

## Анализ динамического поведения и напряженно-деформированного состояния защитной оболочки реакторного отделения АЭС при нестационарных воздействиях

С использованием метода конечных элементов и программного комплекса «ДИПРОС» выполнен анализ динамического поведения железобетонной защитной оболочки (ЗО) реакторного отделения энергоблока АЭС при совместном действии внутреннего аварийного давления и проектного землетрясения. На основе модального анализа и решения системы уравнений движения определено напряженно-деформированное состояние конструкций ЗО в аварийный период. Показано, что интенсивность напряжений в герметизирующей стальной облицовке (ГСО) ЗО не превышает предел текучести материала ГСО, т. е. сохраняется целостность ГСО, ЗО остается работоспособной и обеспечивает соблюдение требований по радиационной безопасности.

**Ключевые слова:** АЭС, защитная оболочка, герметизирующая стальная облицовка, арматурный канат, система предварительного напряжения защитной оболочки, проектная авария, аварийное давление, динамическое поведение, проектное землетрясение, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

**П. З. Луговий, В. Б. Крицкий, Н. И. Крицка**

**Аналіз динамічної поведінки і напружено-деформованого стану захисної оболонки реакторного відділення АЕС в умовах нестационарних впливів**

З використанням методу скінчених елементів і програмного комплексу «ДИПРОС» виконано аналіз динамічної поведінки залізобетонної захисної оболонки (ЗО) реакторного відділення енергоблока АЕС у разі спільної дії внутрішнього аварійного тиску та проектного землетрусу. На основі модального аналізу й розв'язання системи рівнянь руху визначено напружено-деформований стан конструкцій ЗО в аварійний період. Показано, що інтенсивність напружень у герметизуючому сталевому облицюванні (ГСО) ЗО не перевищує границю плинності матеріалу ГСО, тобто зберігається цілісність ГСО, ЗО залишається працездатною й забезпечує дотримання вимог з радіаційної безпеки.

**Ключові слова:** АЕС, захисна оболонка, герметизуюче сталеве облицювання, арматурний канат, система попереднього напруження захисної оболонки, проектна аварія, аварійний тиск, динамічна поведінка, проектний землетрус, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів.

© П. З. Луговой, В. Б. Крицкий, Н. И. Крицкая, 2016

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

Рассматриваемая в данной работе ЗО реакторной установки ВВЭР-1000/В-302 представляет собой комбинированную тонкостенную конструкцию, образованную цилиндрической (вертикальные стены толщиной 1,2 м) и сферической (покрытие — купол толщиной 1,1 м) оболочками, имеющими неоднородную по толщине структуру; наружный слой ЗО выполнен из предварительно напряженного железобетона, а внутренний — герметизирующая стальная облицовка (ГСО) толщиной 8 мм — из соединенных сваркой криволинейных стальных листов. Внутренний диаметр цилиндрической части ЗО равен 45,00 м, внутренний радиус сферического купола — 35,60 м. Цилиндрическая часть сооружения на отм. 11,80 м опирается на мощную железобетонную плиту-перекрытие толщиной 2,5 м. Высшая точка наружной поверхности купола (полюс) имеет отметку 75,95 м. Зона сочленения цилиндра и купола ниже отм. 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 ЗО (СПЗО). Анкерные устройства АК цилиндрической части сооружения расположены также в нижней части опорной плиты ЗО на отм. 9,30 м. В цилиндрической части ЗО ниже анкерного карниза на отм. 54,95 м находится верх кольцевой консоли, по которой уложен подкрановый рельс мостового крана кругового действия реакторного отделения.

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

Согласно требованиям нормативных документов по ядерной и радиационной безопасности [2–5], проектом АЭС должна быть исключена возможность выхода радиоактивных веществ (сред) за пределы РО (зоны локализации аварии) при любых проектных авариях, инициированных внешними или внутренними исходными событиями природного и/или технологического характера. В данной работе анализируется напряженно-деформированное состояние (НДС) и динамическое поведение ЗО в условиях максимальной проектной аварии (МПА) с экстремальными значениями среды в РО и воздействия проектного землетрясения (ПЗ) согласно [3, 4]. Критерием отказа ЗО — потери локализирующей функции — является, согласно [4], нарушение целостности ГСО. Указанный отказ может проявиться в виде разрыва основного металла листов ГСО и/или сварных швов, соединяющих листы, при высоких уровнях пластических деформаций. Условием достижения указанного критерия отказа принято достижение/превышение значением интенсивности напряжений в материале ГСО (сталь ВСтЗсп5) предела текучести металла  $\sigma_T = 245,0$  МПа [6, 7]. Указанное условие, хорошо известное как условие пластичности Губера — Мизеса — Генки [8], широко применяется в инженерных расчетах и имеет следующий вид:

$$\frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}}{\sqrt{2}} \geq \sigma_T,$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести материала;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  — нормальные и касательные напряжения в материале.

Таблица 1. Характеристики слоев стенки ЗО, принятые для расчета

№ слоя	Конструктивные особенности слоя	Внутренний радиус/ 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	0,300
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

Для расчета НДС и динамического поведения ЗО в принципе можно использовать теорию двухслойных оболочек или оболочек на упругом основании [9—13]. Но описанные в [9—13] методы не вполне приемлемы для расчета ЗО — сложной оболочечной конструкции, которой присущи 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 использованы программное обеспечение (ПО) «ДИПРОС» [14, 15], реализующее вариант метода конечных элементов (МКЭ), известный как моментная схема конечных элементов (МСКЭ) [16], а также соответствующие модифицированные численные алгоритмы решения уравнений движения МКЭ-модели [14, 15, 17—19] при расчетных динамических нагрузках (скачок внутреннего давления в ЗО от МПА и сейсмическое воздействие на ЗО от ПЗ).

По рассматриваемой проблеме — воздействие на ЗО сочетания нагрузок МПА+ПЗ — в [20] исследована нелинейная сейсмическая реакция защитной оболочки энергоблока АЭС. Целью настоящей работы является расчетное исследование с помощью разработанного ПО «ДИПРОС» [14, 15], реализующего методологию МКЭ/МСКЭ [16] и соответствующие численные алгоритмы [17—19], возможности отказа ЗО (потери локализирующей функции гермоограждения) вследствие нарушения целостности ГСО в условиях комбинации технологических воздействий от максимальной проектной аварии в РО (скачка давления) и сейсмической нагрузки на ЗО от проектного землетрясения.

**Принятые гипотезы и допущения. Особенности моделирования объекта и воздействий на него. Основные уравнения.** 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 актуален 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, применен метод конечных элементов, которому, в частности, присущи инженерная наглядность, возможность любой степени детализации расчетных

моделей, алгоритмичность. Этот метод в последние десятилетия получил широкое распространение в практике исследований НДС и механического поведения сложных инженерных конструкций и систем.

На этапе построения расчетной модели ЗО принят ряд упрощающих гипотез и допущений, которые выбирались и принимались таким образом, чтобы обеспечить высокий уровень консервативности расчетных оценок НДС сооружения.

ЗО по толщине моделировалась четырьмя слоями конечных элементов (КЭ): тремя наружными слоями бетона и одним внутренним слоем металла, соответствующим стальной гермооблицовке.

Принималось, что в пределах объема одного КЭ материал ЗО является изотропным. Принятые приведенные расчетные физико-механические характеристики материала каждого слоя ЗО (учитывающие физико-механические характеристики бетона, ненапрягаемой и/или предварительно напряженной арматуры, наличие 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, определена серией вычислительных экспериментов. Выбор оптимальной степени МКЭ-дискретизации осуществлялся по таким качественным критериям, как:

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,

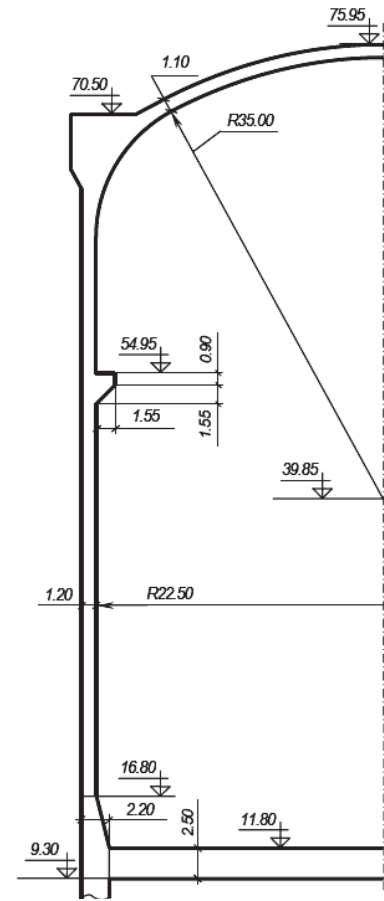


Рис. 1. Внешний вид 30 энергоблока АЭС и поперечный разрез сооружения

28547 узлов, 85641 неизвестных системы разрешающих уравнений МКЭ (узловых перемещений).

Внешний вид 30 энергоблока АЭС, поперечный разрез сооружения, расчетная МКЭ-модель 30 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 30 представлены на рис. 1—5.

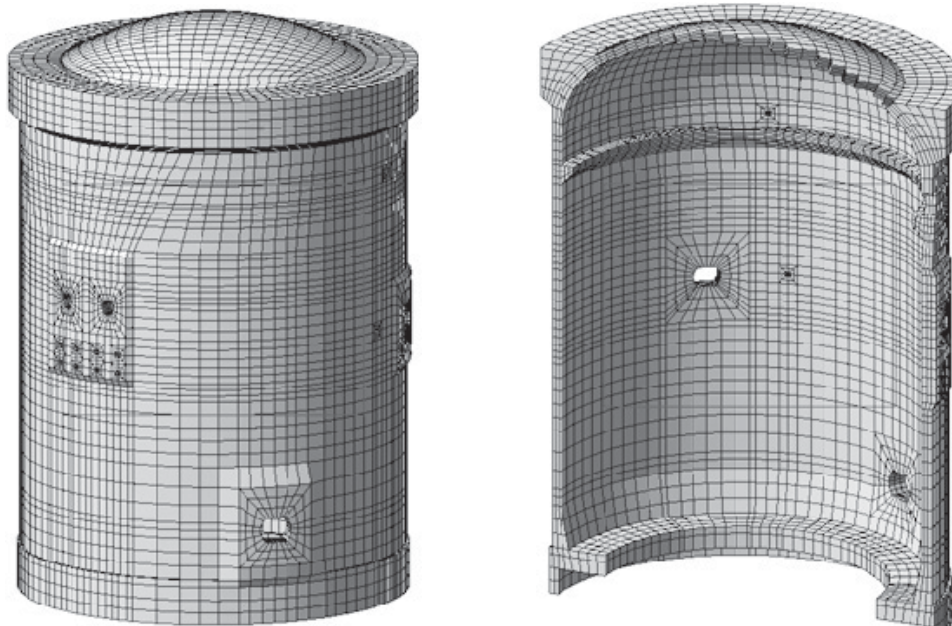


Рис. 2. Внешний вид и разрез расчетной МКЭ-модели 30 энергоблока АЭС

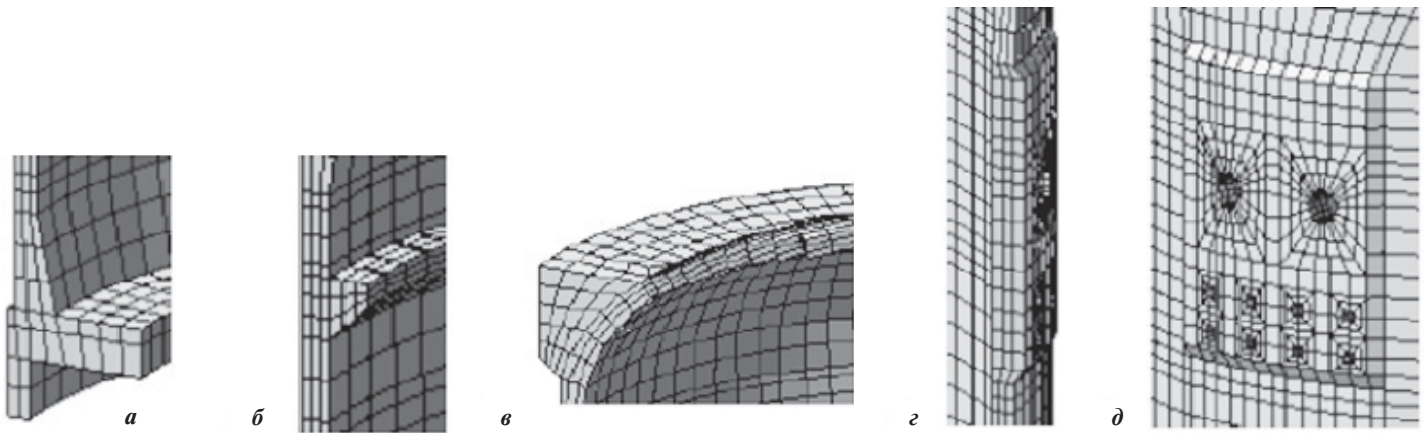


Рис. 3. МКЭ-моделирование областей нерегулярной геометрии ЗО (зон отверстий, местных утолщений, изломов поверхности, др.):  
 а — фрагмент опорной плиты (стилобата) и приопорное утолщение ЗО; б — анкерный карниз ЗО с примыкающим куполом; в — консоль рельсового пути полярного крана; г, д — утолщение в зоне проходов трубопроводов питательной воды и главных паропроводов

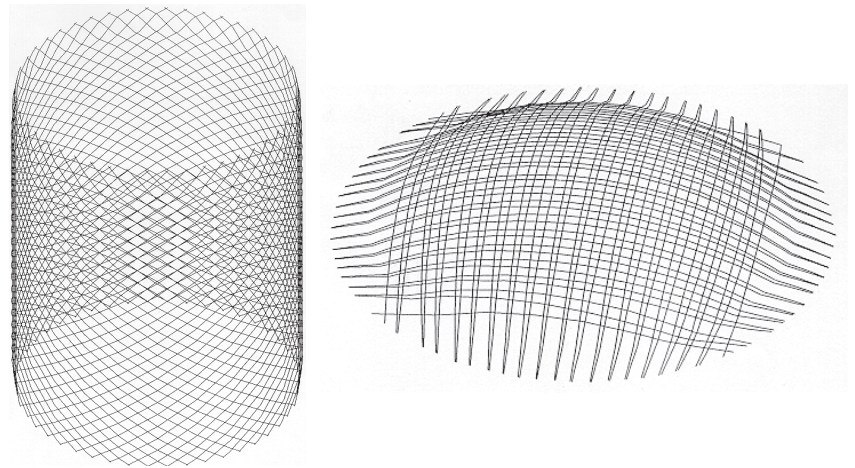


Рис. 4. Обобщенная схема разводки арматурных канатов системы преднапряжения в цилиндрической и купольной частях ЗО

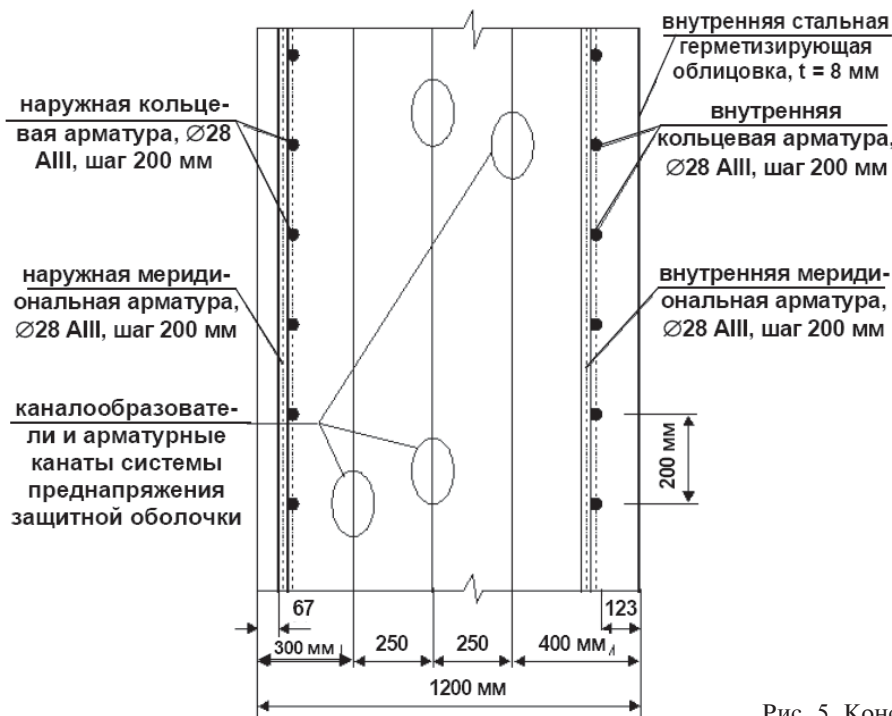


Рис. 5. Конструкция стенки цилиндрической части ЗО

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

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

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

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

ось  $z^2$  лежит в плоскости основания ЗО и направлена в плоскости чертежа слева направо;

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

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

центры местных (конечно-элементных) косоугольных систем координат совпадают с геометрическими центрами КЭ;

ось  $x^1$  совпадает с направлением внешней нормали к срединной поверхности ЗО;

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

ось  $x^3$  направлена вдоль меридиана ЗО от ее основания к вершине купола.

Расчет НДС и динамического поведения ЗО выполнен для условий воздействия на сооружение следующих нагрузок:

собственного веса конструкций сооружения;

усилий обжатия сооружения арматурными канатами системы преднапряжения;

аварийного давления паровоздушной смеси 0,35 МПа (избыточное) в подбололочном пространстве;

сейсмического воздействия от проектного землетрясения интенсивностью 6 баллов.

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 армоканатами СПЗО осуществлялось по методике, учитывающей реальные траектории каналобразователей системы преднапряжения (см. рис. 4).

Значение усилия натяжения АК в заданной точке его траектории определяется с учетом потерь усилия по длине АК из-за трения между АК и поверхностью каналобразователя. Функция изменения усилия натяжения АК по его длине принята согласно зависимости, приведенной в СНиП 2.03.01-84 [21, п. 1.25, табл. 5, поз. 4]:

$$N = N_0 e^{-\delta\theta}$$

где  $N_0$  — усилие натяжения АК на тяжном анкере (принимается 722,8 тс для АК цилиндра и 696,7 тс для АК купола);  $\delta = 0,085$  — обобщенный коэффициент трения между АК и поверхностью каналобразователя (определен экспериментально, см. [22]);  $\theta$  — 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 каналобразователя

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

а сила давления АК на КЭ

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

где  $N_1, N_2$  — усилия натяжения АК в точках «входа» в КЭ и «выхода» из КЭ;  $\theta_1, \theta_2$  — интегральный (накопленный) угол закрутки касательной к траектории АК в точках «входа» в КЭ и «выхода» из КЭ.

В соответствии с принятой методикой рассчитано силовое воздействие АК на каждый конечный элемент с последующим пересчетом этого воздействия к эквивалентному вектору усилий в узлах КЭ, 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 (точек «входа» АК в КЭ и «выхода» АК из КЭ);

определение компонентов вектора усилия натяжения АК в точках  $T_1, T_2$  с учетом величины усилия натяжения АК на анкере, а также потерь усилия натяжения по длине АК вследствие его трения о поверхность каналобразователя;

определение погонных нагрузок воздействия АК на КЭ (от силы трения между АК и поверхностью каналобразователя  $F$  и от 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. График снижения давления в гермообъеме после первоначального аварийного скачкообразного его повышения давления приведен на рис. 6 [23, п. 3.3.2.2.1]).

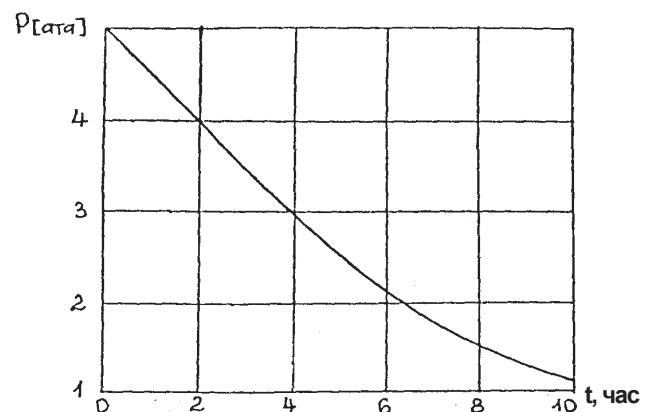


Рис. 6. Изменение во времени давления паровоздушной среды в гермообъеме энергоблока АЭС при проектной аварии

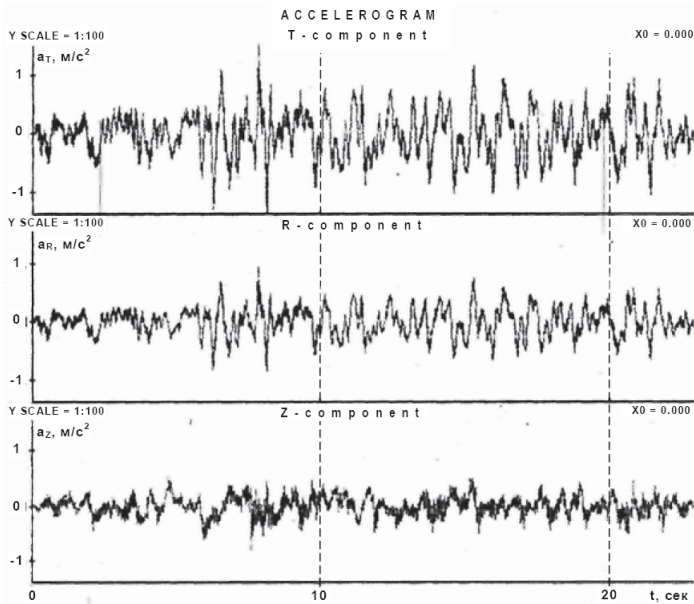


Рис. 7. Трехкомпонентная акселерограмма проектного землетрясения на промплощадке энергоблока АЭС

Для задания сейсмического воздействия на ЗО от проектного землетрясения использована оцифрованная трехкомпонентная акселерограмма, полученная по результатам доисследований сейсмической опасности на территории размещения промплощадки АЭС (рис. 7).

Сходимость и численная устойчивость примененной модификации МКЭ—МСКЭ обоснована в [16]. С целью же 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 разработанной МКЭ-модели ЗО. Согласно результатам верификационных исследований, ориентированных на сопоставление полученных расчетов и альтернативными методами радиальных перемещений цилиндрической части ЗО в условиях внутреннего избыточного испытательного давления в ЗО 0,42 МПа, имеем:

1) расхождение результата численного расчета — 6,02 мм — с соответствующим аналитическим решением (задача Ляме [8]) — 5,80 мм — составляет 3,8 % (сопоставление результатов расчета с аналитическими решениями);

2) расхождение результата численного расчета — 6,02 мм — и данных геодезических наблюдений в процессе испытаний — 6,50 м — составляет 7,4 % (сопоставление результатов расчета с натурными измерениями [24]);

3) расхождение результата расчета, полученного с применением ПО «ДИПРОС» — 6,02 мм, — и результата, полученного альтернативными программными средствами («CONT» [25, 26], «ЛИРА» [27], «SCAD» [28], «ADINA» [29, 30], «ANSYS» [31]) — 5,3...7,34 мм — составляет 13,6...18 % (сопоставление результатов расчета с результатами, полученными другими программными средствами).

Таким образом, на основании изложенного в пп. 1—3 выше, можно утверждать, что результаты верификации (сопоставления результатов расчета ЗО по ПО «ДИПРОС» с аналитическими решениями, с данными натурных измерений деформаций сооружения и с результатами расчетов

альтернативными программными средствами) подтвердили корректность разработанной расчетной МКЭ-модели ЗО, ее адекватность реальному сооружению и возможность получения достоверных данных об НДС объекта.

**Алгоритм анализа динамического поведения ЗО.** Основным соотношением, описывающим динамическое поведение произвольной механической системы, в частности ЗО, является вариационный принцип Гамильтона, который может быть записан следующим образом [17]:

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

где  $\delta$  — вариация для определенного временного интервала;  $T$  — 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.

Приняв (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;  $\{P(t)\}$  — вектор узловых нагрузок МКЭ-модели ЗО;  $t$  — время.

Для анализа сейсмостойкости сооружений применяются [3, 32] статический метод расчета на сейсмостойкость, линейно-спектральный метод расчета на сейсмостойкость и метод динамического анализа сейсмостойкости.

Динамическое поведение ЗО в данной работе фактически анализировалось методом динамического анализа путем решения системы уравнений движения МКЭ-модели (2) в главных координатах. Согласно методологии, изложенной, в частности, в [17], в качестве главных координат принята совокупность форм собственных колебаний МКЭ-модели ЗО. 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 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  $[B]$  (см. [17]), — матрицы  $[m]$  и  $[k]$  (масс и жесткости редукцированной 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  $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ ):

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

где

$$\begin{aligned} p_i(t) &= p_i(t_1) + \frac{p_i(t_2) - p_i(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1) = \\ &= C_i(t - t_1) + D_i = C_i \tau + D_i = p_i(\tau); \\ t_1 \leq t \leq t_2; \Delta t &= t_2 - t_1; \tau = \tau(t) = t - t_1; \\ \tau(t_1) &= 0; \tau(t_2) = \Delta t; 0 \leq \tau \leq \Delta t; \\ D_i &= p_i(t_1) = p_i(\tau_1) = p_i(0); \\ C_i &= \frac{p_i(t_2) - p_i(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{p_i(\Delta t) - p_i(0)}{\Delta t}. \end{aligned}$$

Функция — решение отдельного дифференциального уравнения, являющегося компонентом системы уравнений (5), — представляет собой сумму общего  $q_i^0(\tau)$

и частного  $q_i^*(\tau)$  решений и определяется согласно стандартной процедуре, изложенной в [17, 33]:

$$\begin{aligned} q_i(\tau) &= q_i^0(\tau) + q_i^*(\tau), \\ q_i^0(\tau) &= A_i \sin \omega_i \tau + B_i \cos \omega_i \tau, \\ A_i &= [\dot{q}_i(0) - C_i / k_i] / \omega_i, \\ \dot{q}_i^0(\tau) &= A_i \omega_i \cos \omega_i \tau + B_i \omega_i \sin \omega_i \tau, \\ B_i &= q_i(0) - D_i / k_i, \\ q_i^*(\tau) &= (C_i \tau + D_i) / k_i. \end{aligned}$$

Полученные обобщенные перемещения  $q_i(\Delta t)$  и скорости  $\dot{q}_i(\Delta t)$  редуцированной МКЭ-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  $\Delta t$  согласно формуле (3) вычисляются

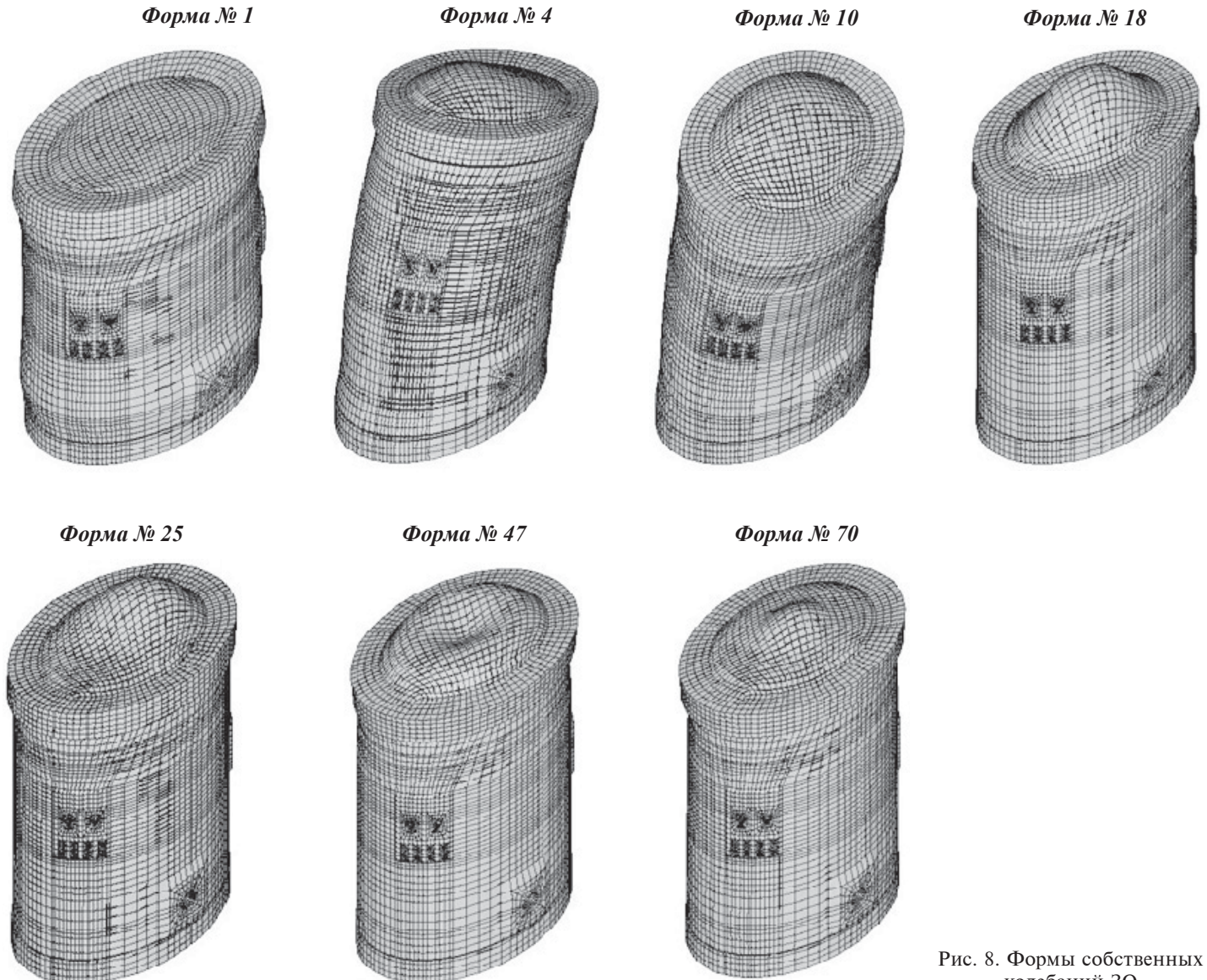


Рис. 8. Формы собственных колебаний 30

узловые перемещения, скорости, ускорения, а также параметры 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 ЗО при воздействии скачка давления в гермозоне и проектного землетрясения:

1) модальный анализ (определение динамических характеристик ЗО — частот и форм собственных колебаний);

2) определение НДС ЗО, соответствующего формам собственных колебаний;

3) определение базиса редукции — существенно возбуждаемых (энергетически емких) форм собственных колебаний ЗО при воздействии скачка давления в гермозоне и проектного землетрясения;

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 получено 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 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 %), т. е. значительно влияющими на динамическое поведение объекта. Изображение упомянутых форм колебаний ЗО приведено на рис. 8.

Согласно результатам расчета, максимальная интенсивность напряжений в стальной гермооблицовке составила 195,3 МПа и была зарегистрирована в момент времени

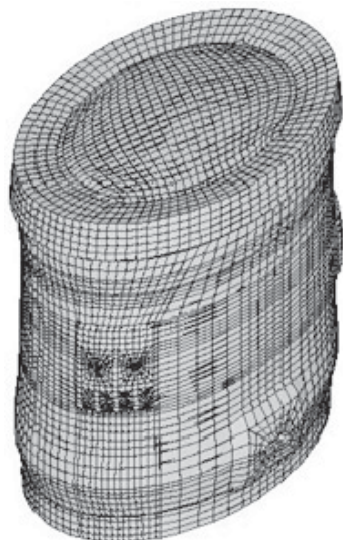


Рис. 9. Деформированная форма ЗО, соответствующая максимальной интенсивности напряжений в ГСО 195,3 МПа (момент времени 16,83 с после начала землетрясения)

16,83 сек после начала землетрясения в цилиндрической части ЗО, в зоне, расположенной на 6,2 м выше опорной поверхности цилиндра. Деформированная форма ЗО, соответствующая указанному моменту времени, приведена на рис. 9. Поскольку указанная интенсивность напряжений не превышает предела 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  $(1 - 195,3/245,0) \cdot 100 \% = 20,3 \%$ . Таким образом, работоспособность ЗО (выполнение сооружением локализирующей функции) будет обеспечена.

## Выводы

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

из 100 форм собственных колебаний ЗО (и соответствующих им частот) нижней части полного спектра собственных колебаний ЗО лишь 7 форм оказались «существенно возбуждаемыми» (энергетически емкими), имеющими высокую модальную массу и значительно влияющими 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 ЗО (выполнение сооружением локализирующей функции) будет обеспечена.

## Список использованной литературы

1. НП 306.2.141–2008. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. — К.: Государственный комитет ядерного регулирования Украины, 2008. — 58 с.
2. ПуН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. — М.: Минатомэнерго СССР, 1986. — 21 с.
3. ПНАЭ Г-5–006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. — М.: Госатомэнергонадзор СССР, 1988. — 29 с.
4. ПНАЭ Г-10–007-89. Нормы проектирования железобетонных сооружений локализирующих систем безопасности атомных станций. — М.: Госпроматомнадзор СССР, 1991. — 40 с.
5. ПНАЭ Г-10–021-90. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций. — М.: Госпроматомнадзор СССР, 1990. — 102 с.
6. ГОСТ 14637-89. Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия. — М.: Министерство металлургии СССР, 1989. — 10 с.
7. ПНАЭ Г-7–002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
8. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности / В. И. Самуль. — М.: Высш. шк., 1982. — 264 с.
9. Головки К. Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / К. Г. Головки, П. З. Луговой, В. Ф. Мейш. — К.: Изд.-полиграф. центр «Киевский университет», 2012. — 541 с.
10. Луговой П. З. Нестационарная динамика неоднородных оболочечных конструкций / П. З. Луговой — В. Ф. Мейш — Э. А. Штанцель. — К.: Изд. полигр. центр «Киевский ун-т», 2005. — 536 с.
11. Lugovoi P. Z. Effects of Elastic Foundation on Dispersion of Harmonic Waves in Cylindrical Shells Stiffened Longitudinally / P. Z. Lugovoi — N. Ya. Prokopenko // Int. Appl. Mech. — 2015. — № 5. — P. 116–124.



12. Skosarenko Yu. V. Natural Vibrations of Ribbed Cylindrical Shell interaction with Elastic Foundation / Yu. V. Skosarenko // *Int. Appl. Mech.* — 2014. — № 5. — P. 111–128.

13. Skosarenko Yu. V. Stress-Strain State of Ribbed Cylindrical Shell Interaction with Elastic Foundation under Short-Time Loads / Yu. V. Skosarenko // *Int. Appl. Mech.* — 2015. — № 1. — P. 112–122.

14. 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. — 70 с. — Деп. в УкрНИИТИ 26.07.90, № 1222-Ук90.

15. Крицкий В. Б. Моделирование динамического поведения элементов конструкций АЭС на основе применения смешанного базиса редукиции из собственных форм колебаний и векторов Ланцоша / В. Б. Крицкий, А. А. Карнаухов, О. А. Трубочанов // *Ядерная радиационная безопасность*, — 2000. — № 1. — С. 62–68.

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

17. Клаф Р. Динамика сооружений / Клаф Р., Пензиен Дж. — М. : Стройиздат, 1979. — 320 с.

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

19. Крицкий В. Б. Численное моделирование НДС защитной оболочки реакторного отделения АЭС при динамическом нагружении / В. Б. Крицкий, А. Б. Крицкий, С. А. Мудрагель // *Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт»*. — 1997. — Вып. 32. — С. 256–259.

20. Нелинейная сейсмическая реакция защитной оболочки энергоблока АЭС после проектной аварии / В. Б. Крицкий, Н. Г. Марьенков, К. Н. Бабик, О. Г. Недзведская // *Міжвідомчий наук.-техн. збірник наук. праць «Будівельні конструкції»*. — 2015. — № 82. — С. 619–636.

21. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. — М. : Госстрой СССР, 1985. — 80 с.

22. 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.

23. Южно-Украинская АЭС. Блок № 1. Проект. Техническое обоснование безопасности. Сооружения и эксплуатация АЭС. — Кн. 3. — Харьков: Харьк. научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Атомэнергопроект», 1991.

24. Акт № 1-06/449 от 18.11.82 «О проведении испытаний защитной оболочки на плотность и прочность» / ОП «Южно-Украинская АЭС». — 2 с.

25. Повышение эксплуатационных качеств защитных оболочек АЭС / А-др С. Киселев; Алексей С. Киселев; Е. А. Кошманов; В. Н. Медведев; А. Н. Ульянов. — М. : Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики, 1994. — 19 с. — (Препринт № NSI-22-SM).

26. Южно-Украинская АЭС. Блок № 1. Система преднапряжения защитной оболочки (СПЗО). Расчетное обоснование пригодности защитной оболочки к эксплуатации по результатам КПП в 1992 г. 210502.0422142.00001.601 КЖ.Р1. — М. : ГНИППКИИ «Атомэнергопроект», 1992. — 76 с.

27. Программный комплекс ЛИРА : Аттестационный паспорт программного средства от 26.05.05 № 193 / НИИАСС Госстроя Украины. — М. : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору; Науч.-техн. центр по ядерной и радиационной безопасности, 2005. — 4 с.

28. Проектно-вычислительный комплекс Structure CAD (ПВК SCAD) : Аттестационный паспорт программного средства от 02.11.2000 № 124 / Бурьгин С. Г., Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Перельютер М. А., Шимановский А. В.; Укр. ин-т исследований окр. Среды и ресурсов при СНБО Украины. — М. : Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности; Науч.-техн. центр по ядерной и радиационной безопасности, 2000. — 5 с.

29. 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. — С. 141–158.

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

31. Программа ANSYS 5.2–5.7 : Аттестационный паспорт программного средства от 31.10.2002 № 145 / ANSYS Inc. — М. : Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности; Науч.-техн. центр по ядерной и радиационной безопасности, 2002. — 6 с.

32. Бирбраер А. Н. Расчет конструкции на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. — СПб. : Наука, 1998. — 255 с.

33. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление : Учеб. пособие для вузов / Н. С. Пискунов. — Т. 2. — М. : Наука, 1985. — 560 с.

## References

1. NP 306.2.141–2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants [Obshchiie polozheniia obespecheniia bezopasnosti atomnykh stantsii], Kyiv, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2008, 58 p. (Rus)

2. PiNAE-5.6. Standards for Design of NPPs with Different Reactor Types [Normy stroitel'nogo proektirovaniia AS s reaktorami razlichnogo tipa], Moscow, Minatomenergo USSR, 1986, 21 p. (Rus)

3. PNAE G-5–006–87. Design Standards of Seismic Resistant Nuclear Power Plants [Normy proektirovaniia seismostoikikh atomnykh stantsii], Moscow, Gosatomnenergonadzor USSR, 1988, 29 p. (Rus)

4. PNAE G-10–007–89. Standards for Design of Reinforced Concrete Structures of Confining NPP Safety Systems [Normy proektirovaniia zhelezobetonnykh sooruzhenii lokalizuiushchikh system bezopasnosti atomnykh stantsii], Moscow, Gospromatomnadzor USSR, 1991, 40 p. (Rus)

5. PNAE G-10–021–90. Rules for Arrangement and Operation of Confining NPP Safety Systems [Pravila ustroistva i ekspluatatsii lokalizuiushchikh system bezopasnosti atomnykh stantsii], Moscow, Gospromatomnadzor USSR, 1990, 120 p. (Rus)

6. GOST 14637–89. Hot-Rolled Plate from Carbon Steel of Standard Quality. Technical Specifications [Prokat tolstolistovoi iz uglerodistoi stali obyknovennogo kachestva. Tekhnicheskie usloviia], Moscow, Ministry of Metallurgy of USSR, 1989, 10 p. (Rus)

7. PNAE G-7–002–86. Standards for Strength Calculation of NPP Equipment and Piping [Normy raschiota na prochnost oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok], Moscow, Energoatomizdat, 1989, 528 p. (Rus)

8. Samul', V.I. (1982), "Fundamentals of Elastic and Plastic Theory" [Osnovy terorii uprugosti i plastichnosti], Moscow, High School, 264 p. (Rus)

9. Golovko, K.G., Lugovoi, P.Z., Meish, V.F. (2012), "Dynamics of Heterogeneous Shells Under Nonstationary Loads" [Dinamika neodnorodnykh obolochek pri nestatsionarnykh nagruzkakh], Kyiv, Kyiv University Publishing Center, 541 p. (Rus)

10. Lugovoi, P.Z., Meish, V.F., Shtantsel, E.A. (2005), "Nonstationary dynamics of Heterogeneous Shell Structures" [Nestatsionarnaia dinamika neodnorodnykh obolocheknykh konstrukttsii], Kyiv, Kyiv University Publishing Center, 536 p. (Rus)

11. Lugovoi, P.Z., Prolopenko, N.Ya. (2015), "Effects of Elastic Foundation on Dispersion of Harmonic Waves in Cylindrical Shells Stiffened Longitudinally", *Int. Appl. Mech.*, No. 5, pp. 116–124.

12. Skosarenko, Yu.V. (2014), "Natural Vibrations of Ribbed Cylindrical Shell Interaction with Elastic Foundation", *Int. Appl. Mech.*, No. 5, pp. 111–128.

13. Skosarenko, Yu.V. (2015), "Stress-Strain State of Ribbed Cylindrical Shell Interaction with Elastic Foundation under ShortTime Loads", *Int. Appl. Mech.*, No. 1, pp. 112–122.

14. Kryts'kyi, V.B. (1990), "DIPROS Software (Dynamics and Strength of Shell Systems). Application Description (Condensed Version)" [Kompleks program "DIPROS" (Dinamika i prochnost obolocheknykh system. Opisanie primeneniia (sokrashchionnyi variant)], Kyiv Construction and Architecture Institute, 70 p. (Rus)
15. Kryts'kyi, V.B., Karnaukhov, A.A., Trubchaninov, O.A. (2000), "Modeling Dynamic Behavior of NPP Components Based on Mixed Basis Reduction from Oscillation Modes and Lanczos Vectors" [Modelirovaniie dinamicheskogo povedeniia elementov konstrukttsii AES na osnove primeneniia smeshannogo bazisa redukttsii iz sobstvennykh form kolebaniia i vektorov Lantsosha], No. 1, pp. 62–68. (Rus)
16. Sakharov, A.S., Altenbakh, I. (1982), "Finite Element Method in Mechanics of Solids" [Metod konechnykh elementov v mekhanike tvorydykh tel], Kyiv, High School, 480 p. (Rus)
17. Klaf, R., Penzien, J. (1979), "Dynamics of Structures" [Dinamika sooruzhenii], Moscow, Stroizdat, 320 p. (Rus)
18. Kryts'kyi, V.B., Kryts'kyi, A.B. (1996), "Efficient Scheme for Reduced Nonlinear Equations for Shells Based on Finite Element Scheme" [Effektivnaia skhema postroieniia redutsirovannykh nelineinykh uravnenii dlia obolochek na osnove momentnoi skhemy konechnykh elementov (MSKE)], Resistance of Materials and Theory of Structures, No. 62, pp. 88–99. (Rus)
19. Kryts'kyi, V.B., Kryts'kyi, A.B., Mudragel, S.A. (1997), "Numeric Modeling of Stress-Strain State of NPP Reactor Hall under Dynamic Loads" [Chislennoe modelirovaniie NDS zaschitnoi obolochki reaktornogo otdeleniia AES pri dinamicheskom nagruzhenii], Journal of Kyiv Polytechnical Institute, No. 32, pp. 256–259. (Rus)
20. Kryts'kyi, V.B., Marienkov, N.G., Babik, K.N., Nedzvedskaia, O.G. (2015), "Nonlinear Seismic Reaction of NPP Containment after Design-Basis Accident" [Nelineinaiia seismicheskaia reaktsiia zaschitnoi obolochki energobloka AES posle proektnoi avarii], Interdepartmental Scientific and Technical Collection of Scientific Efforts "Building Structures", No. 82, pp. 619–636. (Rus)
21. SNiP 2.03.01–84. Concrete and Reinforced Concrete Structures [Betonyie i zhelezobetonyie konstrukttsii], Moscow, Gosstroizdat, 1985, 80 p. (Rus)
22. Definition of Frictional Factor of Tendon No. 89 of Zaporizhzhya NPP Unit 6 in Order to Specify Total Frictional Head Along the Tendon [Opredeleniie koefitsienta treniia armaturnogo Kanata No. 89 energobloka No. 6 Zaporozhskoi AES s tseliu utochneniia summarnykh poter usilia natiazheniia po dline armokanata], Moscow, Orgenergostroi, 28 p. (Rus)
23. South Ukraine NPP. Unit 1. Design. Technical Safety Justification. NPP Construction and Operation [Yuzhno-Ukrainskaia AES. Blok 1. Proekt. Tekhnicheskoe obosnovaniie bezopasnosti. Sooruzheniie i ekspluatatsiia AES], Book 3, Kharkiv, Kharkiv Scientific Research and Design Institute "Atomenergoproekt", 1991. (Rus)
24. Certificate No. 106/449 dated 18 November 1982 "On Testing Containment Density and Strength" [O provedenii ispytaniia zaschitnoi obolochki na plotnost i prochnost], South Ukraine NPP, 2 p. (Rus)
25. Kiesliov, A.-dr.S., Kiseliov, A.S., Koshmanov, Ye.A., Medvedev, V.N., Ulianov, A.N. (1994), "Improvement of Operating Properties of NPP Containment" [Povysheniie ekspluatatsionnykh kachestv zaschitnykh obolochek AES], Moscow, Institute of Problems in Safe Development of Nuclear Engineering, 19 p., Preprint No. NSI-22-SM. (Rus)
26. South Ukraine NPP. Unit 1. Pre-Stressing System of Containment. Design Justification of Applicability of Containment for Operation According to Scheduled Outage Results in 1992. 210502.0422142.00001.601 KZh.R1 [Yuzhno-Ukrainskaia AES. Blok No. 1. Sistema prednapriazheniiazashchitnoi obolochki k ekspluatatsii po rezultatam KPR v 1992 g. 210502.0422142.00001.601 KZh.R1], Moscow, Atomenergoproekt, 76 p. (Rus)
27. LIRA Software: Software Qualification Certificate No. 193 as of 26 May 2005 [Programmnyi kompleks LIRA: Attestatsionnyi pasport programmnoho sredstva ot 26.05.05 No. 193], Moscow, Federal Service on Environmental, Technological and Nuclear Supervision; Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2005, 4 p. (Rus)
28. Burygin, S.G., Karpilovskii, V.S., Kriksunov, E.Z., Pere-liuter, M.A., Shimanovskii, A.V. (2000), "Computer Complex Structure CAD (SCAD): Software Qualification Certificate No. 124 Dated 02.11.2000" [Proektno-vychislitelnyi kompleks Structure CAD (SCAD): Attestatsionnyi pasport programmnoho sredstva ot 02.11.2000 No. 124], Ukrainian Research Institute of Environment Safety and Resources, National Security and Defense Council of Ukraine, Moscow, Federal Service on Environmental, Technological and Nuclear Supervision; Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 5 p. (Rus)
29. Kryts'kyi, V.B., Moiboroda, Ye.Ye., Ulanovskii, M.G. (1999), "On Results of Comparative Calculations of Containment of VVER-1000/V-320" [O rezultatakh sopostavitelnykh raschiotov zaschitnoi obolochki reaktornogo otdeleniia VVER-1000/V-320], 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, pp. 141–158. (Rus)
30. Kryts'kyi, V.B., Karnaukhov, A.A., Ulanovskii, M.G. (1999), "Service Life Predication and Ageing Management of VVER-1000 NPP's Concrete Containment Prestress System. Life Predication and Ageing Management of Concrete Structures", International Conference Proceedings, Bratislava, Slovakia, 06–08.07.1999, Bratislava, Slovakia, Expertcentrum, pp. 203–206.
31. ANSYS 5.2–5.7 Software: Software Qualification Certificate No. 145 dated 31 October 2002. [Programma ANSYS 5.2–5.7: Attestatsionnyi pasport programmnoho sredstva ot 31.10.2002 No. 145], ANSYS Inc., Moscow, Federal Service on Environmental, Technological and Nuclear Supervision; Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2002, 6 p. (Rus)
32. Birbraer, A.N. (1998), "Calculation of Structure for Seismic Resistance" [Raschiot konstrukttsii na seismostoikost], Saint Petersburg, Nauka, 255 p. (Rus)
33. Piskunov, N.S. (1985), "Differential and Integral Calculation" [Differentsialnoie i integralnoie ischisleniie], Manual for High Schools, V. 2, Moscow, Nauka, 560 p. (Rus)

Получено 26.05.2016.