

УДК 624.046.2

К РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

БАМБУРА А.Н.^{1*}, *д.т.н., проф.*САЗОНОВА И. Р.^{2*}, *инж., ст.н.с.*БОГДАН В.М.^{3*}, *инж., ст.н.с.*

^{1*} Отдел надежности конструкций зданий и сооружений, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, 03037, Киев, Украина, тел. +38 (044) 249-37-44, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Отдел надежности конструкций зданий и сооружений, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, 03037, Киев, Украина, тел. +38 (044) 249-38-88, e-mail: rostislavovna@gmail.com

^{3*} Отдел надежности конструкций зданий и сооружений, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, 03037, Киев, Украина, тел. +38 (044) 249-37-49, e-mail: vasyb.bogdan@gmail.com

Аннотация. *Цель.* Целью данной работы является разработка расчетной модели преднапряженной железобетонной защитной оболочки атомного реактора для достоверной оценки ее напряженно-деформированного состояния и работоспособности (выполнения локализирующей функции) во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектном землетрясении. *Методика.* В результате анализа технической документации и в соответствии с целью работы были определены методологические основы, информационная структура, спектр решаемых задач и технология программной реализации модели. В процессе выполнения работы были разработаны требования к расчетной модели: учет геометрических особенностей сооружения (утолщения в зонах люков, проходок; приопорное (стилобатное) утолщение; геометрия анкерного карниза; геометрия подкрановой балки; податливость приопорной зоны защитной оболочки (ЗО)); учет конструктивных особенностей сооружения (неоднородная структура по толщине стенки и купола - гермооблицовка, железобетон, каналообразователи СПЗО, армоканаты); учет особенностей системы преднапряжения защитной оболочки (моделирование реальной траектории арматурных канатов (АК); возможность снижения усилия в АК по длине из-за трения между АК и каналообразователем; исключение из работы любых АК; задания любой конфигурации усилий в АК; возможность определения минимально необходимых усилий в АК для обеспечения локализирующей функции защитной оболочки при сочетании максимальной проектной аварии с проектным землетрясением). Степень дискретизации расчетной модели была определена исходя из возможности моделирования с достаточной степенью достоверности сложной геометрической формы сооружения; возможности моделирования с достаточной степенью достоверности отдельных конструктивных элементов; обеспечения необходимой точности расчета при минимальном количестве узлов и конечных элементов. *Результаты.* Разработаны компьютерные модели в составе: внутренняя стальная гермооблицовка, железобетонные ограждающие конструкции с преднапряженными армоканатами и наружным и внутренним слоями с ненапрягаемой арматурой. Выполнена комплексная верификация разработанных моделей. Выполнены расчеты ЗО трех типов энергоблоков АЭС с различной величиной усилия натяжения армоканатов на основные и аварийные сочетания нагрузок. Определены минимально допустимые усилия в канатах, которые обеспечивают локализирующие функции защитной оболочки во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при максимальной проектной аварии и проектном землетрясении. *Научная новизна.* Разработаны аналитические модели цилиндрических защитных оболочек энергоблоков атомных электростанций, позволяющие исследовать закономерности влияния различных сочетаний воздействий на их напряженно-деформированное состояние, несущую способность и выполнение локализирующих функций. Разработан алгоритм проверки несущей способности железобетонных ЗО и определения максимальных усилий в канатах при аварийных воздействиях. *Практическая значимость.* Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния защитной оболочки от сочетания особых воздействий, что позволило продлить ресурс ЗО ряда АЭС Украины. Разработанные компьютерные модели защитной оболочки также использованы для альтернативных экспертных расчетов при выполнении государственных экспертиз ядерной и радиационной безопасности атомных станций.

Ключевые слова: защитная оболочка; компьютерная расчетная модель; арматурные канаты; усилие предварительного обжатия; стальная гермооблицовка.

ДО РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ОБОЛОНОК АТОМНИХ СТАНЦІЙ

БАМБУРА А.М.^{1*}, *д.т.н., проф.*САЗОНОВА І. Р.^{2*}, *інж., ст.н.с.*БОГДАН В.М.^{3*}, *інж., ст.н.с.*

^{1*} Відділ надійності конструкцій будівель і споруд, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, 03037, Київ, Україна, тел. +38 (044) 249-37-44, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Відділ надійності конструкцій будівель і споруд, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, 03037, Київ, Україна, тел. +38 (044) 249-38-88, e-mail: rostislavovna@gmail.com

^{3*} Відділ надійності конструкцій будівель і споруд, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, 03037, Київ, Україна, тел. +38 (044) 249-37-49, e-mail: vasyl.bogdan@gmail.com

Анотація. Мета. Метою даної роботи є розробка розрахункової моделі попередньо напруженої залізобетонної захисної оболонки атомного реактора для достовірної оцінки її напружено-деформованого стану і працездатності (виконання локалізуючої функції) для всіх режимів експлуатації, включаючи сполучення навантажень при проектній аварії та проектному землетрусі. **Методика.** В результаті аналізу технічної документації та відповідно до мети роботи були визначені методологічні основи, інформаційна структура, спектр вирішуваних завдань і технологія програмної реалізації моделі. В процесі виконання робіт були розроблені вимоги до розрахункової моделі: врахування геометричних особливостей споруди (потовщення в зонах люків, проходок; приопорне (стилобатне) потовщення; геометрія анкерного карниза; геометрія підкранової балки; податливість приопорної зони захисної оболонки (ЗО)); врахування конструктивних особливостей споруди (неоднорідна структура по товщині стінки і купола - гермооблицювання, залізобетон, каналотворювачі СПЗО, армоканати); врахування особливостей системи попереднього напруження захисної оболонки (моделювання реальної траєкторії арматурних канатів (АК); можливість зниження зусилля в АК по довжині через тертя між АК і каналотворювачем; виключення з роботи будь-яких АК; задання будь-якої конфігурації зусиль в АК; можливість визначення мінімально необхідних зусиль в АК для забезпечення локалізуючої функції захисної оболонки при поєднанні максимальної проектної аварії з проектним землетрусом). Ступінь дискретизації розрахункової моделі була визначена виходячи з можливості моделювання з достатнім ступенем вірогідності складної геометричної форми споруди; можливості моделювання з достатнім ступенем вірогідності окремих конструктивних елементів; забезпечення необхідної точності розрахунку при мінімальній кількості вузлів і скінчених елементів. **Результати.** Розроблено аналітичні моделі у складі: внутрішнє сталеве гермооблицювання, залізобетонні огорожувальні конструкції з попереднього напруженими армоканатами та зовнішнім і внутрішнім шарами з ненапруженою арматурою. Виконано комплексне тестування розроблених моделей. Виконано розрахунки трьох типів енергоблоків АЕС з різною величиною зусилля натягу армоканатів на основні та аварійні сполучення навантажень. Визначено мінімально допустимі зусилля в канатах, які забезпечують працездатність захисної оболонки у всіх режимах експлуатації, включаючи сполучення навантажень при максимальній проектній аварії і проектному землетрусі. **Наукова новизна.** Розроблено аналітичні моделі циліндричних захисних оболонок енергоблоків атомних електростанцій, що дозволяють досліджувати закономірності впливу різних сполучень навантажень на їх напружено-деформований стан, несучу здатність та виконання локалізуючих функцій. Розроблено алгоритм перевірки несучої здатності залізобетонних ЗО і визначення максимальних зусиль у канатах при аварійних діях. **Практична значимість.** Виконано розрахунок напружено-деформованого стану захисної оболонки від сполучення особливих дій, що дозволило подовжити ресурс ЗО низки АЕС України. Розроблені комп'ютерні моделі захисної оболонки також були використані для альтернативних експертних розрахунків при виконанні державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки атомних станцій.

Ключові слова: захисна оболонка; комп'ютерна розрахункова модель; арматурні канати; зусилля попереднього обтискування; сталеве гермооблицювання.

CONCERNING OF CALCULATION OF THE REINFORCED CONCRETE PRESTRESSED CONTAINMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS

BAMBURA A.M.^{1*}, *Doctor in Technical science, professor*

SAZONOVA I. R.^{2*}, *Engineer, senior scientist*

BOGDAN V.M.^{3*}, *Engineer, senior scientist*

^{1*} Department of building and structures reliability, State enterprise «The State research and development Institute of building constructions», 5/2, Preobrazhenska Str., Kyiv, 03037, Ukraine, tel. +38 (044) 249-37-44, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Department of building and structures reliability, State enterprise «The State research and development Institute of building constructions», 5/2, Preobrazhenska Str., Kyiv, 03037, Ukraine, тел. +38 (044) 249-38-88, e-mail: rostislavovna@gmail.com

^{3*} Department of building and structures reliability, State enterprise «The State research and development Institute of building constructions», 5/2, Preobrazhenska Str., Kyiv, 03037, Ukraine, тел. +38 (044) 249-37-49, e-mail: vasyl.bogdan@gmail.com

Annotation. Goal. The aim of this work is to develop a design computational model of the reinforced concrete prestressed containment of a nuclear unit for real evaluation its stress-strain state and reliable performance in all operating conditions, including a combination of loads under design accident and design earthquake. **Techniques.** Based on results of the technical documentation analysis and in accordance with the purpose of performed work were determined methodological basis, informational structure, the range of tasks and technology for software model implementation. During the work performance, the requirements for the calculation

model were developed: taking into account the geometric features of structures (thickening in areas hatches, penetrations; bearing (stylobate) thickening; geometry of anchor cornice; geometry of crane girders; suppleness of bearing zone of the containment); taking into account design features of the facilities (non-uniform structure through the wall thickness and the dome: tight lining; concrete; channel form of the containment prestressing system (CPS); reinforcing ropes); taking into account the features of containment prestressing system (simulation of the actual trajectory of reinforcing ropes (RR), a possibility to reduce the stresses in the RR along its length due to the friction between the RR and channel form; disable any RR; originating any forces configuration in the RR, the ability to calculate the minimum required forces in RR for proper function of containment under a combination of maximum design accident and the design earthquake). The degree of calculation model sampling has been determined based on the modeling capabilities with a sufficient degree of reliability for complex geometric shapes facilities; modeling capabilities with a sufficient degree of reliability of individual structural elements; maintain the accuracy of calculation of a minimum number of finite elements and nodes. **Results.** The computational models consisting of: internal steel tight lining, concrete walling with prestressed reinforcing ropes and an outer and an internal layers with an ordinary reinforcement were developed. A comprehensive verification of the developed models were carried out. Calculations of the three types of unit of the NPPs with different values of forces in reinforcing ropes under the main and accident load combinations were carried out. A minimum acceptable forces to the ropes that ensure operability of the containment during all modes of operation, including the combination of loads with a maximum design accident and design earthquake were determined. **Scientific novelty.** The analytical models of the cylindrical containments of the NPP units that allowing to research the regularities of influence of the various combinations of loads on their stress-strain mode, bearing capacity and proper containment functions were developed. An algorithm of checking the bearing capacity of the reinforced concrete containments and determining the maximum forces into the ropes under accident actions were developed. **Practical significance.** The calculation of stress-strain state of the containment under the combination of special actions were performed that allowing to extend the resource of the several nuclear power plants in Ukraine. The developed computer models of containment were used for alternative calculations during performance of the of state nuclear and radiation safety examination.

Keywords: containment; computational model; reinforcing ropes; pre-compression force; tight lining steel.

Введение

Большинство энергоблоков атомных электростанций Украины работают более 30 лет. Поэтому остро стоит вопрос продления их ресурса. Согласно действующей нормативной базе при определении остаточного ресурса строительных объектов необходимо выполнить инструментальные обследования и расчеты все виды воздействий с учетом результатов обследований. В данной статье рассматриваются вопросы компьютерного моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности защитных оболочек энергоблоков АЭС при различных расчетных сочетаниях нагрузок.

Защитная оболочка реакторного отделения энергоблока атомной электростанции (АЭС) является элементом системы глубоководной защиты реакторной установки, изолирующей ее от окружающей природной среды и обеспечивающей локализацию радиоактивных веществ в подоболочечном пространстве при потенциально возможных авариях. Защитная оболочка представляет собой предварительно напряженную железобетонную конструкцию в виде цилиндра с толщиной стенки 1,2 м. Внутренний диаметр цилиндра составляет 45 м. В верхней части цилиндр сопрягается с пологим сферическим куполом толщиной 1,1 м. Цилиндрическая часть сооружения опирается на железобетонную плиту перекрытия (нижнюю плиту оболочки).

Надежность и работоспособность защитной оболочки, в т.ч. ограничение формоизменения (деформаций) железобетонных ограждающих конструкций и герметизирующей стальной облицовки в условиях потенциально возможной максимальной проектной аварии (МПА),

обеспечивается, в частности, системой преднапряжения защитной оболочки.

Анализ литературных данных по экспериментальным исследованиям посвященным изучению локализирующей способности защитных оболочек атомных станций показал, что они немногочисленны и посвящены разным аспектам их локализирующей способности. Наиболее полными и максимально приближенными к особенностям работы реальных защитных оболочек атомных станций являются экспериментальные исследования, выполненные в кооперации 7 стран (8 фирм). Работы выполнялись согласно решению от июня 2002 года OECD-NEA Комитета по безопасности ядерных установок (CSNI), который инициировал исследование Международной стандартной задачи на целостность защитной оболочки (ISP 48) на основе теста CPN / NUPEC / Sandia. Целью ISP являлось изучение напряженно-деформированного состояния реальных конструкций защитных оболочек из преднапряженного бетона на основе результатов натурального испытания [14].

В рамках указанных исследований была разработана программа, целью которой являлось изучение реакции представительных моделей защитной оболочки, разработанных различными фирмами, на нагрузки при проектной аварии и сравнение аналитических прогнозов и результатов натурального испытания. Экспериментальная модель масштабом 1:4 представляла предварительно напряженную железобетонную защитную оболочку водно-водяного реактора (PWR) блока 3 станции Охи в Японии.

Анализ результатов экспериментальных и численных исследований показал, что наиболее приемлемо отражают реальные процессы истощения несущей способности и деформирования ЗО сложные

3D- конечно-элементные модели, которые включают в себя геометрические неоднородности, особенно в зонах проходов и люков (отверстий) в защитной стене.

Цель

Целью данной работы является разработка расчетной модели преднапряженной железобетонной защитной оболочки атомного реактора для достоверной оценки ее напряженно-деформированного состояния и работоспособности (выполнения локализующей функции) при всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при проектной аварии и проектном землетрясении [6, 7, 8].

Методика

Перед началом разработки аналитической модели были определены методологические основы, информационная структура, спектр решаемых задач и технология программной реализации модели, а также разработаны требования к расчетной модели.

Требования к расчетной модели:

- учет геометрических особенностей сооружения (утолщения в зонах люков, проходов; приопорное (стилобатное) утолщение; геометрия анкерного карниза; геометрия подкрановой балки; податливость приопорной зоны ЗО.

- учет конструктивных особенностей сооружения (неоднородная структура по толщине стенки и купола - гермооблицовка; железобетон; каналообразователи СПЗО; армоканаты);

- учет особенностей системы преднапряжения защитной оболочки (моделирование реальной траектории арматурных канатов (АК); учет снижения усилия в АК по длине из-за трения между АК и каналообразователем; исключение из работы любых АК; задания любой конфигурации усилий в АК; возможность определения минимально необходимых усилий в АК для обеспечения локализующей функции защитной оболочки при сочетании максимальной проектной аварии с проектным землетрясением).

Степень дискретизации расчетной модели была определена исходя из следующих условий:

- возможность моделирования с достаточной степенью достоверности сложной геометрической формы сооружения;

- возможность моделирования с достаточной степенью достоверности отдельных конструктивных элементов;

- обеспечение необходимой точности расчета при минимальном количестве узлов и конечных элементов.

В результате решения ряда тестовых задач и различных вариантов моделирования защитной оболочки были приняты следующие размеры и конфигурация конечных элементов цилиндра (см. рис. 1):

- стенки цилиндра моделируются объемными конечными элементами (всего 384 элемента по длине окружности 200 элементов по высоте) и разбиты на 8 слоев бетона по толщине (без учета гермооблицовки);

- арматурные канаты моделируются стержневыми элементами;

- между армоканатами и конечными элементами, моделирующими железобетон, введены объемные элементы с пониженным модулем деформации. Изменяя величину модуля деформации в этих элементах, можно учесть силы трения, которые возникают по контакту канатов и каналообразователей;

- как правило, армоканаты имеют общие узлы только со слоем бетона с пониженным модулем деформации, на который передаются усилия обжатия. Однако, на уровнях, где происходит пересечение канатов разных рядов, для передачи усилий обжатия с канатов на бетон введены дополнительные стержневые элементы;

- связи армоканатов с внешним слоем бетона отсутствуют;

- гермооблицовка моделируется конечными элементами оболочки.

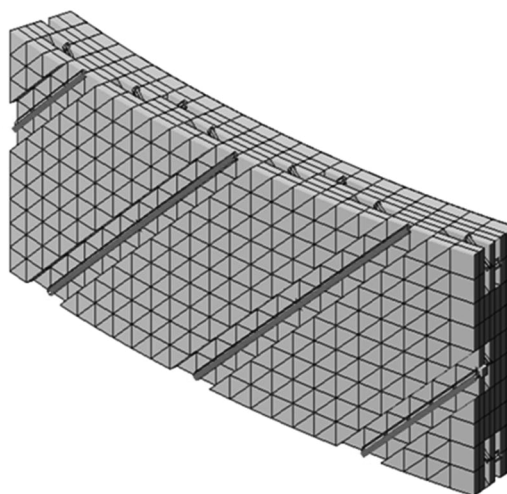


Рис. 1. Фрагмент модели цилиндрической части /
The fragment of model of the cylinder part

Для купола приняты следующие размеры и конфигурация конечных элементов:

- купол разбит на 4 слоя бетона по толщине (без учета гермооблицовки);

- слои представляют собой 8-узловые объемные элементы. Размеры элементов переменные (приблизительно 0,3...0,32 м);

- армоканаты моделируются стержневыми элементами общего вида и располагаются внутри слоев №2 и №3 (см. рис. 2);

- для передачи усилий обжатия с канатов на бетон введены дополнительные стержневые элементы. Расположение этих элементов показано на рис. 2;

- связи армоканатов с внешним слоем бетона

отсутствуют.

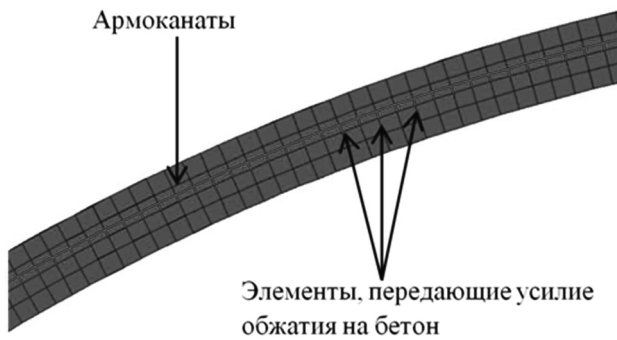


Рис. 2. Фрагмент части купола с армоканатами /
The dome fragment with reinforcing ropes

Общий вид разработанной численной модели защитной оболочки показан на рис. 3.

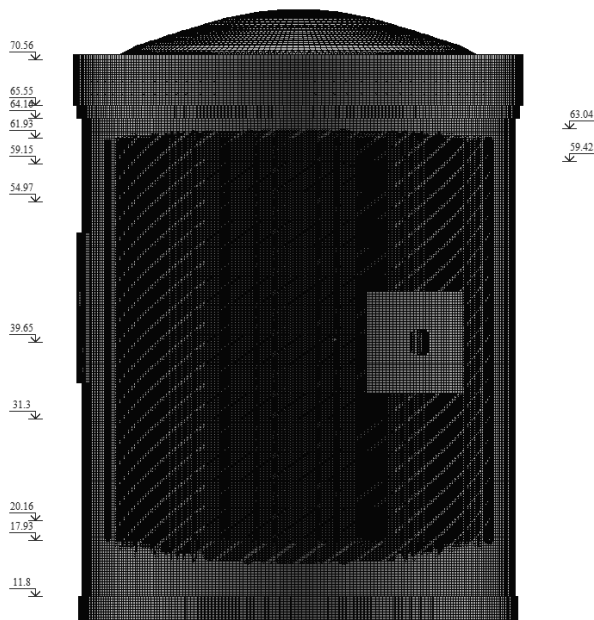


Рис. 3. Общий вид модели /
The general view of model

Усилия предварительного напряжения в канатах моделировались путем задания деформаций в стержнях. При необходимости учесть в модели отказ одного из канатов, с этого каната удалялась нагрузка, которая моделирует предварительное натяжение.

К узлам и конечным элементам модели были приложены следующие нагрузки:

- собственный вес конструкций;
- усилие предварительного обжатия (с возможностью варьирования величины усилий);
- давление при максимальной проектной аварии;
- температура при максимальной проектной аварии с учетом температуры окружающей среды;

– горизонтальная и вертикальная составляющие сейсмической нагрузки при проектном землетрясении.

Результаты

В соответствии с сформулированными требованиями были разработаны аналитические модели в составе: внутренняя стальная гермооблицовка, железобетонные ограждающие конструкции с преднапряженными армоканатами и наружным слоем с ненапрягаемой арматурой.

Аналитические модели защитных оболочек в зависимости от типа реактора включают от 0,8 до 1,6 млн. узлов и от 1,2 до 2,2 млн. конечных элементов.

Выполнена комплексная верификация разработанных моделей. Величины усилий, напряжений и деформаций, полученные в результате расчета модели, отличаются от теоретических значений, полученных по формулам Ламе и формулам теоретической механики, не более чем на 8%. Причем, это отличие работает «в запас» и может не учитываться при выполнении дальнейших расчетов. По результатам комплексного тестирования в модели в ходе работы внесены соответствующие корректировки и уточнения.

Выполнены расчеты трех типов ЗАО энергоблоков АЭС с различной величиной усилия натяжения армоканатов на следующие сочетания нагрузок:

- основное сочетание, соответствующее нормальным условиям эксплуатации (НУЭ);
- аварийное сочетание максимальная проектная авария и проектное землетрясение;
- НУЭ + отказ одного элемента;
- нарушение нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) + отказ одного элемента;
- аварийное сочетание ННУЭ + максимальное проектное землетрясение + отказ одного элемента.

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

Определены минимально допустимые усилия в канатах, которые обеспечивают работоспособность защитной оболочки во всех режимах эксплуатации, включая сочетание нагрузок при максимальной проектной аварии и проектном землетрясении.

Выполненные расчеты показали, что при сочетании максимальной проектной аварии и проектного землетрясения стальная гермооблицовка теряет устойчивость, в стали развиваются деформации текучести, что с высокой степенью вероятности может привести к невыполнению локализующей функции. В связи с этим, представляется целесообразным выполнить экспериментальное исследование фрагмента защитной оболочки на предмет сохранения целостности стальной гермооблицовки (в т.ч. сварных швов) при потере устойчивости под воздействием соответствующих силовых и

температурных нагрузок. Кроме того, рекомендуется экспериментальным путем проанализировать локализующую способность (сопротивление проницаемости) бетона сжатой зоны защитной оболочки, принимая во внимание естественную пористость бетона и наличие в нем микроповреждений структуры.

Научная новизна и практическая значимость

Разработаны аналитические модели цилиндрических защитных оболочек энергоблоков атомных электростанций позволяющих исследовать закономерности влияния различных сочетаний воздействий на их напряженно-деформированное состояние, несущую способность и выполнения локализующих функций.

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

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния защитной оболочки от сочетания особых воздействий, что позволило продлить ресурс ЗО ряда АЭС Украины.

Разработанные компьютерные модели защитной оболочки использованы для альтернативных экспертных расчетов при выполнении

государственных экспертиз ядерной и радиационной безопасности.

Выводы

1. Разработанные компьютерные модели защитных оболочек позволили решить задачи по продлению срока эксплуатации энергоблоков АЭС и могут быть использованы для альтернативных экспертных расчетов при выполнении государственных экспертиз регулятором при обосновании продления ресурса локализующих систем безопасности.

2. Выполненные расчеты показали необходимость проведения экспериментальных исследований:

– фрагмента защитной оболочки на предмет сохранения целостности стальной гермооблицовки (в т.ч. сварных швов) при потере устойчивости под воздействием соответствующих силовых и температурных нагрузок;

– образцов из состава бетонной смеси максимально близкого к бетону реальной конструкции с целью определения локализующей способности (сопротивления воздухопроницаемости) бетона сжатой зоны защитной оболочки, принимая во внимание естественную пористость бетона и наличие в нем микроповреждений структуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування : ДБН В.1.2-2:2006 – Офіц. вид. – Київ: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – 60 с.

2. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14:2009 – Офіц. вид. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.

3. Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу: ДБН В.2.6.-163:2010 – Офіц. вид. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.

4. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6.-98:2009 – Офіц. вид. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.

5. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010 – Офіц. вид. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.

6. ПИН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293846/4293846843.htm> – Название с экрана. – Проверено: 03.08.2016.

7. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://normativ.com.ua/types/tdoc23749.php> – Название с экрана. – Проверено: 03.08.2016.

8. ПНАЭ Г-10-007-89. Нормы проектирования железобетонных сооружений локализующих систем безопасности атомных станций. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293842/4293842237.htm> – Название с экрана. – Проверено: 03.08.2016.

9. Большов Л.А. Современные компьютерные коды - инструмент анализа и обоснования безопасности: презентация/ Л.А. Большов, В.Ф. Стрижов. - Российская академия наук. Институт безопасного развития атомной энергетики.- Москва, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/video/52499> – Название с экрана. – Проверено: 03.08.2016.

10. Малявин В.П. Оценка напряженно-деформированного состояния и уровня преднапряжения в железобетонных преднапряженных защитных оболочках реакторных отделений на действующих энергоблоках АЭС с реактором ВВЭР-1000 /В.П. Малявин //ФГУП АЭП – Москва: 2003. - Вып. 4 - с.11.

11. Романов А.В. Численное моделирование системы преднапряжения защитных оболочек реакторных отделений атомных электростанций/А.В. Романов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.- Москва: 2010. -№ 1 - с. 49–53.

12. Романов А.В. Численное моделирование системы преднапряжения защитных оболочек АЭС с использованием функций форм "неправильного" гексаэдра/ А.В. Романов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.- Москва: 2015. -№ 6 - с. 36-47. – Режим доступа: <http://studydoc.ru/doc/2665923/chislennoe-modelirovanie-sistemy-prednapryazheniya-ae-s> –Название с экрана. – Проверено: 03.08.2016.

13. International Standard Problem №48 Containment Capacity. Synthesis Report / Organisation for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Agency. Committee on the Safety of Nuclear Installations - NEA/CSNI/R(2005)5/Vol1, 2005.

REFERENCES

1. Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeka budivelnih ob'ektiv. Navantazhennya i vplivi. Normie proektuvannya:[The system of providing reliability and safety of building objects. Loads and actions/ Design norm] DBN V.1.2-2: 2006 – Official issue - Kyiv: Ministerstvo budivnitstva, arhitekturi ta zhitlovo and communal Gospodarstva Ukraine, 2006. - 60 p.
2. The system zabezpechennya nadiynosti ta bezpeka budivelnih ob'ektiv. Zagalni pryncypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnih konstruksiy ta osnov: [The system of providing reliability and safety of building objects. General principles of providing reliability and structure safety of buildings, works, structures and bases] DBN V.1.2-14: 2009 - Official issue - Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2009. - 37 p.
3. Konstruksii budinkiv i sporud. Stalevi konstruksii. Normie proektuvannya, vigotvleniya i montazh [Buildings and works structures. Steel structures. Designe norms, producing and installation]: . DBN V.2.6.-163: 2010 - Official issue. - Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2011. - 202 p.
4. Konstruksii budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozennya [Buildings and works structures. Concrete and reinforced concrete. General provisions]: DBN V.2.6. 98: 2009- Official issue. - Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2011. - 202 p.
5. Konstruksii budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii s vazhkogo betonu. Pravyla proektuvannya [Buildings and works structures Concrete and reinforced concrete structures from heavy aggregate concrete. Design rules]: DSTU B V.2.6-156: 2010- Official issue. - Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2011. - 118 p.
6. PiN AE 5.6. Normy stroitel'nogo proektirovaniya AS z reaktoramy razlichnogo tipa [The norms of building design of NPPs with reactors of different types. [Electron resource]. - Access: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293846/4293846843.htm>. - The name from the screen. - Checked: 03.08.2016.
7. PNAEG 5006 87. Normy proektirovaniya seismostoikich atomnich stanciy [The norms of earthquake-resistant design of nuclear power plants. [Electron resource]. - Access: <http://normativ.com.ua/types/tdoc23749.php>. - The name from the screen. - Checked: 03.08.2016.
8. PNAEG 10,007 89. Normy proectirovaniya zhelezobetonnych sooruzheniy lokalizuyuschich system bezopasnosti atomnyh stnciy [The norms for designing of the reinforced concrete structures of localizing security systems of the nuclear power plants. [Electron resource]. - Access: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293842/4293842237.htm>. - The name from the screen. - Checked: 03.08.2016.
9. Bolshov L.A. Sovremennyye computernie cody – instrument analiza i obosnovaniya bezopasnosti [Modern computer code - a tool of analysis and substantiate of security]: presentation / L.A. Bolshov, V.F. Strizhov. - The Russian Academy of Sciences. The Institute of safe development of the nuclear power.- Moscow 2014 [Electron resource]. - Access: <http://www.atomic-energy.ru/video/52499>. - The name from the screen. - Checked: 03.08.2016.
10. Malyavin V.P. Ocenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyania i urovnia prednapryazheniya v zhelesobetonnykh prednapryazhennich zaschytnykh obolochkach reaktornykh otdeleniy deystvuyuschich energoblokach AES z reaktorom VVER-1000 [Evaluation of the stress-strain state and prestressing level in prestressed concrete of the reactor containments operating nuclear power units with VVER-1000 reactor] /V.P. Malyavin // FGUP AEP - Moscow: 2003 - Vol. 4 - p.11.
11. Romanov A.V. Chislennoe modelirovaniye systemy prednapryazheniya zaschytnykh obolochek reaktornykh otdeleniy atomnykh stanciy [Numerical modeling of prestressing system of the reactor containments of nuclear power plants / AV. Romanov // Seismic construction. Security of structures.- Moscow: 2010. -№ 1 - p. 49-53.
12. Romanov A.V. Chislennoe modelirovaniye systemy prednapryazheniya zaschytnykh obolochek AES s ispolzovaniem funkciy form "nepravil'nogo" geksaedra [Numerical modeling of prestressing systems of the of the NPP reactor containments using features form the "wrong" hexahedron / A.V. Romanov // Seismic construction. Security of structures.- Moscow: 2015. -№ 6 - p. 36-47. - Access: <http://studydoc.ru/doc/2665923/chislennoe-modelirovanie-sistemy-prednapryazheniya-ae-s>. - The name from the screen. - Checked: 03.08.2016.
13. International Standard Problem №48 Containment Capacity. Synthesis Report / Organisation for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Agency. Committee on the Safety of Nuclear Installations - NEA / CSNI / R (2005) 5 / Vol1, 2005.

Статья поступила в редколлегию: 11.08.2016