

УДК 624.042;539.3

П. З. Луговой¹, д-р техн. наук, В. Б. Крицкий², Н. И. Крицкая²

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И КОЛЕБАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ АВАРИЙНЫХ НАГРУЗКАХ

С использованием метода конечных элементов и программного комплекса «ДИПРОС» исследовано динамическое поведение защитной оболочки реакторного отделения энергоблока АЭС в условиях запроектной аварии с разгерметизацией первого контура и взрывом водорода в реакторном отделении. Показано, что в рассмотренных условиях интенсивность напряжений в герметизирующей стальной облицовке защитной оболочки не превышает предел текучести (с учетом эффекта динамического упрочнения материала). То есть сохраняется целостность герметизирующей стальной облицовки, защитная оболочка остается в работоспособном состоянии и обеспечивает соблюдение требований по радиационной безопасности.

Ключевые слова: АЭС, защитная оболочка, герметизирующая стальная облицовка, запроектная авария, динамическое поведение, напряженно-деформированное состояние, радиационная безопасность

Введение. Защитные оболочки (ЗО) реакторных отделений (РО) энергоблоков АЭС являются компонентами системы глубоководной защиты [23] 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. ЗО 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 (рис. 1).

В данной работе анализируется напряженно-деформированное состояние (НДС) и динамическое поведение ЗО в условиях развития запроектной аварии (ЗПА) «потеря электроснабжения собственных нужд» при реализации скачка давления паровоздушной среды в РО и последующего динамического воздействия на ЗО от взрыва водорода, образование которого в РО обусловлено протеканием физико-химических процессов в расплаве активной зоны аварийной РУ. Критерием отказа ЗО (потери локализирующей функции) является нарушение целостности ГСО. Условием достижения указанного критерия отказа принято равенство/превышение интенсивностью напряжений в материале ГСО предела текучести металла (согласно условию пластичности Губера – Мизеса – Генки [22]).

Для расчета НДС и динамического поведения ЗО можно использовать теорию слоистых оболочек или оболочек на упругом основании [8, 16], а также вероятностные подходы в проектировании [5, 28]. Но описанные в упомянутых работах методы не вполне приемлемы для расчета ЗО, сложной оболочечной конструкции, которой присущ ряд локальных нерегулярностей геометрической формы (отверстия, местные утолщения, изломы поверхности и др.), а также неоднородность слагающих конструкцию материалов. Поэтому для расчета НДС и динамического поведения ЗО было использовано разработанное программное обеспечение (ПО) «ДИПРОС» [11, 12], реализующее вариант метода конечных элементов (МКЭ), известный как моментная схема конечных элементов (МСКЭ) [18], а также соответствующие модифицированные численные алгоритмы решения уравнений движения МКЭ-модели [10 - 14] при расчетных динамических нагрузках (в т.ч. быстропротекающих импульсных, таких как скачок внутреннего давления в ЗО при потере целостности первого контура РУ и взрыве водорода в гермообъеме). Целью настоящей работы является определение возможности отказа ЗО (потери локализирующей функции гермоограждения) в условиях развития ЗГПА.

Принятые гипотезы и допущения. Особенности моделирования объекта и воздействий на него. Основные уравнения. Как отмечено выше, рассматриваемая ЗО представляет собой двухслойную тонкостенную конструкцию, образованную цилиндрической и сферической оболочками, наружный слой которых выполнен из предварительно напряженного железобетона, а внутренний – герметизирующая облицовка – из стали толщиной 8 мм. Сложность геометрии и системы рассматриваемых экстремальных воздействий на ЗО (аварийное давление, проектное землетрясение) не позволяет при анализе НДС и динамического поведения ЗО 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 ЗО в аварийных условиях был применен метод конечных элементов, которому присущи инженерная наглядность, возможность любой степени детализации расчетных моделей, алгоритмичность и т.п.

По толщине ЗО моделировалась 4-мя слоями КЭ (3 наружные слоя бетона и 1 внутренний слой металла, соответствующий стальной гермооблицовке – см. рис. 5).

Принимается, что в пределах объема одного конечного элемента (КЭ) материал ЗО является изотропным. Характеристики слоев стенки ЗО, принятые для расчета – приведенные расчетные физико-механические характеристики материала каждого слоя (определенные, исходя из физико-механических характеристик бетона, ненапрягаемой и/или предварительно напряженной арматуры, наличия пустот-каналобразователей) – представлены в табл. 1.

Расчетная многофрагментная МКЭ-модель ЗО 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.

Таблица 1 – Приведенные расчетные физико-механические характеристики материала слоев железобетонной защитной оболочки энергоблока АЭС

№ слоя	Конструктивные особенности слоя	Внутренний радиус и толщина слоя, м	Приведенные расчетные физико-механические характеристики материала слоя	
			Модуль упругости $E_{сл.пр.}$, МПа	Коэффициент Пуассона $\nu_{сл.пр.}$
1	Металлическая гермооблицовка – стальной лист	22.500 0.008	206000	0.3000
2	Железобетон – бетон, внутренняя кольцевая и меридиональная ненапряженная арматура	22.508 0.280	33976	0.2052
3	Железобетон – бетон, каналообразователи, 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

Выбор оптимальной «степени» МКЭ-дискретизации осуществлялся по следующим качественным критериям:

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

По результатам вычислительных экспериментов для расчетного анализа динамического поведения ЗО 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 достигалось оптимальное сочетание точности расчета НДС ЗО и времени решения задач.

Внешний вид ЗО энергоблока АЭС, поперечный разрез сооружения, расчетная МКЭ-модель ЗО в целом, схема разводки АК СПЗО, МКЭ-модель зон нерегулярной геометрии объекта (отверстий, местных утолщений, изломов поверхности и др.), а также детальная структура стенки цилиндрической части ЗО представлены на рис. 1 – 5.

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

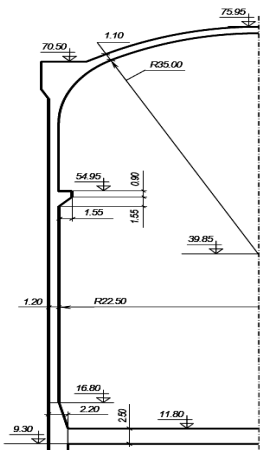


Рис. 1 – Поперечный разрез ЗО энергоблока

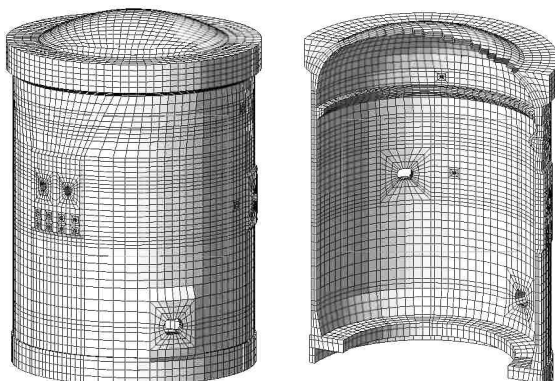


Рис. 2 – Внешний вид и разрез расчетной МКЭ-модели ЗО энергоблока

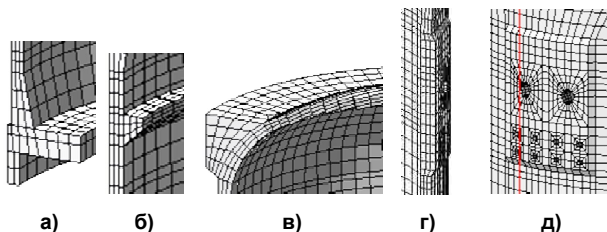


Рис. 3 – МКЭ-моделирование областей нерегулярной геометрии ЗО (зон отверстий, местных утолщений, изломов поверхности и др.):

- а) фрагмент опорной плиты (стилобата) и приопорное утолщение ЗО;
- б) консоль рельсового пути полярного крана;
- в) анкерный карниз ЗО с примыкающим куполом;
- г-д) утолщение в зоне проходок трубопроводов питательной воды и главных паропроводов

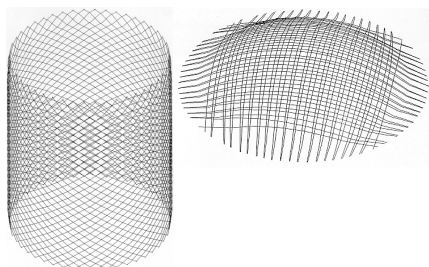


Рис. 4 – Обобщенная схема разводки арматурных канатов системы преднапряжения в цилиндрической и купольной частях ЗО



Рис. 5 – Конструкция стенки цилиндрической части 3О

Направление глобальных декартовых координатных осей согласуется со строительными осями 3О и принято следующим:

- центр глобальной декартовой системы координат расположен на пересечении горизонтальной плоскости с нулевой строительной отметкой и вертикальной оси симметрии 3О;
- ось z^1 лежит в плоскости основания 3О и направлена перпендикулярно плоскости чертежа (с учетом аксонометрической проекции) на наблюдателя;
- ось z^2 лежит в плоскости основания 3О и направлена в плоскости чертежа слева направо;
- ось z^3 совпадает с осью симметрии 3О и направлена из центра фундамента сооружения к вершине купола.

Оси местных («привязанных» к центру конкретных КЭ) косоугольных систем координат «сопровождают» геометрию 3О; их направление принято следующим:

- центры местных (конечноэлементных) косоугольных систем координат совпадают с геометрическими центрами КЭ;
- ось x^1 совпадает с направлением внешней нормали к серединной поверхности 3О;
- ось x^2 ориентирована в окружном направлении 3О против часовой стрелки при наблюдении со стороны купола;
- ось x^3 направлена вдоль меридиана 3О от ее основания к вершине купола.

Расчет НДС и динамического поведения 3О выполнялся для условий воздействия на сооружение следующих нагрузок:

- собственный вес конструкций сооружения;
- усилия обжатия сооружения арматурными канатами (АК) системы

преднапряжения;

- аварийное давление паровоздушной смеси 0,35 МПа (избыточное), в подбололочечном пространстве;
- динамическое воздействие на ЗО импульса давления от взрыва водорода в гермообъеме.

Процедура задания нагрузки на ЗО от собственного веса конструкций сооружения принята стандартной для МКЭ и поэтому здесь не детализируется.

Моделирование силового воздействия на ЗО от обжатия армокаматами СПЗО осуществлялось по методике, учитывающей реальные траектории каналообразователей системы преднапряжения.

Величина усилия натяжения АК в заданной точке его траектории определяется 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) [24], и имеет вид

$$N = N_0 \cdot \exp(-\delta\theta) ,$$

где 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 её 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:

$$F = N_0(\exp(-\delta\theta_2) - \exp(-\delta\theta_1)) = N_2 - N_1 ;$$

$$Q = N_0(\exp(-\delta\theta_2) + \exp(-\delta\theta_1)) \cdot (\theta_2 - \theta_1) = (N_2 + N_1) \cdot (\theta_2 - \theta_1) ,$$

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 рассчитывается 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 реализована 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 и потерь усилия натяжения по длине АК вследствие его трения о поверхность каналаобразователя;

– определение погонных нагрузок воздействия АК на КЭ (для силы трения между АК и поверхностью каналаобразователя 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).

Процедура задания нагрузки на ЗО от внутреннего избыточного давления в гермообъеме принята стандартной для МКЭ и здесь не детализируется. Принятый в качестве расчетного график изменения давления паровоздушной среды в гермообъеме (без учета приращения давления от взрыва водорода в ГО) приведен в [21].

Для рассматриваемого в данной работе случая (концентрации водорода 0.06=6.0%) максимальное давление во фронте взрывной волны при дефлаграционном взрыве водорода в гермообъеме принято, исходя из зависимостей, приведенных в [21], и составляет

$$p_{\max} = 2,68 \cdot 10^5 \cdot 3 = 8,04 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,804 \text{ МПа}$$

Согласно результатам исследований, приведенным в [17], указанное значение максимального давления откорректировано умножением на коэффициент 1.75, консервативно учитывающий взаимодействие (наложение) падающей и отраженной ударных волн при взрыве в замкнутом объеме, т.е.:

$$p_{\max 1} = 0,804 \cdot 1,75 = 1,407 \text{ МПа} = 13,886 \approx 13,9 \text{ атм}.$$

Полученное значение $p_{\max 1} = 13,9 \text{ атм}$ коррелируется с величиной давления 11 атм, приведенной в [7]. Расчетные функции изменения давления от взрыва водорода в диапазоне изменения давления от 0,268 до 1,407 МПа по высоте стенки ЗО и во времени приняты в конфигурации, представленной на рис. 6 (согласно [7]).

Основополагающим соотношением, описывающим динамическое поведение произвольной механической системы, в частности ЗО, является вариационный принцип Гамильтона – Остроградского, который может быть выражен следующим образом [10]:

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

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; t – время в диапазоне продолжительности рассматриваемого процесса $t_1 < t < t_2$; δ – вариация функции энергии (или работы) для временного интервала dt .

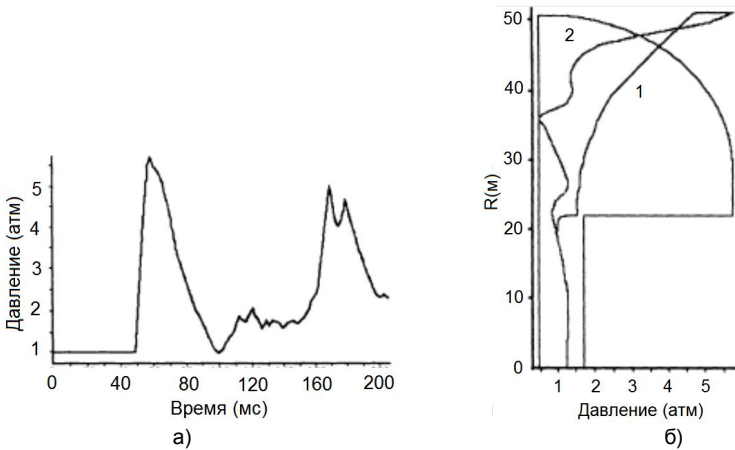


Рис. 6 – График изменения давления:
а) в гермообъеме (в полюсе купола) при мгновенном взрыве водорода в шахте реактора;
б) среды: (1) по стенке ЗО, (2) по оси симметрии гермообъема

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

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

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

Анализ динамического поведения ЗО в данной работе фактически

осуществлялся путем решения системы уравнений движения МКЭ-модели (2) «в главных координатах». Согласно методологии, изложенной, в частности, в [10], в качестве «главных координат» принята совокупность форм собственных колебаний МКЭ-модели ЗО. Указанный подход позволил выполнить 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 вид:

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

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

где $[m]$, $[k]$ – матрицы масс и жесткости редуцированной МКЭ-модели ЗО; $\{\ddot{q}\}$, $\{q\}$ – векторы ускорений и перемещений (амплитуд «главных координат» редуцированной МКЭ-модели ЗО в момент времени t ; $\{p(t)\}$ – вектор обобщенных нагрузок редуцированной МКЭ-модели ЗО в момент времени t .

С учетом свойства ортогональности принятой системы базисных векторов – форм собственных колебаний МКЭ-модели $[B]$ [10] – матрицы $[m]$ и $[k]$ 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 диапазона $t_1 \leq t \leq t_2$ (шага времени $\Delta t = t_2 - t_1$), а именно:

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

где

$$p_i(t) = p_i(t_1) + \frac{p_i(t_2) - p_i(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1) = ; \quad (7)$$

$$= C_i(t - t_1) + D_i = C_i \tau + D_i = P_i(\tau)$$

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

$$t_1 \leq t \leq t_2 ; \Delta t = t_2 - t_1 ; 0 \leq \tau \leq \Delta t ;$$

$$D_i = p_i(t_1) = p_i(\tau_1) = p_i(0) ; C_i = \frac{p_i(t_2) - p_i(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{p_i(\Delta t) - p_i(0)}{\Delta t} . \quad (8)$$

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 [19, 10]:

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

$$q_i^0(\tau) = A_i \sin \omega_i \tau + B_i \cos \omega_i \tau ; \quad (10)$$

$$\dot{q}_i^0(\tau) = A_i \omega_i \cos \omega_i \tau + B_i \omega_i \sin \omega_i \tau ; \quad (11)$$

$$A_i = [\dot{q}_i(0) - C_i / k_i] / \omega_i ; \quad (12)$$

$$B_i = q_i(0) - D_i / k_i ; \quad (13)$$

$$q_i^*(\tau) = (C_i \tau + D_i) / k_i . \quad (14)$$

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:

$$\{u(t_2)\} = [B] \{q(t_2)\} , \quad \{\dot{u}(t_2)\} = [B] \{\dot{q}(t_2)\} , \quad \{\ddot{u}(t_2)\} = [B] \{\ddot{q}(t_2)\} . \quad (15)$$

Соответственно, был реализован следующий алгоритм анализа динамического поведения и НДС ЗО при воздействии скачка давления в гермозоне и проектного землетрясения:

- 1) определение динамических характеристик ЗО – частот и форм собственных колебаний;
- 2) определение НДС ЗО, соответствующего формам собственных колебаний;
- 3) определение существенно возбуждаемых (энергетически емких) форм собственных колебаний ЗО при воздействии скачка давления в гермозоне и проектного землетрясения (базиса редукции), а также амплитуд колебаний по указанным формам;
- 4) построение матриц масс и жесткости редуцированной МКЭ-

модели ЗО;

5) моделирование динамического поведения редуцированной МКЭ-модели ЗО, а также – с наперед заданным «мониторинговым» временным интервалом – динамического состояния исходной МКЭ-модели ЗО (узловых перемещений, скоростей, ускорений, параметров НДС КЭ);

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

Результаты расчетного анализа. На этапах 1 – 3 алгоритма анализа динамического поведения ЗО были получены 100 форм собственных колебаний ЗО (и соответствующих им частот) нижней части полного спектра собственных колебаний ЗО. Из указанной совокупности форм колебаний лишь 7 форм (с номерами 1, 4, 10, 18, 25, 47, 70 и соответствующими 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%), значительно влияющую на динамическое поведение объекта. Для примера на рис. 7 показаны самые энергоемкие формы собственных колебаний № 1, 4.

Согласно результатам выполненных расчетов максимальная интенсивность напряжений в стальной гермооблицовке, равная 261,7 МПа, была зарегистрирована в момент времени 6,83 мс после прохождения пиковой интенсивности давления на ЗО от взрыва водорода 1,407 МПа, в цилиндрической части ЗО, расположенной на 36,2 м выше опорной поверхности цилиндра. Деформированная форма ЗО, соответствующая максимальной интенсивности напряжений в ГСО 261,7 МПа (момент времени 6,83 мс после прохождения пиковой интенсивности давления на ЗО от взрыва водорода 1,407 МПа)) приведена на рис. 8.

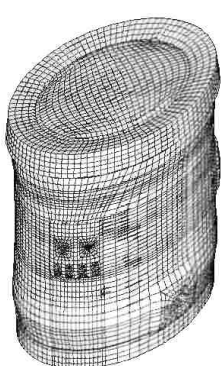


Рис. 7 – Наиболее энергоемкие формы собственных колебаний ЗО (№№ 1, 4)

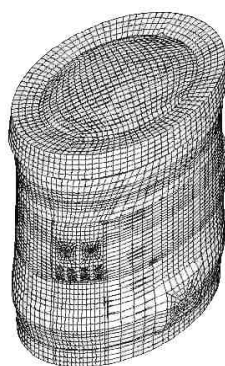
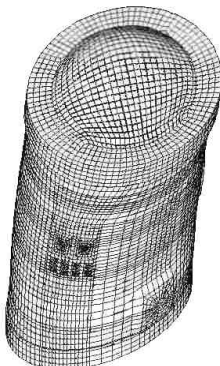


Рис. 8 – Деформированная форма ЗО

Указанная интенсивность напряжений превышает предел текучести материала ГСО $\sigma = 261,7 \text{ МПа} > [\sigma] = 245 \text{ МПа}$ на $(261,7/245,0 - 1) = 6,8\%$.

Однако, принимая во внимание эффект динамического упрочнения, который характеризуется повышением при быстропротекающих динамических воздействиях (высоких скоростях деформаций) предела пластичности металла в 1,2-1,3 раза [20], а предела прочности бетона на 20–40% [6], можно утверждать, что в условиях рассмотренных аварийных условий, сопровождающихся дефляционным взрывом водорода в гермообъеме целостность стальной гермооблицовки не будет нарушена (запас несущей способности ГСО с учетом динамического упрочнения консервативно составит $(1 - 261,7/(1,2 \cdot 245,0)) = 11\%$). Таким образом, работоспособное состояние ЗО (выполнение сооружением локализирующей функции) будет обеспечено.

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

1) сходимости и численная устойчивость примененной модификации МКЭ – МСКЭ – обоснована в монографии [18];

2) сопоставление результатов расчета с аналитическими решениями. Сравнение результатов расчета 6,2 мм с соответствующим аналитическим решением (задача Ляме [22]) – 5,80 мм – показало расхождение численного (МКЭ) и аналитического результата в 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 расхождение результатов численного (МКЭ) расчета и натурных измерений в 7,4%;

4) сопоставление результатов расчета с результатами, полученными другими программными средствами [15, 26–28]. Сравнение результатов расчета, полученных с применением ПО «ДИПРОС» 6,02 мм, и полученных альтернативными программными средствами («CONT» [9, 26], «ЛИРА» [4], «SCAD» [2], «ADINA», «ANSYS» [3]) – 5,3÷7,34 мм показало расхождение результатов в 13,6÷18%.

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

Выводы. Согласно результатам анализа динамического поведения 30 энергоблока АЭС есть основания утверждать, что:

– из 100 форм собственных колебаний 30 (и соответствующих им частот) нижней части полного спектра собственных колебаний 30 лишь 7 форм оказались «существенно возбуждаемыми» (энергетически емкими) и имеющими высокую модальную массу, значимо влияющую на динамическое поведение объекта;

– в условиях развития запроектной аварии (ЗПА) «потеря электропитания собственных нужд» при реализации скачка давления паровоздушной среды в РО и последующего динамического воздействия на 30 от взрыва водорода в гермообъеме целостность стальной гермооблицовки не будет нарушена (запас несущей способности ГСО с учетом динамического упрочнения консервативно составит 11 %; таким образом, работоспособное состояние 30 (выполнение сооружением локализирующей функции) будет обеспечено.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

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 Аттестационный паспорт программного средства от 02.11.2000 № 124 ... Проектно-вычислительный комплекс Structure CAD (ПВК SCAD) ... Аттестовать бессрочно. – М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 2000. – 5 с.

3 Аттестационный паспорт программного средства от 31.10.2002 № 145 ... Программа ANSYS 5.2-5.7 ... Аттестовать бессрочно. – М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 2002. – 6 с.

4 Аттестационный паспорт программного средства от 26.05.05 № 193 ... Программный комплекс ЛИРА ... Аттестовать на срок 10 лет. – М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности – 2005. – 4 с.

5 **Аугустини Г.** Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугустини, А. Баратта, Ф. Кашиати; пер. с англ. Ю. Д. Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.

6 **Баженов Ю.М.** Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.

7 **Гальбурт В. А.** Воздействие взрыва водорода на защитную оболочку реакторного зала АЭС / М. Ф. Иванов, В. Н. Минеев, В. Е. Фортов, А. И. Фунтиков, С. В. Утюжников, А. В. Шугов // Матем. Моделирование. – 2002. – Т.14, № 1. – С. 73–86.

8 **Головко К. Г.** Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / К. Г. Головко, П. З. Луговой, В. Ф. Мейш. – К.: Изд.-во Полигр. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.

9 **Киселев А. С.** Повышение эксплуатационных качеств защитных оболочек АЭС / А. С. Киселев, Е. А. Кошманов, В. Н. Медведев, А. Ульянов. – М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, Препринт № NSI-22-SM, 1994. – 19 с.

10 **Клаф Р.**, Динамика сооружений / Р. Клаф, Дж. Пензиен. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.

11 **Крицкий В.Б.** Комплекс программ «ДИПРОС» (Динамика и прочность оболочечных систем). Описание применения (сокращенный вариант) / В. Б. Крицкий. – К.:

Киев. инж.-строит. ин-т, 1990. – Деп. в УкрНИИНТИ 26.07.90, № 1222-Ук90. – 70 с.

12 **Крицкий В.Б.**, Моделирование динамического поведения элементов конструкций АЭС на основе применения смешанного базиса редукции из собственных форм колебаний и векторов Ланцоша / В. Б. Крицкий, А. А. Карнаухов, О. А. Трубочанинов // Ядерная и радиационная безопасность. – К.: ГНТЦ ЯРБ. – 2000. – № 1. – С. 62-68.

13 **Крицкий В.Б.**, Эффективная схема построения редуцированных нелинейных уравнений для оболочек на основе моментной схемы конечных элементов (МСКЭ) / В. Б. Крицкий, А. Б. Крицкий // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник. – 1996. – Вып. 62. – С. 88–99.

14 **Крицкий В.Б.**, Численное моделирование НДС защитной оболочки реакторного отделения АЭС при динамическом нагружении / В. Б. Крицкий, А. Б. Крицкий, Мудрагель С. А. // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». К.: Машиностроение. – 1997. – Вып. 32. – С. 256–259.

15 **Крицкий В.Б.**, О результатах сопоставительных расчетов защитной оболочки реакторного отделения ВВЭР-1000/В-320 / В. Б. Крицкий, Е. Е. Майборода, М. Г. Улановский // The Analysis of Prestress Loss in Tendons of the WWER-1000 Containments. International Conference Proceedings. GRS, Berlin, Germany, 12-19.12.1998. – Berlin, Germany: GRS. –1999. – P. 141-158.

16 **Луговой П. З.**, Нестационарная динамика неоднородных оболочечных конструкций / П. З. Луговой, В. Ф. Мейш, Э. А. Штанцель.– К.: Изд.-во Полигр. центр «Киевский ун-т», 2005. – С. 536.

17 **Луговой П. З.** Про вплив характеру імпульсного навантаження на динаміку оболонок / П. З. Луговой // Доп. АН УРСР. Сер. А. Фіз.-мат. та техн. науки.– 1990, – № 2 – С. 41-44.

18 Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под общ. ред. Сахарова А. С. и Альтенбаха И. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.

19 **Пискунов Н. С.** Дифференциальное и интегральное исчисление. Том 2. Учебное пособие для вузов. / Н. С. Пискунов.– М.: Наука, 1985. – 560 с.

20 **Пономарев С. Д.** Расчеты на прочность в машиностроении. Том III. / С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев, В. М. Макушин, И. И. Малинин, В. И. Феодосьев. – М.: Гос. н.-т. изд-во машиностроительной литературы, 1959. – 264 с.

21 Расчетное обоснование системы уделения водорода из ГО при запроектных авариях для энергоблоков № 1, 2 ОП ЮУАЭС. – ГП НАЭК «Энергоатом», 15.11.12. – 138 с.

22 **Самуль В. И.** Основы теории упругости и пластичности / В.И. Самуль.– М.: Высшая школа, 1982. – 264 с.

23 НП 306.2.141-2008. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – К.: Гос. комитет ядерного регулирования Украины, 2008. – 58 с.

24 СНИП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 80 с.

25 Определение коэффициента трения арматурного каната № 89 энергоблока № 6 Запорожской АЭС с целью уточнения суммарных потерь усилия натяжения по длине армоканата. – М.: Ин-т «Оргэнергострой», 1991. – 28 с.

26 Южно-Украинская АЭС. Блок № 1. Система преднапряжения защитной оболочки (СПЗО). Расчетное обоснование пригодности защитной оболочки к эксплуатации по результатам КПр в 1992 г. 210502.0422142.00001.601 КЖ.Р1. – М.: Государственный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и изыскательский институт (ГНИПКИИ) «Атомэнергопроект», 1992. – 76 с.

27 **Krytsky V. B.** About Use in Ukraine the FEM Assessments and Grounds of the Strength and Reliability of the Nuclear Installation's Structures / V. B. Krytsky // The Finite

Element Analysis of Degraded Concrete Structures. OECD/NEA Workshop Proceedings. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, 29-30.10.1998. – Paris, France: OECD. – 1999. – P. 88-92.

28 **Krytskyy V.B.** Probabilistic Approaches in Assessment of Strength Reliability of NPP's Concrete Containment / V. B. Krytskyy, Gasanenko V. A. // Simulation in Industry'2000. 12th European Simulation Symposium 2000. ESS'2000. September 28-30.2000. Hamburg, Germany. [SCS]. – The Netherlands, Delft: The Society for Computer Simulation International. – 2000. – P. 577–581.

29 **Krytskyy V. B.,** Service Life Predication and Ageing Management of WWER-1000 NPP's Concrete Containment Prestress System / V. B. Krytskyy, A. A. Karnauhov, M. G. Ulanovskyy // Life Predication and Ageing Management of Concrete Structures. International Conference Proceedings. Bratislava, Slovakia, 06-08.07.1999. – Bratislava, Slovakia: Expertcentrum. – 1999. – P. 203–206.

П. З. Луговий , д-р техн. наук, В. Б. Крицький , Н. І. Крицька

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН І КОЛИВАННЯ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ АЕС ПРИ ІМПУЛЬСНИХ АВАРІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

З використанням методу скінчених елементів і програмного комплексу «ДІПРОС» досліджено динамічну поведінку захисної оболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС в умовах запроектованої аварії з розгерметизацією першого контуру і вибухом водню в реакторному відділенні. Показано, що в розглянутих умовах максимальна інтенсивність напружень в герметизуючому сталевому облицюванні захисна оболонка не перевищує межу плинності (з урахуванням ефекту динамічного зміцнення матеріалу). Тобто зберігається цілісність герметизуючого сталевого облицювання, захисна оболонка залишається в працездатному стані й забезпечує дотримання вимог з радіаційної безпеки.

Ключові слова: АЕС, захисна оболонка, герметизуюче сталеve облицювання, запроектована аварія, динамічна поведінка, напружено-деформований стан, радіаційна безпека.

P. Z. Lugovoi, Dr. Sci. (Tech.), V. B. Krytskiy, N. I. Kryts'ka

STRESS-STRAIN STATE AND VIBRATION OF NPP'S CONTAINMENT UNDER EMERGENCY DYNAMIC LOADS

Using the finite element method and software «DIPROS» the analysis of the dynamic behavior of reinforced concrete containment of NPP Unit under the combined action of the internal pressure shock caused by the severe accident – depressurization of the primary circuit and subsequent explosion of hydrogen in reactor hall was fulfilled. Using the modal analysis and numerical solution of the finite element method equations of motion of concrete containment the stress-strain state of the building structure in the post-accident period was defined. It is shown that the maximum intensity of the stresses in the sealing of steel liner of concrete containment does not exceed the yield strength of the sealing of steel liner material (taking into account its dynamic hardening). Accordingly, the integrity of the liner is preserved, concrete containment remains operational as well as compliance of requirements with radiation safety is ensured.

Key words: *NPP, NPP unit, containment, concrete, liner, tendon, pre-stress system, severe accident, accident pressure, explosion of hydrogen, dynamic behavior, nuclear and radiation safety, stress-strain state, finite element method, reactor hall.*

Using the finite element method (FEM) and software «DIPROS» the analysis of the dynamic behavior of reinforced concrete containment (CC) of NPP Unit under the combined action of the internal pressure shock caused by the severe accident – depressurization of the primary circuit and subsequent explosion of hydrogen in reactor hall was fulfilled. Using the modal analysis and numerical solution of the FEM equations of motion of CC the stress-strain state of the building structure in the post-accident period was defined. In this research the analysis of dynamical behavior of containment was performed by means of solving of system of FEM equations in «main coordinates». As «main coordinates» the set of modes of natural oscillations was used. The mentioned approach permits to perform the essential reduction of dimension of system of FEM equations on few orders. As results of researches it was shown that only seven modes of natural oscillations (from one hundred analyzed ones) are the cause of essential (more then 90%) contribution to dynamical behavior of containment. The convergence and numerical stability of FEM modification have theoretical and practical confirmation. The developed FEM-model of containment was verified by using results of analytical calculations, the site test observes and the calculations using alternative software.

It is shown that the maximum intensity of the stresses in the sealing of steel liner (SSL) of CC does not exceed the yield limit of the SSL material (taking into account its dynamic hardening). Accordingly, the integrity of the liner is preserved, CC remains operational as well as compliance of requirements with radiation safety is ensured.

REFERENCES

- 1 Conclusion № 06/449 dated 11.18.82 "About performing tests on the containment density and strength". – BE "South-Ukrainian NPP", approved 10.30.82. – 2 p. (in Russian).
- 2 Attestation passport for software tool dated 02.11.2000 № 124 ... Software and Calculation Complex Structure CAD (SCC SCAD) ... Attested without time-limit. – Moscow: Federal Agency of Russia for Nuclear and Radiation Safety. Scientific Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2000. – 5 p. (in Russian).
- 3 Attestation passport for software tool dated 31.10.2002 № 145 ... Software ANSYS 5.2-5.7 ... Attested without time-limit. – Moscow: Federal Agency of Russia for Nuclear and Radiation Safety. Scientific Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2002. – 6 p. (in Russian).
- 4 Attestation passport for software tool dated 26.05.2005 № 193 ... Software Complex LIRA ... Attested for a period of 10 years. – Moscow: Federal Agency of Russia for Nuclear and Radiation Safety. Scientific Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2005. – 4 p. (in Russian).
- 5 **Augusti G.** Probabilistic Method in Structural Engineering / Augusti G., Baratta A., Casciati F. – Moscow: Stroyizdat, 1988. – 584 p. (in Russian).
- 6 **Bazhenov Y. M.** The concrete under dynamic loading. / Y. M. Bazhenov - Moscow:

Stroyizdat, 1970. – 272 p. (in Russian).

7 **Gal'bur V. A.** Influence of hydrogen explosion on containment of NPP's reactor hall / M. F. Ivanov, V. N. Mineev, V. N. Fortov, A. I. Funtikov, S. V. Utyuzhnikov, Shutov A. V. // *Mathematical Simulation*. – 2002. – Vol. 14, No 1. – P. 73-86. (in Russian).

8 **Golovko K. G.** The dynamics of inhomogeneous shells under transient loads / Golovko K.G., Lugovoy P.Z., Meysh V.F. – Kyiv: Publishing and printing center «Kyiv University», 2012. – 541 p. (in Russian).

9 **Kiselev A. S.**, Improvement of operational characteristics of NPP's containments / A. S. Kiselev, E. A. Koshmanov, V. N. Medvedev, A. N. Ul'yanov. - Moscow: Nuclear Safety Institute, Preprint № NSI-22-94, June 1994. – 19 p. (in Russian).

10 **Clough R.** Dynamics of Structures / R. Clough, J. Penzien – Moscow: Stroyizdat, 1979. – 320 p. (in Russian).

11 **Krytskyi V. B.** Software «DIPROS» (Dynamics and strength of shell systems). Application guide (brief version) / V. B. Krytskyi – Kyiv: Kyiv. Eng.-Constr. Inst, 1990. – Deposited in UkrNIINTI 26.07.90, № 1222-UK90. – 70 p.

12 **Krytskyi V. B.** Simulation of the dynamic behavior of NPP constructions on the base of a mixed basis of the reduction of the natural oscillation modes and vectors of Lanczos / V. B. Krytskyi, A. A. Karnaukhov O. A. Trubchaninov // «Nuclear and Radiation Safety». Kyiv: SSTC NRS. – 2000, – No 1. –P. 62-68. (in Russian).

13 **Krytskyi V.B.**, Krytskyi A.B. An effective scheme for forming the reduced nonlinear equations for shells on the basis of the moment scheme of finite elements (MSFE) / V. B. Krytskyi, A. B. Krytskyi // «Strength of Materials and Theory of Structures». – Kyiv: Budivelnik. – 1996. – Vol. 62. – P. 88–89. (in Russian).

14 **Krytskyi V. B.** Numerical simulation of stress-strain state of NPP's reactor hall containment under dynamic loading / V. B. Krytskyi, A. B. Krytskyi, Mudragel S.A. // *Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*. Kyiv: Mashinostroenie. – 1997. – Vol. 32. – P. 256–259. (in Russian).

15 **Krytskyi V. B.** About the results of comparative calculations of reactor hall containment of VVER-1000 / V-320 type / V. B. Krytskyi, E. E. Mayboroda, M. G. Ulanovskii // *The Analysis of Prestress Loss in Tendons of the WWER-1000 Containments*. International Conference Proceedings. GRS, Berlin, Germany, 12-19.12.1998. – Berlin, Germany: GRS. – 1999. – P. 141-158. (in Russian).

16 **Lugovoi P. Z.** Transient dynamics of inhomogeneous shell structures / P. Z. Lugovoi, V. F. Meyshe, E. A. Shtantcel. – Kyiv: Publishing. Polygraph. Center «Kyiv University», 2005. – 536 p. (in Russian).

17 **Lugovoi P. Z.** About the influence of nature of pulsed load on the dynamic behavior of shells / P. Z. Lugovoi // *Pres. of AS of USSR. Ser. A. Phis.-Math and Techn. Sciences*. – 1990. – No 2. – P. 41–44.

18 Finite elements method in mechanics of solid / Under general edition of A. S. Saharov and Y. Altenbah. – Kyiv: Visha Shkola, 1982. – 480 p. (in Russian).

19 **Piskunov N. S.** Differential and Integral Calculus. Volume 2. Textbook for technical colleges / N. S. Piskunov. – Moscow: Nauka, 1985. – 560 p. (in Russian).

20 **Ponomarev S. D.** Calculations for strength in mechanical engineering. Volume III. / S. D. Ponomarev, V. L. Biederman, K. K. Liharev, V. M. Makushin, I. I. Malinin, V. I. Feodosyev – Moscow: State scient.-techn. edition for the mechanical engineering literature, 1959. – 264 p. (in Russian).

21 Calculated substantiation of system hydrogen removal from containment under several accidents for Units №№ 1, 2 BE SUNPP. – SE NNEC «Energoatom», 11.15.12. – 138 p. (in Russian).

22 **Samuli V. I.** Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. / V. I. Samuli. –

Moscow: Visshaya Shkola, 1982. – 264 p. (in Russian).

23 NP 306.2.141-2008. General principles of providing the safety of nuclear power plants. – Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2008. – 58 p. (in Russian).

24 SNIP 2.03.01-84. Concrete and reinforced concrete structures. – Moscow: Gosstroy of the USSR, 1985. – 80 p. (in Russian).

25 Determination of the friction coefficient for tendon №89 of Unit №6 of Zaporizhzhya NPP in order to clarify the total loss of tension force along the length of tendon. – Moscow: Orgenergostry Institute, 1991. – 28 p. (in Russian).

26 South-Ukrainian NPP. Unit №1. The prestress system of containment (SPZO). Calculated substantiation of applicability of containment for operation based on the results of the CRW in 1992. 210502.0422142.00001.601 KZH.R1. – Moscow: State Scientific-research and Design-survey Institute (GNIPKII) «Atomenergoproect», 1992. – 76 p. (in Russian).

27 **Krytsky V. B.** About Use in Ukraine the FEM Assessments and Grounds of the Strength and Reliability of the Nuclear Installation's Structures / V. B. Krytsky // The Finite Element Analysis of Degraded Concrete Structures. OECD/NEA Workshop Proceedings. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, 29-30.10.1998. – Paris, France: OECD. – 1999. – P. 88-92.

28 **Krytsky V. B.**, Probabilistic Approaches in Assessment of Strength Reliability of NPP's Concrete Containment / V. B. Krytsky, V. A. Gasanenko // Simulation in Industry'2000. 12th European Simulation Symposium 2000. ESS'2000. September 28-30.2000. Hamburg, Germany. [SCS]. – The Netherlands, Delft: The Society for Computer Simulation International. – 2000. – P. 577–581.

29 **Krytsky V. B.** Service Life Predication and Ageing Management of WWERO-1000 NPP's Concrete Containment Prestress System / V. B. Krytsky, A. A. Karnauhov, M. G. Ulanovskyy // Life Predication and Ageing Management of Concrete Structures. International Conference Proceedings. Bratislava, Slovakia, 06-08.07.1999. – Bratislava, Slovakia: Expertcentrum. – 1999. – P. 203-206.

¹ *Інститут механіки ім. С.П.Тимошенко НАН України
Київ, Україна,*

² *Державний науково-технічний центр
з ядерної та радіаційної безпеки
Київ, Україна*

Надійшла до редколегії 03.06.2016