

П.З.Луговой¹, В.Б.Крицкий², Н.И.Крицкая²

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
И КОЛЕБАНИЯ ОБОЛОЧКИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗКАХ**

¹*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины,*

ул. Нестерова, 3, 03057, г. Киев, Украина; e-mail: plugovyy@inmtech.kiev.ua

²*Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности,
ул. Василя Стуса, 35 - 37, 03142, г. Киев, Украина, e-mail: krts@ukr.net*

Abstract. A dynamic behavior of a ferroconcrete shell-like containment (SLFC) of a nuclear power plant unit is analyzed for the case of combined action of the caused by reactor unit breakdown internal pressure jump and by seismic effect of design earthquake. The finite element method and the software “DIPROS” are used. Basing on the modal analysis and following numerical solving the motion equation for SLFC, the stress-strain state of structural elements of the containment in the post-damage period is determined. It is shown that the maximal intensity of stresses in the pressurizing steel coating (PSC) does not exceed the yield strength of PSC (that is, the integrity of PSC is saved, the SLFC is serviceable and ensures the requirements of radiation safety).

Key words: ferroconcrete shell-like containment, nuclear power plant unit, liner, tendon, reactor unit breakdown, internal pressure jump, seismic effect of design earthquake, nuclear and radiation safety, stress-strain state, finite element method.

Введение.

Оболочки сложной формы (ОСФ) реакторных отделений (РО) энергоблоков АЭС являются компонентами системы глубоководной защиты [12] реакторной установки (РУ), изолируют РУ от внешних природных и техногенных воздействий, а также обеспечивают локализацию радиоактивных веществ в подоболочечном пространстве при потенциально возможных авариях в РО. ОСФ представляет собой комбинированную тонкостенную конструкцию, образованную цилиндрической (вертикальные стены толщиной 1,2 м) и сферической (покрытие-купол толщиной 1,1 м) оболочками, имеющими двухслойную структуру – наружный слой предварительно напряженного железобетона и внутренний слой металла – герметизирующая стальная облицовка (ГСО) толщиной 8 мм.

Внутренний диаметр цилиндрической части ОСФ равен 45,00 м, внутренний радиус сферического купола – 35,60 м. Цилиндрическая часть сооружения на отметке 11,80 м опирается на мощную железобетонную плиту-перекрытие толщиной 2,5 м. Высшая точка наружной поверхности купола (полус) имеет отметку 75,95 м.

Зона сочленения цилиндра и купола ниже отметки 70,50 м выполнена в виде жесткого железобетонного кольцевого карниза, на котором расположены анкерные устройства арматурных канатов (АК) купольной и цилиндрической частей системы предварительного напряжения ОСФ (СПЗО). Анкерные устройства АК цилиндрической части сооружения расположены также в нижней части опорной плиты ОСФ на отметке 9,30 м.

В цилиндрической части ОСФ ниже анкерного карниза на отметке 54,95 м находится верх кольцевой консоли, по которой уложен подкрановый рельс мостового крана кругового действия РО.

В целом сооружение представляет собой геометрическую форму, близкую к телу вращения.

Ниже в работе дан анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) и динамического поведения ОСФ, в условиях максимальной проектной аварии (МПА) с экстремальными значениями давления в РО и воздействия проектного землетрясения (ПЗ). Критерием отказа ОСФ (потери локализирующей функции) является нарушение целостности ГСО. Условие достижения указанного критерия отказа – равенство/превышение интенсивностью напряжений в материале ГСО предела текучести металла (согласно условию пластичности Губера – Мизеса – Генки [21]).

Для расчета НДС и динамического поведения ОСФ в принципе можно использовать теорию слоистых оболочек или оболочек на упругом основании [2, 9, 18 – 20]. Но описанные в этих работах методы не вполне приемлемы для расчета ОСФ – сложной оболочечной конструкции, которая имеет ряд локальных нерегулярностей геометрической формы (отверстия, местные утолщения, изломы поверхности, др.), а также неоднородность составляющих конструкцию материалов. Поэтому для расчета НДС и динамического поведения ОСФ использовано программное обеспечение (ПО) «ДИПРОС» [3, 4], реализующее вариант метода конечных элементов (МКЭ), известный как моментная схема конечных элементов (МСКЭ) [12], а также соответствующие модифицированные численные алгоритмы решения уравнений движения МКЭ-модели [3 – 6, 10] при расчетных динамических нагрузках (скачок внутреннего давления в ОСФ от МПА и сейсмическое воздействие на ОСФ от ПЗ).

По рассматриваемой проблеме – воздействию на ОСФ сочетания нагрузок МПА +ПЗ в работе [8] исследована нелинейная сейсмическая реакция защитной оболочки энергоблока АЭС. Цель данной работы – исследование с помощью разработанного ПО «ДИПРОС» [3, 4], реализующего методологию МКЭ/МСКЭ [22], и соответствующих численных алгоритмов [2 – 6] возможности отказа ОСФ (потери локализирующей функции гермоограждения) вследствие нарушения целостности ГСО в условиях комбинации технологических воздействий от МПА в РО (скачка давления) и сейсмической нагрузки на ОСФ от ПЗ.

§1. Постановка задачи. Принятые гипотезы. Особенности моделирования объекта и воздействий на него. Основные уравнения.

Рассматриваемая ОСФ представляет собой двухслойную тонкостенную конструкцию, образованную цилиндрической и сферической оболочками, наружный слой которых выполнен из предварительно напряженного железобетона, а внутренний – ГСО – из стали толщиной 8 мм. Сложность геометрии и системы рассматриваемых экстремальных воздействий на ОСФ (аварийное давление, проектное землетрясение) не позволяет при анализе НДС и динамического поведения ОСФ получить достоверные результаты аналитическими методами. В связи с этим становится актуальным выбор приемлемого (эффективного) для решения рассматриваемой задачи численного метода.

Принимая во внимание особенности рассматриваемой задачи, для анализа НДС и динамического поведения ОСФ в аварийных условиях применен (МКЭ).

На этапе построения расчетной модели ОСФ принят ряд упрощающих гипотез и допущений, которые выбраны и приняты с целью обеспечения высокого уровня консервативности расчетных оценок НДС сооружения.

По толщине ОСФ моделировалась 4-мя слоями КЭ (3 наружные слоя бетона и 1 внутренний слой металла, соответствующий ГСО (рис. 4).

Принято, что в пределах объема одного конечного элемента (КЭ) материал ОСФ является изотропным. Характеристики слоев стенки ОСФ, принятые для расчета – приведенные расчетные физико-механические характеристики материала каждого слоя (учитывающие физико-механические характеристики бетона, ненапрягаемой и/или предварительно напряженной арматуры, наличие пустот-каналообразователей) – представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ слоя	Конструктивные особенности слоя	Внутренний радиус и толщина слоя, м	Приведенные расчетные физ.-мех. характеристики материала слоя	
			Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
1	Металлическая гермооблицовка – стальной лист	22,500 0,008	206000	0,300
2	Железобетон – бетон, внутренняя кольцевая и меридиональная ненапряженная арматура	22,508 0,280	33976	0,2052
3	Железобетон – бетон, каналобразователи, армоканаты СПЗО	22,788 0,724	31187	0,2099
4	Железобетон – бетон, внешняя кольцевая и меридиональная ненапряженная арматура	23,512 0,188	34740	0,2077

Расчетная многофрагментная МКЭ-модель ОСФ образует квазирегулярную (регулярную в границах каждого фрагмента) сеточную область. Необходимая плотность (густота) МКЭ-сетки, обеспечивающая приемлемую точность результатов расчета, была определена путем выполнения ряда вычислительных экспериментов. Выбор оптимальной «степени» МКЭ-дискретизации осуществлен по следующим качественным критериям:

- возможность детальной аппроксимации зон нерегулярной геометрии объекта (отверстий, местных утолщений, изломов поверхности, др.);
- корректность формы примененных объемных КЭ – ее близость к прямоугольному параллелепипеду;
- реалистичность (гладкость, неэкстремальность) получаемых функций и значений перемещений и напряжений в конструкции ОСФ, согласованность указанных значений с результатами упрощенных инженерных расчетов (для регулярных областей ОСФ);
- ограниченность требуемых ресурсов вычислительной техники (оперативной и внешней памяти, быстродействия, общего времени счета и т.п.).

Поперечный разрез ОСФ, расчетная МКЭ-модель ОСФ в целом, а также зон нерегулярной геометрии объекта (отверстий, местных утолщений, изломов поверхности, др.), детальная структура стенки цилиндрической части ОСФ представлены на рис. 1 – 4.

Для математического описания сооружения и построения расчетной МКЭ-модели ОСФ применены глобальная декартова и местные («привязанные» к центру конкретного КЭ) косоугольные системы координат.

Направление глобальных декартовых координатных осей согласуется со строительными осями ОСФ и принято следующим:

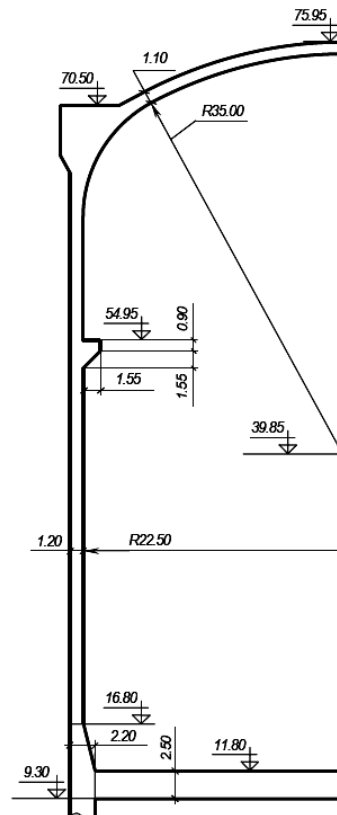


Рис. 1

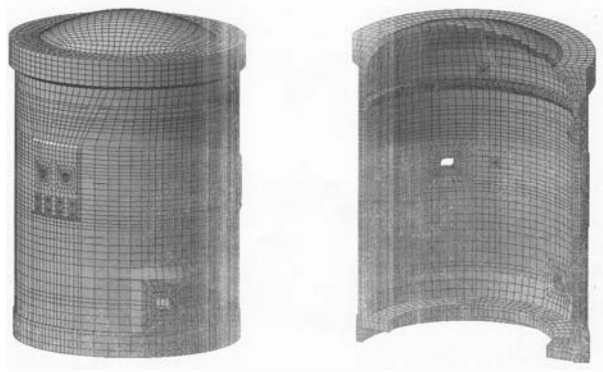


Рис. 2

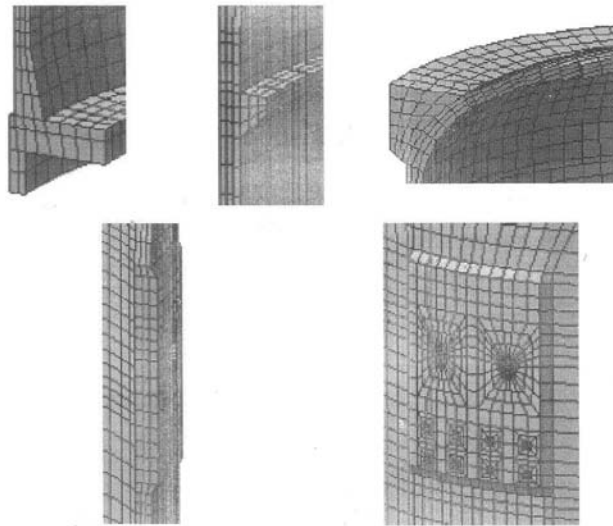


Рис. 3



Рис. 4

центр глобальной декартовой системы координат расположен на пересечении горизонтальной плоскости с нулевой строительной отметкой и вертикальной оси симметрии ОСФ;

ось z^1 – лежит в плоскости основания ОСФ и направлена перпендикулярно плоскости чертежа (с учетом аксонометрической проекции) на наблюдателя;

ось z^2 – лежит в плоскости основания ОСФ и направлена в плоскости чертежа слева направо;

ось z^3 – совпадает с осью симметрии ОСФ и направлена из центра фундамента сооружения к вершине купола.

Оси местных («привязанных» к центру конкретных КЭ) косоугольных систем координат «сопровождают» геометрию ОСФ; их направление принято следующим:

центры местных (конечноэлементных) косоугольных систем координат совпадают с геометрическими центрами КЭ;

ось x^1 – совпадает с направлением внешней нормали к срединной поверхности ОСФ;

ось x^2 – ориентирована в окружном направлении ОСФ против часовой стрелки при наблюдении со стороны купола;

ось x^3 – направлена вдоль меридиана ОСФ от ее основания к вершине купола.

Расчет НДС и динамического поведения ОСФ выполняем для условий воздействия на сооружение следующих нагрузок:

собственный вес конструкций сооружения;

усилия обжатия сооружения арматурными канатами системы преднапряжения;

аварийное давление паровоздушной смеси 0,35 МПа (избыточное). в подоболочечном пространстве;

сейсмическое воздействие от проектного землетрясения интенсивностью 6 баллов.

Процедура задания нагрузки на ОСФ от собственного веса конструкций сооружения принята стандартной для МКЭ и по этой причине здесь не детализируется.

Моделирование силового воздействия на ОСФ от обжатия армоканатами СПЗО осуществлено по методике, учитывающей реальные траектории каналообразователей системы преднапряжения.

Величина усилия натяжения АК в заданной точке его траектории определена с учетом потерь усилия по длине АК из-за трения между АК и поверхностью каналообразователя. Функция изменения усилия натяжения АК по его длине принята согласно зависимости, приведенной в СНиП 2.03.01-84 (п. 1.25, табл. 5, поз. 4) [10], и имеет вид: $N = N_0 e^{-\delta\theta}$, N_0 – величина усилия натяжения АК на тяжном анкере (принимается 722,8 тс для АК цилиндра и 696,7 тс для АК купола); $\delta = 0,089$ – обобщенный коэффициент трения между АК и поверхностью каналообразователя (определен экспериментально); θ – интегральный (накопленный) угол закрутки касательной к траектории АК по отношению к ее исходному положению на тяжном анкере АК.

Как следствие, сила трения между АК и поверхностью каналообразователя F и сила давления АК на КЭ Q будут равны:

$$F = N_0 (e^{-\delta\theta_2} - e^{-\delta\theta_1}) = N_2 - N_1 ;$$

$$Q = N_0 (e^{-\delta\theta_2} + e^{-\delta\theta_1}) (\theta_2 - \theta_1) = (N_2 + N_1) (\theta_2 - \theta_1) ,$$

где N_1, N_2 – величина усилия натяжения АК в точках «входа» в КЭ и «выхода» из КЭ; θ_1, θ_2 – интегральный (накопленный) угол закрутки касательной к траектории АК в точках «входа» в КЭ и «выхода» из КЭ.

В соответствии с принятой методикой рассчитана величина силового воздействия АК на каждый конечный элемент с последующим пересчетом этого воздействия к эквивалентному вектору усилий в узлах КЭ. Т.е. таким образом, чтобы обеспечить предварительное обжатие конструкции, эквивалентное воздействию от СПЗО. Процедура вычисления вектора узловых нагрузок в КЭ от усилий натяжения АК СПЗО реа-

лизована следующей последовательностью операций: определение АК, траектории которых пересекают рассматриваемый КЭ; определение координат точек T_1, T_2 пересечения траекторией АК ограничивающих поверхностей КЭ; определение компонентов вектора усилия натяжения АК в точках T_1, T_2 (с учетом: величины усилия натяжения АК на анкере; потерь усилия натяжения по длине АК вследствие его трения о поверхность каналобразователя); определение погонных нагрузок воздействия АК на КЭ (для силы трения между АК и поверхностью каналобразователя F и силы давления АК на КЭ Q) и пересчет этих нагрузок к эквивалентной системе усилий в точках T_1, T_2 ; пересчет (преобразование) указанной системы усилий в точках T_1, T_2 , к эквивалентной системе усилий в узлах КЭ (обратно пропорционально расстояниям от точек T_1, T_2 до узлов КЭ, принадлежащих той же ограничивающей поверхности КЭ).

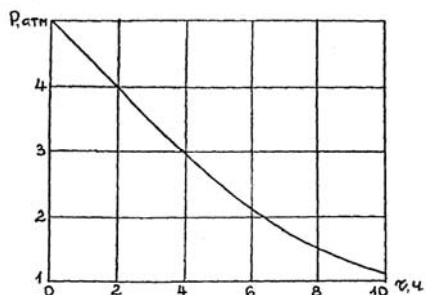


Рис. 5

Процедура задания нагрузки на ОСФ от внутреннего избыточного давления в гермообъеме принята стандартной для МКЭ и по этой причине здесь не детализируется. График снижения давления в гермообъеме после первоначального аварийного скачкообразного его повышения давления ($P, \text{атм} - \tau, \text{ч}$) приведен на рис. 5.

Для задания сейсмического воздействия на ОСФ от проектного землетрясения использована оцифрованная трехкомпонентная акселерограмма, полученная по результатам доисследований сейсмической опасности на территории размещения промплощадки АЭС (рис. 6).

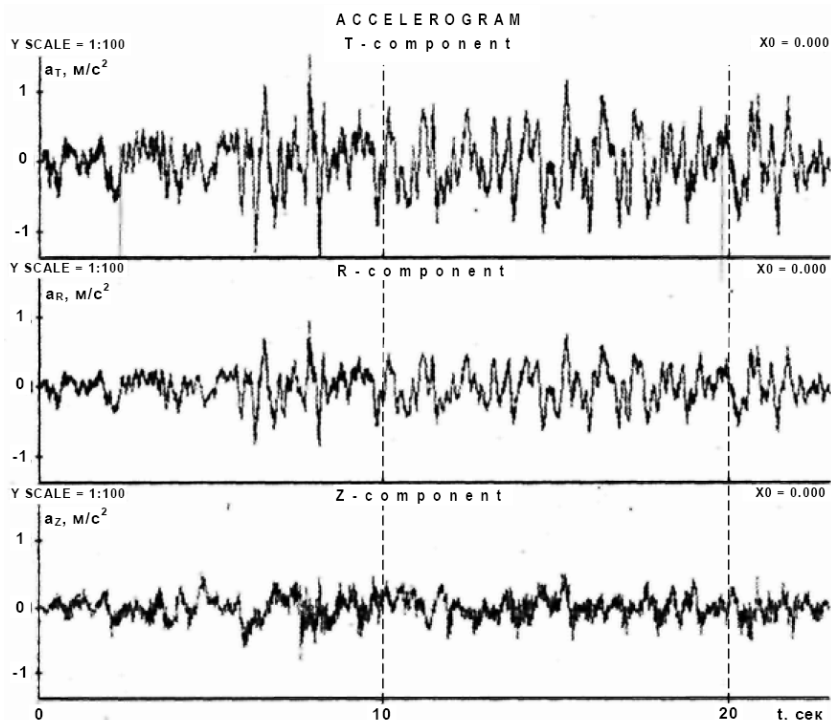


Рис. 6

Основополагающим соотношением, описывающим динамическое поведение произвольной механической системы, в частности ОСФ, является вариационный принцип Гамильтона – Остроградского, который может быть выражен следующим образом:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T-V)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = 0, \quad (1)$$

где T – общая кинетическая энергия системы; V – потенциальная энергия системы, включающая как энергию деформации, так и потенциал любых консервативных внешних сил; W_{nc} – работа, произведенная неконсервативными силами, действующими на систему, включая затухание и другие произвольные внешние нагрузки; δ – вариация для определенного временного интервала.

Приняв принцип Гамильтона – Остроградского (1) за исходное соотношение, получаем следующее уравнение движения, описывающее упругое динамическое поведение МКЭ-модели ОСФ:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\}, \quad (2)$$

где $[M]$, $[K]$ – матрицы масс и жесткости МКЭ-модели ОСФ; $\{\ddot{u}\}$, $\{u\}$ – векторы узловых ускорений и перемещений МКЭ-модели ОСФ; $\{P(t)\}$ – вектор узловых нагрузок МКЭ-модели ОСФ; t – время.

Согласно [12] для анализа сейсмостойкости сооружений применяются: статический метод расчета на сейсмостойкость; линейно-спектральный метод расчета на сейсмостойкость; метод динамического анализа сейсмостойкости.

Анализ динамического поведения ОСФ в данной работе фактически осуществлялся методом динамического анализа путем решения системы уравнений движения МКЭ-модели (2) «в главных координатах». Согласно методологии, изложенной в [12], в качестве «главных координат» принята совокупность форм собственных колебаний МКЭ-модели ОСФ. Указанный подход обеспечил редукцию (уменьшение размерности) системы уравнений (2) размерностью N , за счет перехода к упомянутой новой системе обобщенных неизвестных («главных координат») $\{q\}$ размерностью $n \ll N$, а именно:

$$\{u\} = [B]\{q\}. \quad (3)$$

Соответственно, система уравнений МКЭ (2) примет следующий вид:

$$[B]^T [M][B]\{\ddot{q}\} + [B]^T [K][B]\{q\} = [B]^T \{P(t)\}; \quad (4)$$

$$[m]\{\ddot{q}\} + [k]\{q\} = \{p(t)\}. \quad (5)$$

С учетом свойства ортогональности принятой системы базисных векторов – форм собственных колебаний МКЭ-модели $[B]$ [4] – матрицы $[m]$ и $[k]$ (масс и жесткости редуцированной МКЭ-модели) будут иметь диагональную структуру. Как следствие, система уравнений (5) размерностью n , распадается на n независимых линейных дифференциальных неоднородных уравнений второго порядка, отображающих процесс вынужденных колебаний МКЭ-модели по отдельным, принятым в качестве нового базиса, главным (обобщенным) координатам в пределах рассматриваемого временного интервала $t_1 \leq t \leq t_2$ (шага времени $\Delta t = t_2 - t_1$), а именно:

$$m_i \ddot{q}_i + k_i q_i = p_i(t) \quad (6)$$

$$\left[p(t) = p(t_1) + \frac{p(t_2) - p(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1) = C(t - t_1) + D = C\tau + D = P(\tau); \quad (7) \right.$$

$$t_1 \leq t \leq t_2; \quad \Delta t = t_2 - t_1; \quad \tau = \tau(t) = t - t_1; \quad \tau(t_1) = 0; \quad \tau(t_2) = \Delta t; \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t; \quad (8)$$

$$\left. D_i = p_i(t_1) = p_i(\tau_1) = p_i(0); \quad C_i = \frac{p_i(t_2) - p_i(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{p_i(\Delta t) - p_i(0)}{\Delta t} \right].$$

Функция-решение отдельного дифференциального уравнения, являющегося компонентом системы (6), представляет собой сумму общего $q_i^0(\tau)$ и частного $q_i^*(\tau)$ решений и определяется согласно стандартной процедуре, изложенной в [12, 13]

$$q_i(\tau) = q_i^0(\tau) + q_i^*(\tau), \quad (9)$$

где

$$q_i^0(\tau) = A_i \sin \omega_i \tau + B_i \cos \omega_i \tau; \quad q_i^*(\tau) = (C_i \tau + D_i) / k_i; \quad \dot{q}_i^0(\tau) = A_i \omega_i \cos \omega_i \tau + B_i \omega_i \sin \omega_i \tau$$

$$(A_i = [\dot{q}_i(0) - C_i / k_i] / \omega_i; \quad B_i = q_i(0) - D_i / k_i).$$

Полученные обобщенные перемещения $q_i(\Delta t)$ и скорости $\dot{q}_i(\Delta t)$ редуцированной модели, для момента времени, соответствующего концу временного интервала $\tau(t_2) = \Delta t$, являются начальными условиями для моделирования движения редуцированной модели на следующем шаге по времени. При необходимости (исходя из размера временного интервала, принятого для «мониторинга»), в конце временного шага Δt согласно формуле (3) выполняется вычисление узловых перемещений, скоростей, ускорений, а также параметров НДС КЭ исходной МКЭ-модели, а именно:

$$\{u(t_2)\} = [B] \{q(t_2)\}; \quad \{\dot{u}(t_2)\} = [B] \{\dot{q}(t_2)\}; \quad \{\ddot{u}(t_2)\} = [B] \{\ddot{q}(t_2)\}.$$

Соответственно, был реализован следующий алгоритм анализа динамического поведения и НДС ОСФ при воздействии скачка давления в гермозоне и проектного землетрясения: 1) определение динамических характеристик ОСФ – частот и форм собственных колебаний; 2) определение НДС ОСФ, соответствующего формам собственных колебаний; 3) определение существенно возбуждаемых (энергетически емких) форм собственных колебаний ОСФ при воздействии скачка давления в гермозоне и проектного землетрясения (базиса редукации), а также амплитуд колебаний по указанным формам; 4) построение матриц масс и жесткости редуцированной МКЭ-модели ОСФ; 5) моделирование динамического поведения редуцированной МКЭ-модели ОСФ, а также – с наперед заданным «мониторинговым» временным интервалом – динамического состояния исходной МКЭ-модели ОСФ (узловых перемещений, скоростей, ускорений, параметров НДС КЭ);

Анализ возможности/невозможности отказа (потери локализирующей функции) ОСФ в условиях рассматриваемых динамических воздействий – по критерию сохранения целостности герметизирующей стальной облицовки.

§2. Результаты числового анализа.

На этапах 1 – 3 алгоритма анализа динамического поведения ОСФ (см. п. 1) получены 100 форм собственных колебаний ОСФ (и соответствующих им частот) нижней части полного спектра собственных колебаний ОСФ. Из указанной совокупности форм колебаний лишь 7 форм (с номерами 1, 4, 10, 18, 25, 47, 70 и частотами 10,5; 19,7; 28,1; 38,0; 45,3; 68,7; 90,2 Гц) оказались «существенно возбуждаемыми» (энергетически емкими) и имеющими высокую модальную массу (72,6; 2,1; 1,9; 6,0, 1,7; 3,9; 1,9%), значимо влияющую на динамическое поведение объекта. В качестве примера на рис. 7 представлены наиболее энергоемкие (№ 1, № 18) собственные формы ОСФ.

Необходимо отметить, что для расчетного анализа динамического поведения ОСФ была принята МКЭ-модель следующей размерности: 21062 КЭ, 28547 узлов, 85641 неизвестных системы разрешающих уравнений МКЭ (узловых перемещений). Как показали результаты вычислительных экспериментов при указанных параметрах МКЭ-модели достигалась практическая сходимость метода.

Согласно результатам выполненных расчетов максимальная интенсивность напряжений в стальной гермооблицовке, равная 195,3 МПа, была зарегистрирована в момент времени 16,83 с после начала действия землетрясения, последовавшего за

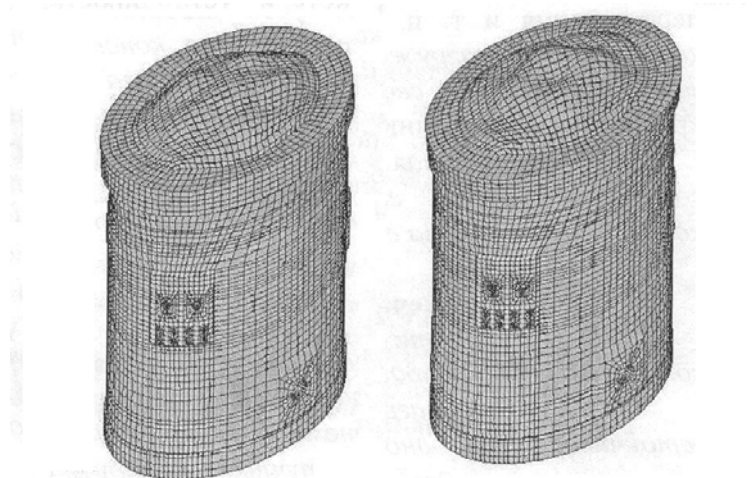


Рис. 7

скачком внутреннего аварийного давления, в цилиндрической части ОСФ, расположенной на 6,2 м выше опорной поверхности цилиндра. Деформированная форма ОСФ, соответствующая указанному моменту времени приведена на рис. 8. Поскольку указанная интенсивность напряжений не превышает предел текучести материала ГСО $\sigma = 195,3 \text{ МПа} < [\sigma] = 245 \text{ МПа}$, можно утверждать, что в условиях совместного действия аварийного давления и проектного землетрясения целостность стальной гермооблицовки не будет нарушена (запас несущей способности ГСО составит $(1 - 195,3/245,0) = 20,3\%$). Таким образом, работоспособность ОСФ (выполнение сооружением локализирующей функции) будет обеспечена.

С целью обоснования корректности разработанной расчетной МКЭ-модели ОСФ и примененных численных алгоритмов моделирования динамического поведения ОСФ, адекватности МКЭ-модели реальному сооружению и достоверности получаемых результатов расчета НДС была выполнена комплексная верификация реализованной МКЭ-модели ОСФ. Результаты верификационных исследований, которые были ориентированы на сопоставление радиальных перемещений цилиндрической части ОСФ в условиях внутреннего избыточного испытательного давления в ОСФ (0,42 МПа) дают основание утверждать следующее:

1) сходимость и численная устойчивость примененной модификации МКЭ – МСКЭ – обоснована в монографии [12];

2) сопоставление результатов расчета с аналитическими решениями.

Сравнение результатов расчета 6,02 мм с соответствующим аналитическим решением (задача Ляме [14]) – 5,80 мм – показало отличие численного (МКЭ) и аналитического результатов на 3,8%;

3) сопоставление результатов расчета с натурными наблюдениями [1].

Сравнение результатов расчета 6,02 мм и данных геодезических наблюдений в процессе испытаний 6,50 мм показало отличие результатов численного (МКЭ) расчета и натуральных измерений в 7,4%;

4) сопоставление результатов расчета с результатами полученными другими программными средствами [7, 16, 17].

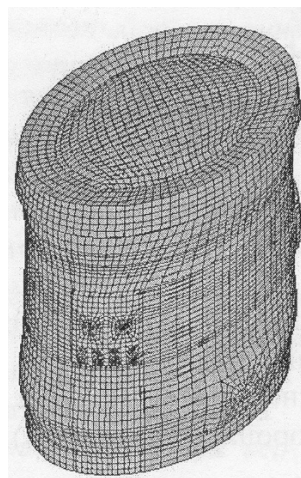


Рис. 8

Сравнение результатов расчета, полученных с применением ПО «ДИПРОС» 6,02 мм, и полученных альтернативными программными средствами («CONT», «ЛИРА», «SCAD», «ADINA», «ANSYS») – 5,3 , ..., 7,34 мм показало отличие результатов в 13,6 – 18%.

Таким образом, на основании изложенного выше в пп. (1 – 4), можно утверждать, что результаты верификации (сопоставление результатов расчета ОСФ по ПО «ДИПРОС» с аналитическими решениями, с данными экспериментальных исследований (испытаний) сооружения и результатами расчетов альтернативными программными средствами) подтвердили корректность разработанной расчетной МКЭ-модели ОСФ, ее адекватность реальному сооружению и возможность получения достоверных данных об НДС объекта.

Заключение.

Максимальная интенсивность напряжений в стальной гермооблицовке, равная 195,3 МПа, зарегистрирована в момент времени 16.83 с после начала действия землетрясения, последовавшего за скачком внутреннего аварийного давления, в цилиндрической части ОСФ, расположенной на 6,2 м выше опорной поверхности цилиндра. Деформированная форма ОСФ, соответствующая указанному моменту времени, приведена на рис. 12. Поскольку указанная интенсивность напряжений не превышает предел текучести материала ГСО $\sigma = 195,3 \text{ МПа} < [\sigma] = 245 \text{ МПа}$, можно утверждать, что в условиях совместного действия аварийного давления и проектного землетрясения целостность стальной гермооблицовки не будет нарушена (запас несущей способности ГСО составит $(1 - 195,3/245,0) = 20,3\%$). Таким образом, работоспособность ОСФ (выполнение сооружением локализующей функции) будет обеспечено.

Согласно результатам анализа динамического поведения ОСФ энергоблока АЭС есть основания утверждать, что:

из 100 форм собственных колебаний ОСФ (и соответствующих им частот) нижней части полного спектра собственных колебаний ОСФ лишь 7 форм оказались «существенно возбуждаемыми» (энергетически емкими) и имеющими высокую модальную массу, значительно влияющую на динамическое поведение объекта;

в условиях совместного действия аварийного давления и проектного землетрясения целостность стальной гермооблицовки не будет нарушена (запас несущей способности ГСО составит 20,3%; таким образом, работоспособность ОСФ (выполнение сооружением локализующей функции) будет обеспечено.

РЕЗЮМЕ. З використанням методу скінченних елементів і програмного комплексу «ДИПРОС» виконано аналіз динамічної поведінки залізобетонної захисної оболонки (ОСФ) енергоблоку АЕС при спільній дії стрибка внутрішнього тиску, зумовленого аварією в реакторному відділенні, і сейсмічного впливу від проектного землетрусу. На основі модального аналізу і подальшого чисельного розв'язання рівнянь руху ОСФ визначено напружено-деформований стан конструкцій споруди в післяаварійний період. Показано, що максимальна інтенсивність напружень в герметизуючому сталевому облицюванні (ГСО) ОСФ не перевищує межу текучості матеріалу ГСО (зберігається цілісність ГСО, ОСФ залишається працездатною й забезпечує дотримання вимог з радіаційної безпеки).

1. *Акт № 1-06/449* от 18.11.82 «О проведении испытаний защитной оболочки на плотность и прочность». – ОП «Южно-Украинская АЭС», утв. 30.10.82. – 2 с.
2. *Головки К.Г., Луговой П.З., Мейш.В.Ф.* Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках – К: Издат.-полиграф. центр «Киевский ун-т», 2012. –541 с.
3. *Крицкий В.Б.* Комплекс программ «ДИПРОС» (Динамика и прочность оболочечных систем). Описание применения (сокращенный вариант). – К.: Киев. инж.-строит. ин-т, 1990. – 70 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 26.07.90, № 1222-Ук90.
4. *Крицкий В.Б., Карнаухов А.А., Трубочанinov О.А.* Моделирование динамического поведения элементов конструкций АЭС на основе применения смешанного базиса редукции из собственных форм колебаний и векторов Ланцоша // Ядерная и радиационная безопасность. – К.: ГНТЦ ЯРБ, 2000. – № 1. – С. 62 – 68.

5. Крицкий В.Б., Крицкий А.Б. Эффективная схема построения редуцированных нелинейных уравнений для оболочек на основе моментной схемы конечных элементов (МСКЭ) // Сопrotивление материалов и теория сооружений. – К.: Будівельник, 1996. – Вып. 62. – С. 88 – 99.
6. Крицкий В.Б., Крицкий А.Б., Мудрагель С.А. Численное моделирование НДС защитной оболочки реакторного отделения АЭС при динамическом нагружении // Вестник Национ. технич. ун-та Украины «КПИ». – К.: Машиностроение, 1997. – Вып. 32. – С. 256 – 259.
7. Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Улановский М.Г. О результатах сопоставительных расчетов защитной оболочки реакторного отделения ВВЭР-1000/В-320 // Proc. Int. Conf. “The Analysis of Prestress Loss in Tendons of the WWER-1000 Containment”. – (GRS, Berlin, Germany, 12 – 19.12.1998). – Berlin, Germany: GRS, 1999. – P. 141 – 158.
8. Крицкий В.Б., Марьенков Н.Г., Бабик К.Н., Недзведская О.Г. Нелинейная сейсмическая реакция защитной оболочки энергоблока АЭС после проектной аварии // Міжвідомчий наук.-техн. збірн. наук. праць «Будівельні конструкції». – 2015. – № 82. – С. 619 – 636.
9. Луговой П.З., Мейш В.Ф., Штанцель Э.А. Нестационарная динамика неоднородных оболочечных конструкций. – К.: Изд. Полигр. центр «Киевский ун-т», 2005. – 536 с.
10. СНИП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. – 86 с.
11. Южно-Украинская АЭС. Блок № 1. Проект. Техническое обоснование безопасности. Сооружения и эксплуатация АЭС. Книга 3. – Харьков: Харьковский научно-исслед. и проект.-констр. ин-т «Атомэнергопроект», 1991.
12. ASCE 4-98. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and 12. Commentary / ASCE Standards, USA, 2000. – P. 24 – 30.
13. Differential and Integral Calculus, I Lecture Notes // Tel Aviv University, Fall, 2009. – 324p.
14. ENV 1998-1-6:2004. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, CEN, Bruxelles, 2004 – P. 161 – 187.
15. GB 50011-2001. Code for Seismic Design of Buildings / National Standard of the People’s Republic of China, Beijing, 2001. – P. 94 – 101.
16. Krytskyy V.B. About Use in Ukraine the FEM Assessments and Grounds of the Strength and Reliability of the Nuclear Installation’s Structures // Proc. OECD/NEA Workshop “The Finite Element Analysis of Degraded Concrete Structures”. – Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, 29-30.10.1998. – Paris, France: OECD, 1999. – P. 88 – 92.
17. Krytskyy V.B., Karnauhov A.A., Ulanovskyy M.G. Service Life Predication and Ageing Management of WWER-1000 NPP’s Concrete Containment Prestress System // Proc. Int. Conf. “Life Predication and Ageing Management of Concrete Structures”. – Bratislava, Slovakia, 06-08.07.1999. – Bratislava, Slovakia: Expertcentrum, 1999. – P. 203 – 206.
18. Lugovoi P.Z., Prokopenko N.Ya. Effects of Elastic Foundation on Dispersion of Hamonic Waves in Cylindrical Shells Stiffened Longitudinally // Int. Appl. Mech. – 2015. – **51**, N 5. – P. 116 – 124.
19. Skosarenko Yu.V. Natural Vibrations of Ribbed Cylindrical Shell Interaction with Elastic Foundation // Int. Appl. Mech. – 2014. – **50**, N 5. – P. 111 – 128.
20. Skosarenko Yu.V. Stress-Strain State of Ribbed Cylindrical Shell Interaction with Elastic Foundation under Short-Time Loads // Int. Appl. Mech. – 2015. – **51**, N 1. – P. 112 – 122.
21. Westergaard H.M. Theory of Elasticity and Plasticity. – Harvard: University Press, 2014. – 176 p.
22. Zienkiewicz O., Taylor R. In: The finite element method. Vol. 2: Solid mechanics: Fifth ed. – Butterworth-Heinemann: Oxford, 2000. – P. 221 – 239.

Поступила 21.12.2015.

Утверждена в печать 05.07.2016