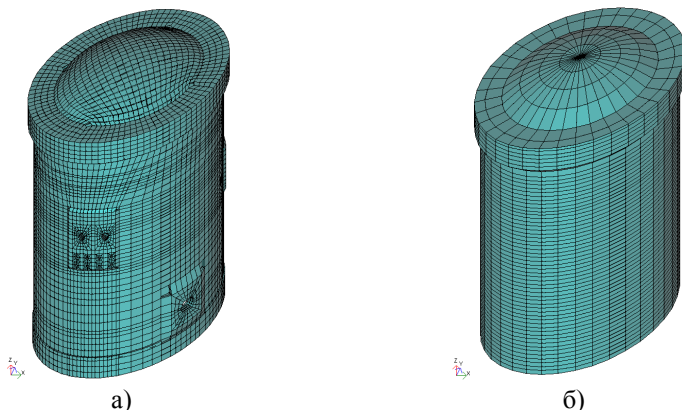


Рис. 2. Общий вид расчетных линейных динамических моделей

Детализированная расчетная модель (модель 1, рис. 2,а) в полной мере отражает конструктивные особенности защитной оболочки, включая железобетонную плиту стилобата, на которую опирается конструкция оболочки на отм. +11,800 м, а также зоны проходов трубопроводов питательной воды и главных паропроводов. Расчетная схема состоит из объемных конечных элементов (тип КЭ №36 – универсальный восьмиузловой изопараметрический), моделирующих работу железобетонных конструкций ЗО с отм. +6,350 м до отм. +76,000 м. Общая высота расчетной схемы от основания ЗО до верха покрытия составляет +69,650 м.

Упрощенная расчетная модель (модель 2, рис. 2,б) представляет собой сплошной осесимметричный цилиндр с куполом, параметры которых соответствуют конструктивным размерам ЗО, включая кольцевой карниз в зоне сопряжения цилиндра с куполом ниже отм. +70,500 м и консоль подкрановой балки на отм. +54,950 м. При этом конструкции стилобата и зоны проходов трубопроводов не моделировались. Расчетная схема образована объемными конечными элементами (КЭ №36), моделирующими работу железобетонных конструкций цилиндра ЗО с отм. +12,300 м до отм. +70,500 м, и оболочечными конечными элементами (КЭ №42 и КЭ №44), моделирующими работу купола покрытия с отм. +70,500 м до отм. +76,000 м. Общая высота расчетной схемы от основания ЗО до верха купола покрытия составляет +63,700 м.

Расчеты выполнены при помощи программного комплекса ЛИРА САПР [2, 13], который позволяет проводить численные научные исследования как линейных, так и нелинейных статических и динамических пространственных моделей зданий и сооружений.

4. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

Компьютерные модели рассчитаны на следующие нагрузки и воздействия:

- Расчетная постоянная нагрузка от собственного веса конструкций. Величина этой нагрузки определялась программно по плотности материалов и геометрическим параметрам конечных элементов с учетом коэффициента надежности по предельной нагрузке $\gamma_{fm} = 1,10$, принятым по таблице 5.1 [3];

- Расчетная снеговая нагрузка согласно [3];

- Сейсмическое воздействие, заданное расчетными спектрами реакции строительной площадки конкретной АЭС Украины [4].

Сейсмическое воздействие

Расчет пространственной динамической модели выполнен на сейсмические воздействия, заданные в виде поэтажных спектров сейсмической реакции на отм. +12,300 м. Акселерограммы площадки были сгенерированы Институтом геофизики НАНУ [5] и представляют сейсмическое воздействие МРЗ с максимальным (пиковым) расчетным ускорением $0,12g$.

Для получения характеристик воздействия, соответствующего ПЗ, ординаты спектров реакции для отм. +12,300 м умножены на коэффициент 0,5. В соответствии с рекомендациями [7, 9] для расчета предварительно напряженных железобетонных конструкций ЗО использованы спектры реакции для значения относительного затухания 2%. Так как сейсмические воздействия учитываются с учетом МПА (давление и температуры, что приводящие к неупругим деформациям конструкции ЗО), в МКЭ-расчетах использован спектр реакции для значения относительного затухания 5% согласно рекомендациям ДБН В.1.1-12 [8].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Анализ детализированной расчетной модели выполнен с учетом 200 форм. Расчетные данные позволили сделать вывод, что достаточно принимать 120 первых форм собственных колебаний ЗО.

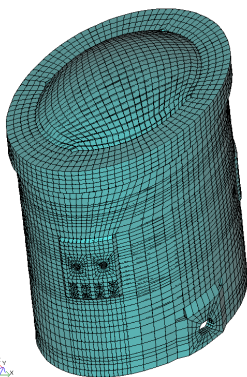
Расчет упрощенной расчетной модели выполнен с учетом первых 100 форм. Требования по числу учитываемых в расчете форм выполняются при учете трех форм колебаний модели ЗО.

Результаты модального анализа приведены в таблице 1.

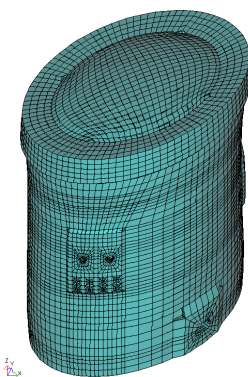
Формы собственных колебаний линейных моделей защитной оболочки приведены на рис. 3 и 4.

Динамические характеристики компьютерных моделей 30

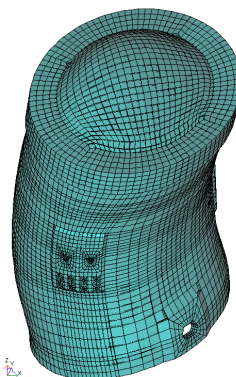
Расчетная модель							
детализированная				упрощенная			
Форма колебаний	Частота, Гц	Период, с	Σ мод. масс, %	Форма колебаний	Частота, Гц	Период, с	Σ мод. масс, %
1	3.37	0.30	64.89	1	3.89	0.26	73.88
10	9.79	0.10	71.89	8	11.02	0.09	77.35
11	11.81	0.08	76.76	10	13.01	0.08	87.99
21	16.81	0.06	78.88				
37	21.58	0.05	80.67				
...							
120	40.48	0.02	85.01				



1 форма

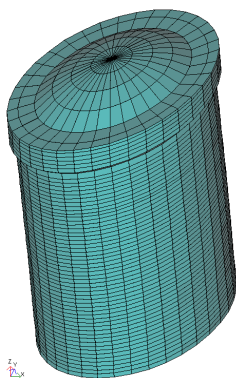


10 форма

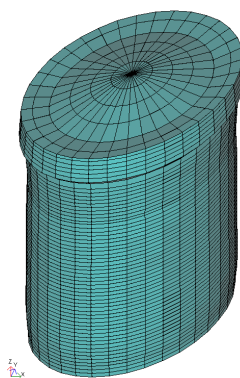


11 форма

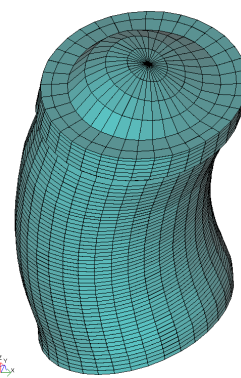
Рис. 3. Формы собственных колебаний детализированной расчетной модели



1 форма



8 форма



10 форма

Рис. 4. Формы собственных колебаний упрощенной расчетной модели

6. ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

С целью верификации разработанных расчетных моделей ЗО были проанализированы данные исследований динамических характеристик аналогичных ЗО, полученных в натуральных условиях и по результатам физического и математического моделирования [10, 11].

Натурные динамические исследования проведены сотрудниками МГСУ на 10 оболочках реакторов ВВЭР-1000 четырех АЭС, работающих в штатном режиме на территории России [10]. В результате проведенных натурных экспериментов были получены записи колебаний исследованных объектов. Датчики измерения колебаний располагались в следующих точках:

- для отдельно стоящих оболочек: в центре купольного покрытия, на опорном кольце купольного покрытия и на грунте рядом с исследуемым объектом;

- для оболочек с обстройкой: в центре купольного покрытия, на опорном кольце купольного покрытия, на покрытии обстройки и на фундаментной плите.

После построения и анализа энергетических спектров колебаний был получен набор собственных частот исследованных объектов в диапазоне от 1 до 20 Гц. Данные, полученные на различных объектах, обобщены и сравнены между собой, в результате чего все зарегистрированные частоты разбиты на 3 условных группы:

- собственные частоты всего сооружения как жесткого тела на упругом основании;

- собственные частоты цилиндрической части оболочки реактора и обстройки;

- собственная частота купольного покрытия оболочки.

Значения зарегистрированных собственных частот ЗО всех исследованных объектов представлены в таблице 2.

Модельные исследования [11] проводились на серии геометрически подобных моделей защитных оболочек, изготовленных по специальным технологиям из гипса в масштабе 1:100 и из оргстекла в масштабе 1:200. Модели монтировались на специально сконструированном вибростенде. С помощью вибростенда создавались гармонические колебания модели ЗО. В результате плавного изменения частоты динамического воздействия определялись частоты резонансных колебаний ЗО. Частоты собственных колебаний оболочки, определенные на модели, были пересчитаны на натуру по условиям подобия (таблица 3).

Таблица 2

Частоты собственных колебаний по данным исследований оболочек АЭС [10]

Номер оболочки	Объект	Частоты колебаний конструкций, Гц	
		оболочки и обстроя	купольного покрытия
1	Нововоронежская АЭС	-	17,6
2	Ростовская АЭС	6,5-6,8; 7,7; 8,3	17,0
3		6,4-6,7; 7,8	17,6
4	Балаковская АЭС	4,96; 5,48; 6,68; 8,08-8,14; 9,90	19,5
5		7,5; 8,3-8,4; 9,0; 9,5	13,3
6		4,40-4,64; 6,50-6,75; 9,5-9,9	18,0
7		4,40-4,56; 6,55-6,85; 7,40-7,77; 9,70-9,90	19,5
8	Калининская АЭС	-	18,3
9		-	18,7
10		2,11; 2,80; 4,38; 4,70; 5,29; 6,40-6,57; 10,70; 13,60; 14,9	18,5

Таблица 3

Сравнение результатов расчета, модельных и натуральных экспериментов по данным [11]

Формы колебаний	Частота колебаний, Гц, полученная		
	по модели	по расчету	опытные данные
1, 2	5,3	5,52	-
3, 4	7,7	9,05	-
5, 6	9,1	9,89	-
10, 11	12,5	12,88	-
17, 18	16,7	18,07	-
24,25	19,5	20,6	18,3

Анализ приведенных натуральных и расчетных данных показывает, что преобладающие частоты собственных колебаний ЗО реактора находятся в диапазоне 2,8 – 6,85 Гц и 17,0 – 19,5 Гц.

Сравнение динамических характеристик, полученных по детализированной и упрощенной пространственным моделям авторов данной статьи, показывает приемлемое соответствие приведенным выше опытным данным и расчетным значениям, полученным другими авторами. Значения расчетных преобладающих частот собственных колебаний ЗО (получены по ПК ЛИРА САПР) равны 3,35 Гц и 3,89 Гц по

детализированной и упрощенной моделям, соответственно, а также 17,05 Гц и 17,99 Гц, соответственно, для купольного покрытия.

Таким образом, обе разработанные модели могут быть использованы для определения инерционных нагрузок при расчете на сейсмическое воздействие, заданное в виде спектров реакции на отм. +12,300 м, и дальнейших нелинейных статических расчетов по методу спектра несущей способности. При этом использование упрощенной расчетной модели является более предпочтительным, так как она характеризуется значительно меньшим числом неизвестных, что существенно сокращает время нелинейного статического расчета.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Значения инерционных нагрузок на конструкции ЗО определены на основании упрощенной расчетной модели при воздействии спектров реакции на отм. +12,300 м, соответствующим интенсивности сейсмического воздействия ПЗ и значению относительного затухания 5%.

При определении сейсмических нагрузок число учитываемых форм собственных колебаний должно быть таким, чтобы сумма модальных масс составляла не менее 85 % их полной суммы при горизонтальных воздействиях и не менее 75 % при вертикальном воздействии [8].

Число учтенных в расчете форм колебаний составляет:

- при сейсмическом воздействии по оси X - 2 (сумма учтенных модальных масс – 87,99%);
- при сейсмическом воздействии по оси Y - 2 (сумма учтенных модальных масс – 87,98%);
- при сейсмическом вертикальном воздействии (ось Z) - 2 (сумма учтенных модальных масс – 80,54%).

Значения суммарных инерционных нагрузок по формам колебаний, полученные для моделей ЗО при воздействии расчетных спектров реакции, были использованы для выполнения нелинейного расчета ЗО с учетом последовательности загрузки (МПА и затем сейсмические горизонтальные и вертикальные нагрузки при ПЗ).

8. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ЗО

Вариант 1. Нелинейный статический расчет выполнен по упрощенной пространственной модели 2 с учетом физической нелинейности бетона и арматуры на нагрузки МПА (внутреннее давление

на 30 - с учетом обжатия канатами, принято равным 0,12 МПа) и затем сейсмические горизонтальные (по оси X) и вертикальные нагрузки при ПЗ.

Картины образования трещин и изополя нелинейных перемещений узлов расчетной модели 30 приведены на рис. 5, 6.

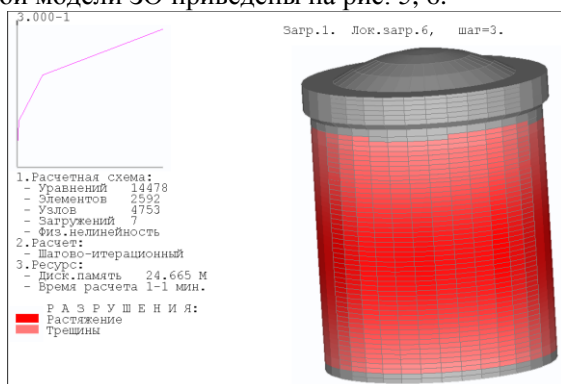


Рис. 5. Картина образования трещин в 30 АЭС при максимальной проектной аварии (при проценте армирования 30 и купола 4%)

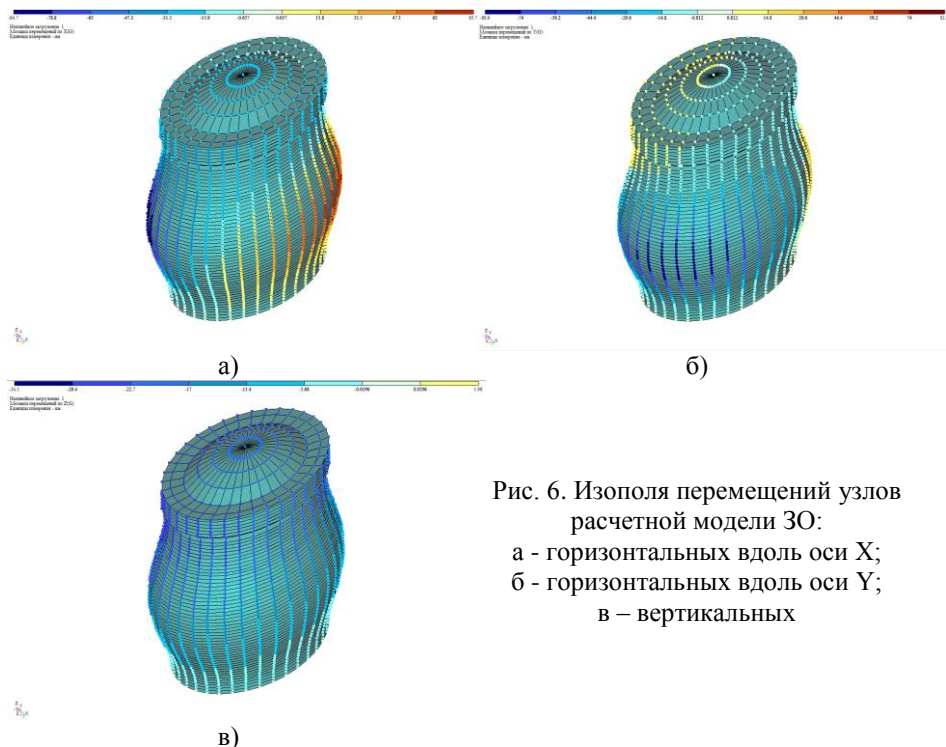


Рис. 6. Изополя перемещений узлов расчетной модели 30:
 а - горизонтальных вдоль оси X;
 б - горизонтальных вдоль оси Y;
 в – вертикальных

При этом учтена следующая история нагружения: статические вертикальные нагрузки – загрузки 1 (собственный вес) и 2 (снег); МПА - загрузка 6; горизонтальные сейсмические нагрузки по оси X - загрузка 3; вертикальные сейсмические нагрузки - загрузка 5 при проектном землетрясении.

Изополю напряжений и максимальных изгибающих моментов в цилиндрической части ЗО и куполе приведены на рис. 7, 8. Изополю напряжений в арматуре приведены на рис. 9.

Следует отметить, что максимальное расчетное значение напряжения в арматуре (σ_r) получено равным 349 МПа, что меньше предела текучести арматуры (390 МПа).

Вариант 2. На втором этапе численных исследований проведены расчеты нелинейной модели ЗО при учете снижения жесткости конструкций цилиндрической части и купола вследствие образования трещин после максимальной проектной аварии. При этом в нелинейном нагружении 1 была принята такая история: 1, 2 локальные загрузки (статические вертикальные нагрузки) и 3-е локальное нагружение (сейсмическое воздействие по оси X).

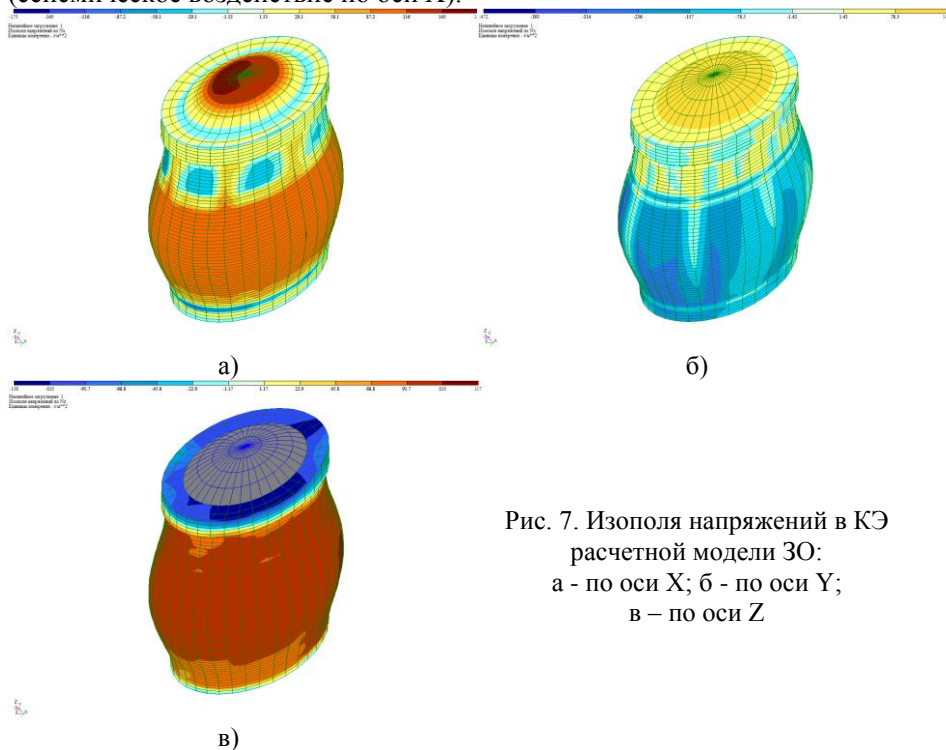


Рис. 7. Изополю напряжений в КЭ расчетной модели ЗО:
а - по оси X; б - по оси Y;
в – по оси Z

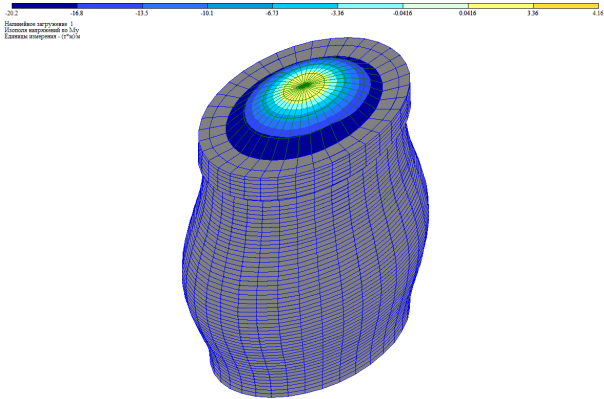


Рис. 8. Изополю изгибающих моментов M_y в КЭ модели ЗО

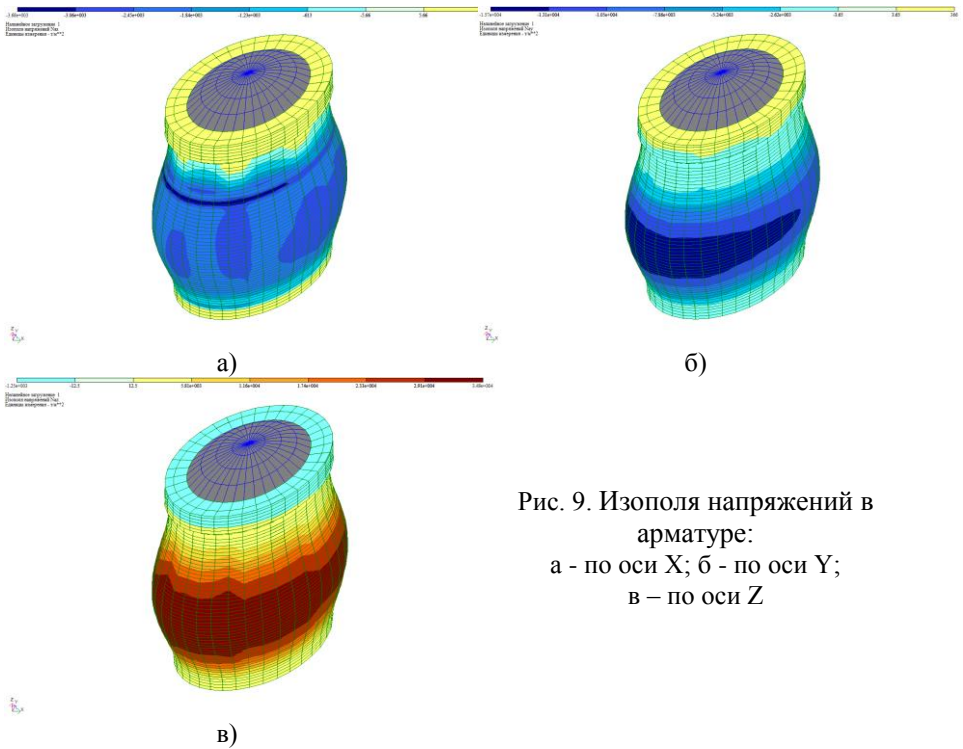


Рис. 9. Изополю напряжений в арматуре:
 а - по оси X; б - по оси Y;
 в – по оси Z

На рис. 10 приведены картины образования трещин в железобетонных конструкциях на последних шагах нагружений.

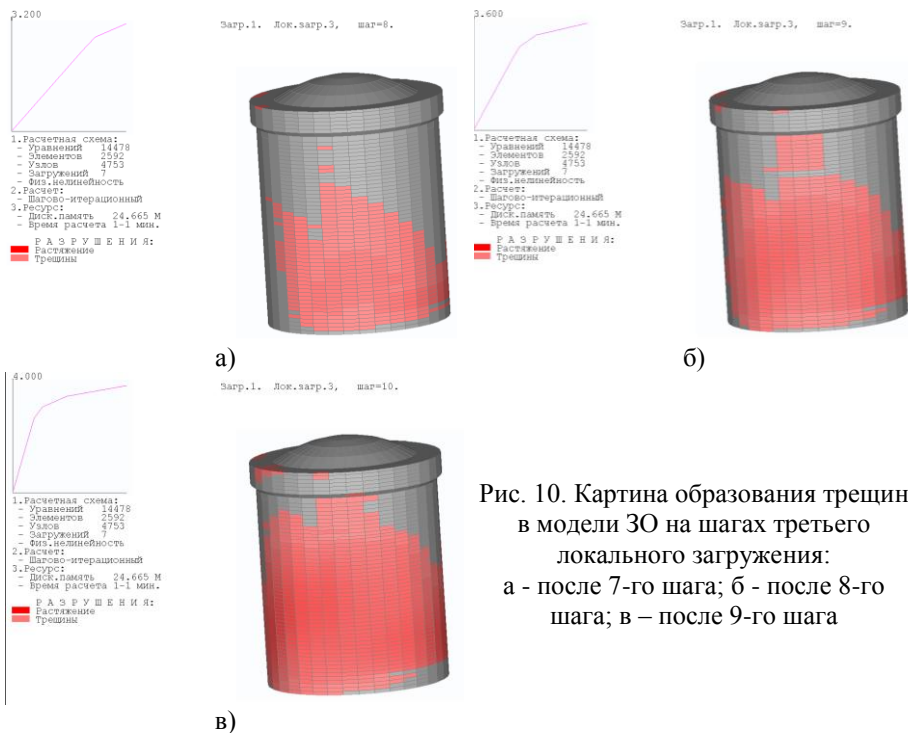


Рис. 10. Картина образования трещин в модели 3О на шагах третьего локального нагружения: а - после 7-го шага; б - после 8-го шага; в – после 9-го шага

На рис. 11 представлены: график зависимости спектра несущей способности (СНС) «ускорение a , m/s^2 – перемещение d , м» 3О и график проектного сейсмического воздействия по ДБН [8] при 8 баллах и II-й категории грунтов по сейсмическим свойствам («San - Sdn»). Анализ расчетных данных показал, что максимальное перемещение верха 3О (точка пересечения кривых) не превышает 0,02 м при интенсивности сейсмических воздействий 8 баллов и при проектном спектре воздействия.

На рис. 12 приведена зависимость относительных перемещений цилиндрической части 3О на разных отметках от сдвигающих сейсмических нагрузок по оси X (при 8 баллах). Полученные данные были использованы при расчете перекосов 3О.

На рис. 13 приведена зависимость перекосов 3О по ее высоте и допустимые значения перекосов монолитных железобетонных зданий по ДБН [8] при уровне сейсмического воздействия 6 баллов (СЗ - слабое землетрясение) и при проектном землетрясении (ПЗ). Из рисунка следует, что при максимальной проектной аварии и при интенсивности землетрясений 6 и 7 баллов сейсмостойкость 3О АЭС обеспечивается.

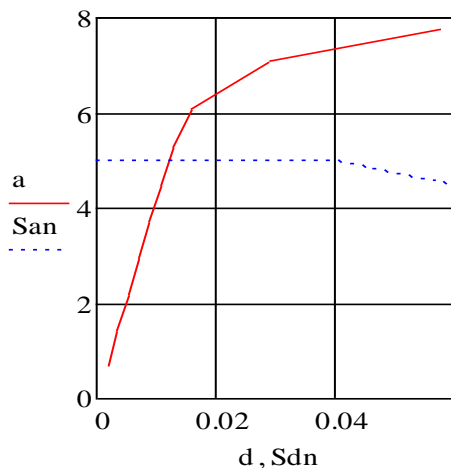


Рис. 11. График зависимости СНС «ускорение a , м/с^2 – перемещение d , м » 30 и проектное сейсмическое воздействие по ДБН [8] при 8 баллах и II-й категории грунтов по сейсмическим свойствам

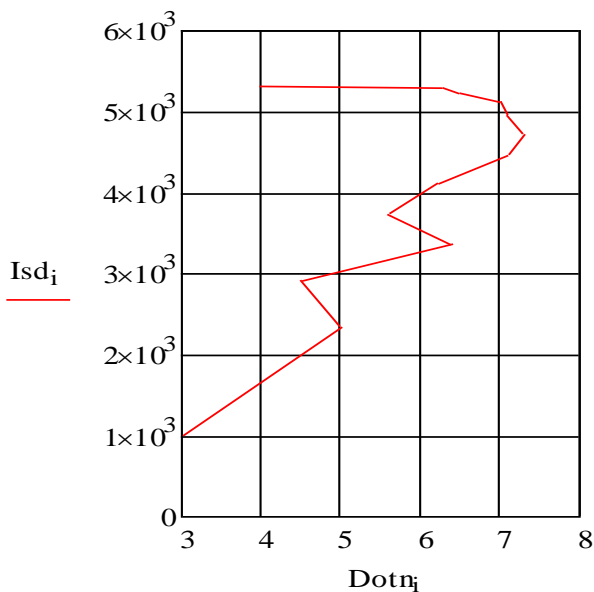


Рис. 12. График зависимости относительных перемещений 30 на разных отметках (Dopn , мм) от сдвигающих сейсмических нагрузок (Isd , кН) по оси X, соответствующих 8 баллам

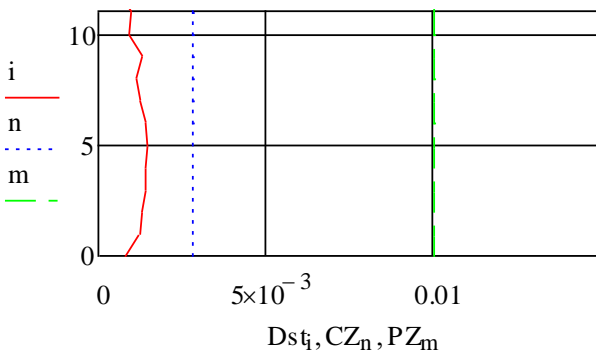


Рис. 13. График зависимости расчетных значений перекопов 30 на разных отметках (Dst_i) и допустимых перекопов по ДБН [8] при слабом (CZ_n - перекоп 0,0028) и проектном землетрясении (PZ_m - перекоп 0,01)

В заключение отметим, что практическое значение представляет проведение численных исследований сейсмостойкости 30 АЭС с учетом максимальной проектной аварии и учета элементов системы преднапряжения железобетонных конструкций на воздействия акселерограмм площадок строительства АЭС.

ВЫВОДЫ

1. Для выполнения нелинейных статических расчетов возможно использовать упрощенную пространственную модель 30. Проведенная верификация динамических расчетных моделей подтвердила такую возможность (расчетные и опытные значения частот собственных колебаний 30 отличаются на 8 %).

2. При максимальной проектной аварии и сейсмических воздействиях интенсивностью 6 и 7 баллов сейсмостойкость несущих железобетонных конструкций защитной оболочки АЭС обеспечена.

3. Практическое значение представляет проведение численных исследований сейсмостойкости 30 с учетом максимальной проектной аварии и учета элементов системы преднапряжения железобетонных конструкций на воздействия акселерограмм площадок строительства АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет по теме: «Разработка расчетной модели защитной оболочки энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 типа В-302 для определения минимально допустимых усилий натяжения армоканатов и оценки прочности и надежности локализирующей системы безопасности в условиях сочетания проектной аварии и проектного землетрясения» - ГП НИИСК. – Киев, 2014 г. – 115 с.
2. ЛИРА 9.4. Руководство пользователя. Основы. Учебное пособие. Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Боговис В.Е., Гензерский Ю.В., Гераймович Ю.Д., Марченко Д.В., Титок В.П. - Киев: издательство «ФАКТ», 2008.
3. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. - Мінбуд України. – Київ: 2006. - 78 с.
4. Отчет о НИР «Расчетное обоснование поэтажных спектров ответа при квалификации оборудования на сейсмическое воздействие 0,12g» - Днепропетровск, 2011 г. – 85 с.
5. Отчет по теме: «Пересчет акселерограмм и спектров реакции для моделирования воздействий на грунте, соответствующих максимальным ускорениям больше $0,1g$ » - Национальная академия наук Украины. Институт геофизики им. С.И. Субботина. - Киев – Львов 2011 г. – 45 с.
6. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1998. – 255 с.
7. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants/ Regulatory Guide 1.60// U.S. Nuclear Regulatory Commission. Dec. 1973
8. Будівництво у сейсмічних районах України. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі: ДБН В.1.1-12:2006. – [Чинні від 2007-01-02]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2006. – 77 с. - (Будівельні норми України).
9. ПН АЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 22 с.
10. Сергеевцев Е.Ю. Натурные исследования динамических характеристик гражданских и энергетических объектов/ Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - МГСУ, 2012. – 20 с.
11. Исследование динамических характеристик защитных оболочек АЭС на физических и математических моделях и в натуральных условиях/ [П.И. Андреева, С.И. Завалишин, Г.Э. Шаблинский]// Вестник МГСУ, 2013. - № 11. - с. 114 - 122.
12. Железобетонные стены сейсмостойких зданий: Исследования и основы проектирования: Совм. изд. СССР-Греция/ Под ред. Г.Н.Ашкинадзе, М.Е.Соколова.- М.: Стройиздат, 1988. - 504с.
13. Городецкий А.С., Гераймович Ю.Д. Прямой динамический расчет зданий на сейсмические воздействия с учетом физически нелинейной работы материала конструкций // Будівельні конструкції: Зб. наук. пр. - К. : НДІБК, 2006. - Вип. 64.- С. 80-87.

14. Мар'єнков М.Г. Експериментально-теоретичні методи оцінки сейсмостійкості будівель. – Автореф. дис... доктора техн. наук. – Одеса, 2013: ОДАБА. – 37 с.

REFERENCES

1. Report: «Development of the NPP containment computational model with reactor WWER-1000 type B-302 to determine the minimum allowable tensile reinforcement and assess the strength and reliability of localizing safety systems in terms of a combination of design-basis accidents and design basis earthquake» (2014) - SE NIISK. – Kyiv – 115 p. [in Russian].
2. LIRA 9.4. User manual. Tutorial. Strelets-Streletsky Ye.B., Bogovis V.Ye., Genzersky Yu.V., Geraymovich Yu.D., Marchenko D.V., Titok V.P. (2008) Kyiv: publishing company «ФАКТ» [in Russian].
3. Loadings and impact. Design standards. (2006) DBN V.1.2-2:2006 [Acting on 2007-01-01]. – K.: Minregion of Ukraine – 77 p. - (Building norms of Ukraine). [in Ukrainian].
4. Scientific Report: «Estimated evaluation of floor response spectra at the equipment qualification for seismic impact 0.12 g» (2011) Dnepropetrovsk. – 85 p. [in Russian].
5. Scientific Report: «Recalculation of the accelerograms and response spectra modeling of impacts on the soil corresponds to the maximum accelerations greater than 0.1g» (2011) National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin. Kyiv – Lviv. – 45 p. [in Russian].
6. Birbraer A.N. Seismic Analysis of Structures (1998) St.Petersburg: Nauka, 1998. – 255 p. [in Russian].
7. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants/ Regulatory Guide 1.60// U.S. Nuclear Regulatory Commission. Dec. 1973
8. Construction in seismic regions of Ukraine. (2014). DBN V.1.1-12:2014 [Acting on 2010-09-01]. Kyiv: Minregion of Ukraine (Building norms of Ukraine). [in Ukrainian].
9. Norms for earthquake design of nuclear power plants: PNAE G-5-006-87. [in Russian].
10. Sergeevtsev Ye.Yu. Naturnye issledovaniya dinamicheskikh kharakteristik grazhdanskikh i energeticheskikh objektov [In situ study of dynamic characteristics of civil and energy facilities] (2012) Author's abstract. thesis. ... Cand.Tech.Sci. – MGSU – 20 p. [in Russian].
11. Andreeva P.I., Zavalishin S.I., Shablinskiy G.E. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik zashchitnykh obolochek AES na fizicheskikh matematicheskikh modelyakh i v naturnykh usloviyakh [Dynamic Characteristics Investigations of Nuclear Power Plants Containment Shells Using Physical and Mathematical Models and Real Projects]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 11, pp. 114—122. [in Russian].

12. Reinforced concrete walls for earthquake resistant buildings: Research and design principles: Collab. ed. USSR-Greece (1988)/ Ed. by G.N. Ashkenaze, M.E. Sokolova. Moscow, Stroyizdat – 504 p. [in Russian].
13. Gorodetsky A.S., Yu.D. Gerasimovich Pryamoj dinamicheskiy raschet na seismicheskie vozdeystviy s uchetom fizicheski nelineynoy raboty materiala konstrukciy [Direct dynamic analysis of buildings for seismic actions with regard to physically nonlinear work of structure material] (2006) - Building structures: proceedings of SE NIISK, 64.- p. 80-87. [in Russian].
14. Maryenkov N.G. Eksperymentalno-teoretichni metody otsinky seismostiynosti budivel [Experimental and theoretical methods of evaluating the seismic resistance of buildings]. (2013) – Author's abstract. thesis ... doc.tech.sci. – Odesa, ODABA – 37 c. [in Ukrainian].

Статья поступила в редакцию 25.08.2015 г.