
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 624.04.45.001.3

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ
ОБОЛОЧЕК АЭС НА ЭТАПЕ СООРУЖЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**© 2019 В.Н. Медведев, Александр С. Киселев, Алексей С. Киселев,
В.Ф. Стрижов, А.Н. Ульянов, М.И. Скорикова**

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

В ИБРАЭ РАН разработана экспертная система оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек блоков АЭС с ВВЭР-1000. Экспертная система состоит из программного комплекса CONT, датчиков контроля усилий в армоканатах, датчиков контрольно-измерительной аппаратуры. В работе приводится описание экспертной системы оценки НДС защитных оболочек АЭС и особенности её применения.

Ключевые слова: *защитная оболочка, напряженно-деформированное состояние, экспертная система.*

Поступила в редакцию 08.11.2018
После доработки 22.02.2019
Принята к публикации 25.02.2019

Введение

Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) в период строительства и эксплуатации выполняется с помощью комплексной системы контроля защитной оболочки, которой по проекту оснащаются все защитные оболочки РО энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в период ее возведения.

Для регулярного измерения усилий на тяжных анкерах арматурных канатов часть анкерных узлов оборудована датчиками силы НВ005 (ПСИ-01), дающими возможность измерения усилий в арматурных канатах в процессе преднапряжения оболочки, приемо-сдаточных испытаний и периода эксплуатации энергоблока АЭС.

ИБРАЭ РАН на протяжении длительного времени выполняет работы, связанные с расчетами напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС с целью повышения их эксплуатационных качеств. Для выполнения расчетов защитных оболочек АЭС различной геометрии в трехмерной и осесимметричной постановках разработан программный комплекс «CONT», который аттестован в Ростехнадзоре.

Наличие указанных факторов позволило разработать экспертную систему оценки НДС защитных оболочек АЭС с ВВЭР-1000.

**1 Разработка экспертной системы оценки напряженного состояния
защитных оболочек АЭС**

В ИБРАЭ РАН по заказу АО «Концерн Росэнергоатом» разработана «Экспертная система оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек блоков АЭС с ВВЭР-1000». Экспертная система создана на базе программного

комплекса CONT, разработанного в ИБРАЭ РАН для анализа НДС строительных конструкций при различных видах нагрузок. ПК CONT аттестован в Ростехнадзоре, регистрационный номер паспорта 347, дата выдачи – 21.11.2013 г. В ПК реализованы эффективные численные методы конечных элементов и суперэлементов, а также параллельные методы обработки потоков данных, позволяющие проводить нелинейные расчеты для моделей, содержащих десятки миллионов степеней свободы.

Экспертная система включает:

- данные конечноэлементной модели ЗО;
- программный комплекс CONT;
- базу данных показаний датчиков контроля усилий в армоканатах (НВ005, ПСИ-01);
- базу данных показаний датчиков контрольно-измерительной аппаратуры, установленных в теле оболочки.

Экспертная система внедрена на энергоблоке №1 Калининской АЭС, энергоблоках №1, 2, 3 и 4 Ростовской АЭС [1].

Для того чтобы выполнить оценку достаточности уровня обжатия защитной оболочки, обеспечивающий работоспособность конструкции при проектной аварии, необходимо выполнить расчеты НДС оболочки от действия преднапряжения с учетом прогнозируемых значений усилий в арматурных канатах на момент проведения последующих КПП с учетом потерь на анкеровку по показаниям датчиков ПСИ-01, собственного веса, изменяющегося во времени температурного градиента из-за перепада температур внутри и снаружи оболочки при аварии (рис. 1а), внутреннего аварийного давления, длительной температурной нагрузки от воздействия эксплуатационного поля температуры, сейсмической нагрузки. При расчете НДС, вызванного воздействием преднапряжения, автоматически определяется коэффициент увеличения обжатия вследствие деформации оболочки при нагружении ее внутренним аварийным давлением. Компоненты НДС ЗО для всех нагрузок кроме преднапряжения рассчитываются на предварительном этапе адаптации экспертной системы к конкретному блоку АЭС и хранятся в базе данных на диске компьютера.

Суммируя вклады от отдельных факторов нагружения, вычисляются компоненты окружных и меридиональных усилий и изгибающих моментов в стенке оболочки в заданные моменты времени (рис. 1б).

Результаты расчета НДС защитной оболочки выводятся в протокол в виде эпюр напряжений, сил и моментов, запасов прочности по СНиП [2] в заданных сечениях модели ЗО для условий аварии с учетом всех факторов нагружения в заданные моменты времени с момента начала аварии (рис. 1в).

По полученным значениям усилий и изгибающих моментов в сечениях защитной оболочки можно судить о наличии в стенке оболочки зон с пониженным уровнем обжатия, для которых необходимо выполнить анализ прочности, а также положение этих зон и номера проходящих через них арматурных канатов.

Если критерии прочности железобетонного сечения в зонах пониженного обжатия не выполняются, можно оценить необходимый уровень усилий в канатах СПЗО для корректировки НДС ЗО в зонах пониженного обжатия за счет пошагового увеличения усилий в канатах СПЗО, проходящих вблизи выявленных зон, и проведения вариантных расчетных оценок по описанной выше схеме, пока критерии прочности не будут выполняться. Такой подход позволяет провести предварительную оценку необходимого объема работ по корректировке усилий в канатах, а именно, определять минимальное количество канатов и уровень усилий в них для исключения зон оболочки с пониженным уровнем обжатия.

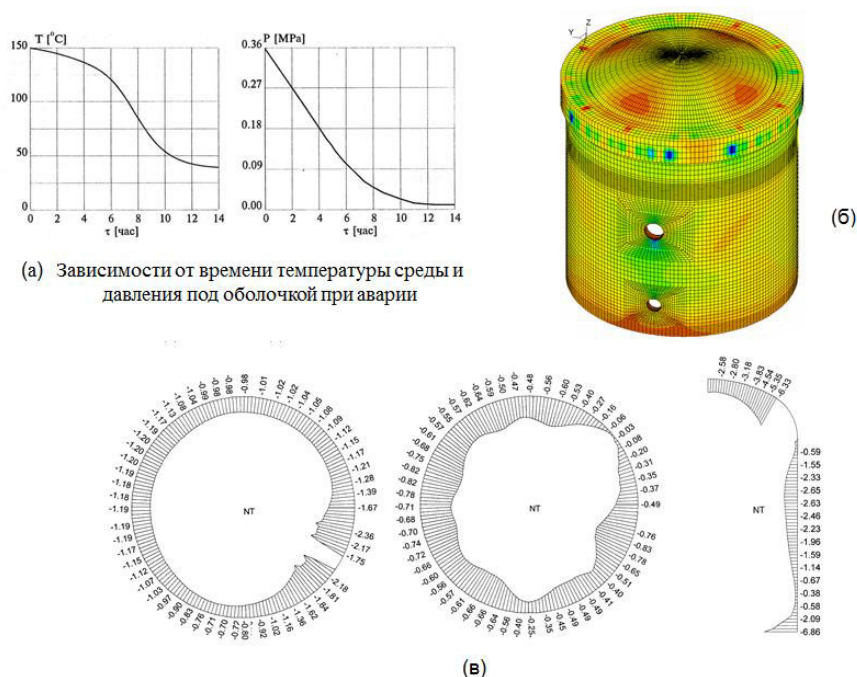


Рисунок 1 – Изменение давления и температуры среды под оболочкой при аварии (а), распределение напряжений по объему ЗО в результате воздействия аварийных и эксплуатационных нагрузок (б), эпюры усилий в стенке оболочки (в) [The change in pressure and temperature of the medium under the containment during an accident (a), the distribution of stresses over the volume of the aura as a result of the impact of emergency (b) and operational loads (c)]

В качестве примера на рисунке 2 показана схема развертки цилиндрической части ЗО при наличии зоны пониженного обжатия из-за обрыва 4-х канатов СПЗО. В зоне их пересечения появляется такая зона. Данная информация, а также номера канатов СПЗО проходящих через зону пониженного обжатия в табличном виде выводится в протокол расчета, автоматически формирующийся по результатам работы экспертной системы, если критерии прочности не выполняются.

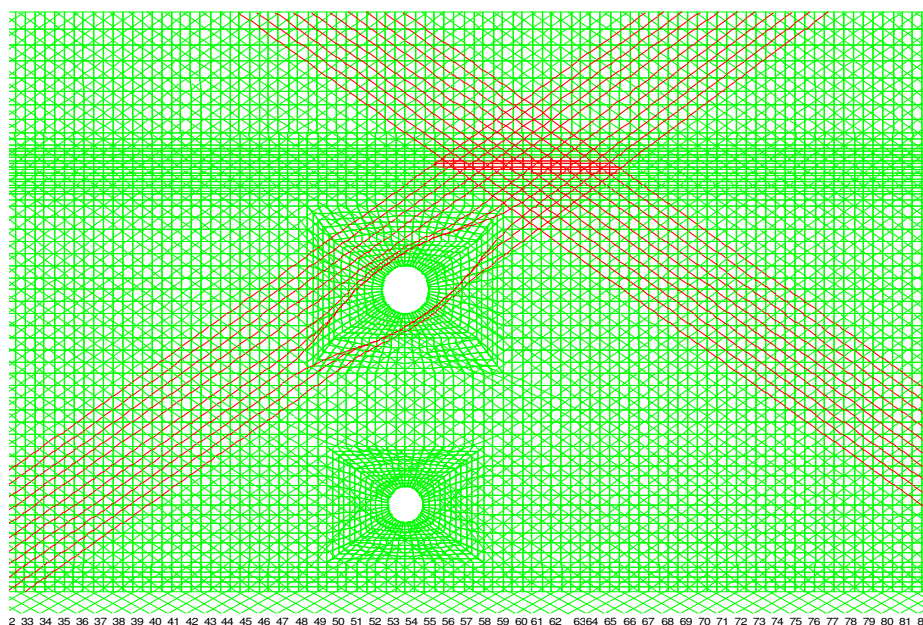


Рисунок 2 – Фрагмент развертки цилиндра модели ЗО с демонстрацией зоны пониженного обжатия [Fragment of the cylinder scan of the containment model with demonstration of reduced compression zone]

Таким образом, экспертная система позволяет:

- выполнить оценку НДС защитной оболочки в процессе преднапряжения, приемо-сдаточных испытаний и эксплуатации с учетом нагрузок при проектной аварии;
- выполнить анализ достаточности обжата оболочки и определять объем работ по корректировке усилий в арматурных канатах в период проведения контрольно-профилактических работ на системе предварительного напряжения;
- исключить необоснованные подтяжки арматурных канатов при проведении КПП, которые отрицательно сказываются на состоянии этих канатов, а также бетона и металлической облицовки сооружения;
- обосновать эксплуатационную пригодность защитной оболочки при нарушении нормальной работы элементов СПЗО, например, при обрыве одного или нескольких арматурных канатов.

Экспертная система может быть использована для обоснования соответствия оболочки требованиям нормативных документов по безопасности.

Исходными данными, которые формируются на этапе адаптации экспертной системы к расчетам конкретной защитной оболочки и не могут варьироваться пользователем, являются:

- геометрия защитной оболочки;
- конечноэлементное разбиение объема защитной оболочки;
- Геометрия трассировки канатов СПЗО;
- физико-механические свойства материалов защитной оболочки;
- суперэлементное представление базовой конечноэлементной модели;
- описание поверхностей модели оболочки и граничных условий.

Исходными данными, которые могут варьироваться пользователем экспертной системы при анализе работы защитной оболочки, являются:

- усилия в арматурных канатах;
- координаты расположения датчиков КИА;
- азимутальные и осевые координаты сечений, для которых строятся эпюры напряжений и усилий в стенке ЗО;
- величина давления под оболочкой при аварии;
- коэффициент трения канатов СПЗО в каналообразователях;
- потери в % усилий канатов СПЗО при анкеровке;
- диаграмма работы каната СПЗО в виде билинейной функции, имеющей линейный упругий участок и участок пластической деформации с упрочнением;
- теплофизические свойства материалов защитной оболочки;
- пороговый уровень чувствительности датчиков напряжений КИА;
- значение порогового уровня компонентов усилий в стенке оболочки;
- уровень аварийного давления и коэффициентов самонапряжения канатов СПЗО для заданных моментов времени;
- параметры оценки прочности (коэффициенты учета нагрузок в соответствии с нормативными документами).

Следует отметить, что применение детальной конечноэлементной модели ЗО, данных измерений усилий на анкерах арматурных канатов, а также компьютерных методов обработки больших объемов информации о распределении компонентов напряженного состояния для расчета усилий и моментов в стенке защитной оболочки повышает достоверность расчетных оценок, поскольку рассматривается более 15000 сечений стенки ЗО, охватывающих весь объем ЗО, включая зоны концентрации напряжений вблизи вута, опорного кольца, зоны в окрестности крупных технологических проходок.

2 Применение экспертной системы оценки НДС защитной оболочки на энергоблоке № 3 Ростовской АЭС

Для адаптации экспертной системы для энергоблока №3 Ростовской АЭС использована документация, полученная при выполнении работ по мониторингу в период возведения, преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки и включенная в информационную систему мониторинга защитной оболочки [3-5].

2.1 Расчетная модель защитной оболочки

Для анализа кинетики НДС защитной оболочки 3-го блока РОАЭС с учетом ползучести бетона, разработана детальная конечноэлементная модель сооружения (рис. 3а) с использованием 8-ми узловых объемных конечных элементов, в которой с помощью стержневых конечных элементов непосредственно моделируется меридиональная и окружная арматура вблизи наружной и внутренней поверхности ЗО (число узлов – 966680, число конечных элементов – 1284628).

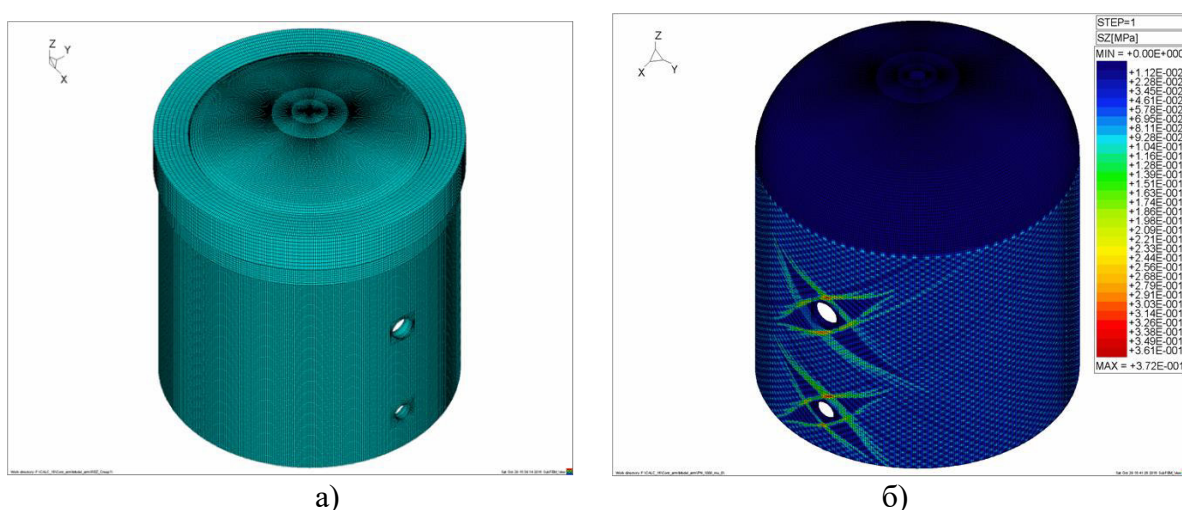


Рисунок 3 – Конечноэлементная модель защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС (а) и распределение давления на срединной поверхности оболочки (б), моделирующего воздействие канатов системы СПЗО [The finite element model of the Rostov NPP power unit No. 3 containment (a) and the pressure distribution on the middle containment surface (b), simulating the effect of containment system ropes]

Нагрузка от преднапряжения представлена в виде неравномерно распределенного давления на срединную поверхность модели оболочки, вычисляемого в соответствии с геометрией каждого каната и величины усилия его натяжения с учетом потерь на трение и анкеровку [6]. На рисунке 3б показана картина распределения давления, которое моделирует нагрузку от преднапряжения, на срединной поверхности модели оболочки на цилиндре [7]. Видно, что в зонах пересечения канатов противоположных направлений имеют место локальные максимумы нагрузки, кроме этого дополнительные усилия возникают в зонах обхода отверстий.

На этапе эксплуатации энергоблока №3 Ростовской АЭС для оценки уровня потерь усилий в арматурных канатах системы СПЗО-М из-за изменения геометрии оболочки вследствие процесса ползучести бетона оболочки выполнено моделирование процесса деформирования оболочки с учетом действующих нагрузок и характеристик ползучести бетона. Это позволило расчетным путем определить прогнозируемые усилия в арматурных канатах во время следующего ППР. Потери усилий в арматурных канатах возникают из-за уменьшения радиуса ЗО вследствие процессов ползучести бетона, что приводит к уменьшению длины предварительно натянутого каната, снижению его продольной деформации. В результате ползучести бетона происходит перераспределение напряжений

в бетоне и арматуре. Величины напряжений в арматуре измеряются датчиками КИА и увеличиваются по сравнению с исходным состоянием непосредственно после преднапряжения. На рисунке 4а показаны графики изменения напряжений в меридиональной арматуре во времени на отметке 32.6 м., полученные в расчетах.

Эти данные хорошо соответствуют данным измерений, что свидетельствует о корректности результатов расчетов. На рисунке 4б показан график изменения потерь усилий в канатах цилиндра во времени (номера шага расчета), рассчитанных по перемещениям узлов конечноэлементной модели на каждом шаге моделирования.

Применение экспертной системы оценки НДС защитной оболочки на этапе преднапряжения и прямо-сдаточных испытаний энергоблоков № 3 и № 4 Ростовской АЭС способствовало своевременному пуску энергоблока.

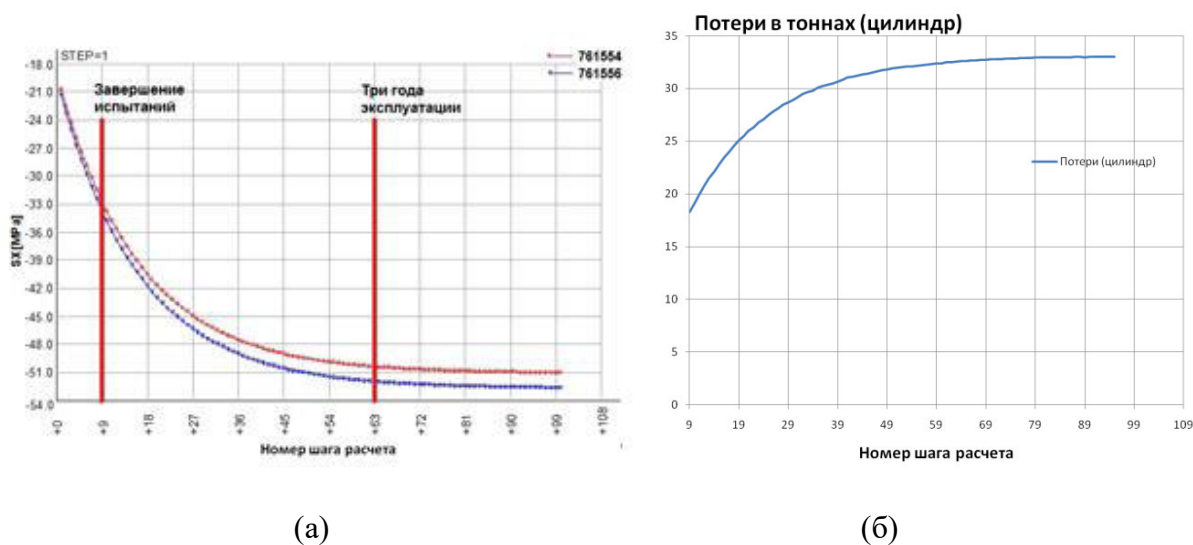


Рисунок 4 – Зависимость напряжений в меридиональной арматуре от времени (1 шаг = 20 сут.) на отметке 32.6 м. (а); средние потери усилий в канатах цилиндра из-за ползучести бетона (б) [Dependence of stresses in the meridional reinforcement from time (1 step = 20 days) at 32.6 m. (a); average effort losses in the cylinder ropes due to concrete plastic flow deformation (b)]

2.2 Формирование базы данных по показаниям датчиков КИА

При разработке экспертной системы формируется база данных по показаниям датчиков КИА, для графического представления которых разработаны необходимые алгоритмы и программные модули. В этих модулях предусмотрен формат временной шкалы, который позволяет анализировать показания датчиков КИА как в конкретный период работы оболочки, так и в период длительной эксплуатации. В качестве примера на рисунке 5 приведены приращения напряжений в меридиональной стержневой арматуре и значения температуры в бетоне с момента окончания прямо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018.

Такие возможности представления информации позволяют не только оценивать напряженно-деформированное состояние защитной оболочки в конкретный период, но и определять реологические характеристики железобетонной конструкции. Кроме того, представляется возможным определять работоспособность самих датчиков.

На рисунке 6 представлены результаты измерений перемещений стенки и температуры в бетоне с момента окончания прямо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018.

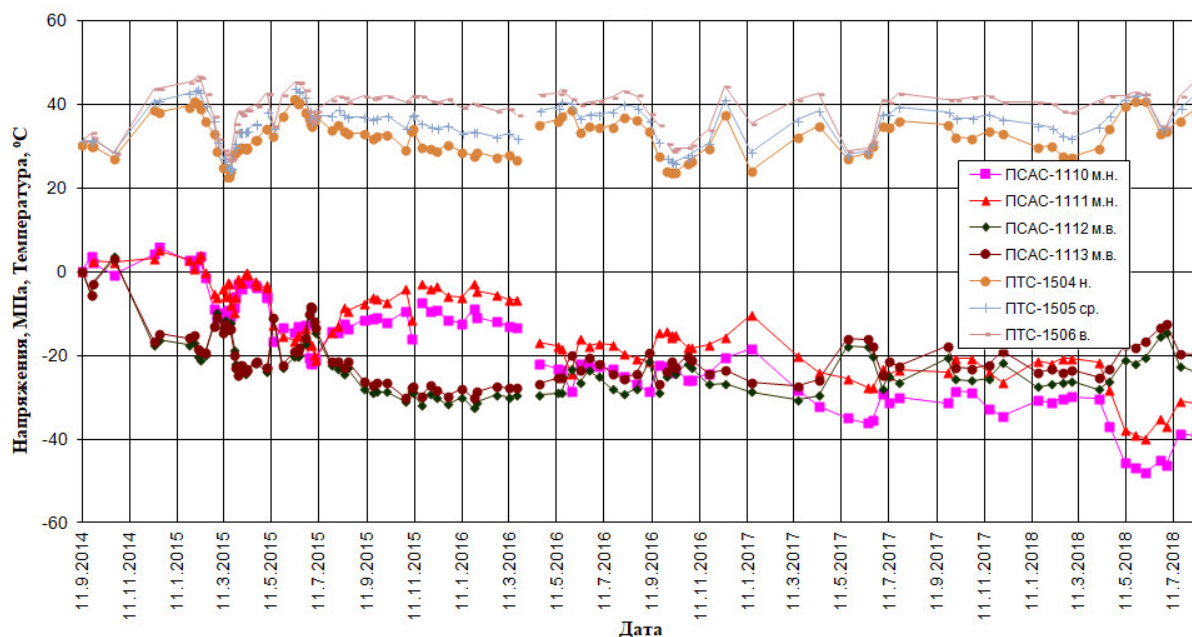


Рисунок 5 – Приращение напряжений в меридиональной стержневой арматуре и значения температуры в бетоне с момента окончания приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018 г. 3-й блок РoАЭС, створ №1, отметка 32,6 м [Increment of stresses in the meridional rod reinforcement and temperature values in concrete since the end of acceptance tests of the containment (11.09.2014) on 10.08.2018 Rostov NNP 3rd unit, section №1, 32.6 m elevation]

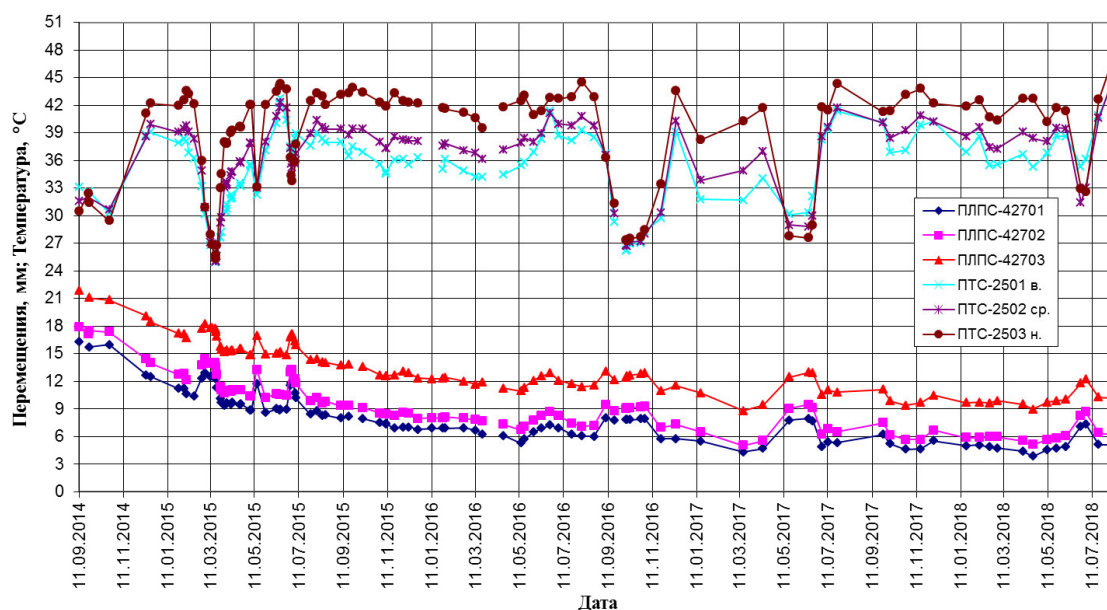


Рисунок 6 – Результаты измерений перемещений стенки и температуры в бетоне с момента окончания приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018. 3-й блок РoАЭС, створ №2 [The results of measurements of wall movement and temperature in concrete from the moment of completion of acceptance tests of the containment (11.09.2014) to 10.08.2018. Rostov NPP 3rd unit, section № 2]

2.3 Формирование базы данных по показаниям датчиков силы ПСИ-01

Для оценки НДС защитной оболочки во времени в первую очередь необходимо следить за динамикой изменения усилий в арматурных канатах по результатам натурных измерений датчиками силы ПСИ-01, так как это наиболее надежный на

сегодняшний день показатель состояния системы преднапряжения.

Анализ результатов измерений, полученных при помощи датчиков силы ПСИ-01 на тяжных анкерах арматурных канатов цилиндра защитной оболочки показал, что все приборы работали стабильно, реагировали на колебания сезонных температур. За рассматриваемый период с 11.09.2014 по 10.08.2018 года произошло незначительное снижение усилий – с 822 тс до 810,5 тс, т.е. снижение составило 11,5 тс или 1,4 %.

2.4 Применение экспертной системы в период испытания защитной оболочки

В период с 02.07.2018 по 06.07.2018 года была испытана на герметичность защитная оболочка энергоблока №3 Ростовской АЭС. Испытания проводились путем создания разряжения в герметичном объеме $0,03 \div 0,05$ кгс/см² и избыточного давления $1,4$ кгс/см² с дополнительным измерением утечки на промежуточных ступенях.

Характер приращений напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне в период испытаний защитной оболочки на герметичность показал, что конструкция работает в упругой стадии, т.к. после снятия нагрузки показания приборов возвращаются в исходное состояние (рис. 7). Это позволяет утверждать, что защитная оболочка удовлетворяет проектным критериям оценки НДС в период испытаний.

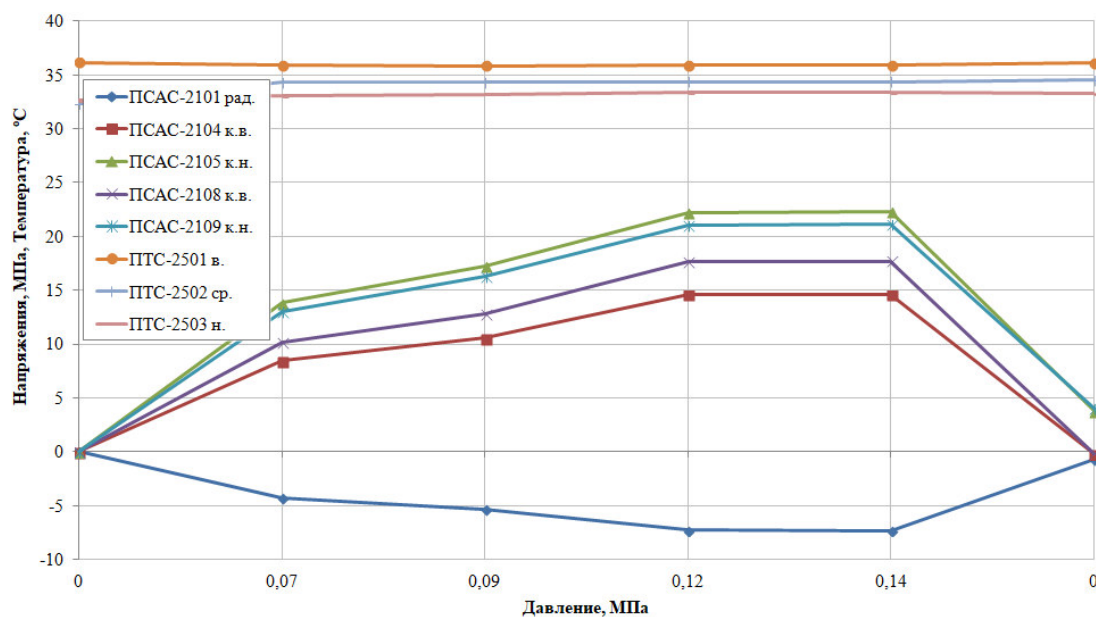


Рисунок 7 – Приращение напряжений в кольцевой стержневой арматуре и измерения температуры в бетоне при испытании защитной оболочки на герметичность, 3-й блок РоАЭС, створ №2, отметка 32,6 м.
[The results of measurements of wall movement and temperature in concrete from the completion moment of acceptance tests of the containment (11.09.2014) to 10.08.2018. Rostov NPP 3rd unit, section № 2]

Расчетная оценка НДС защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС, выполненная с помощью экспертной системы после испытания на герметичность системы герметичного ограждения на основе результатов контроля системы СПЗО-М и показаний КИА АСК НДС и СКУ, показала, что уровень преднапряжения достаточен для восприятия защитной оболочкой всех предусмотренных проектом нагрузок и воздействий [8, 9].

3 Применение экспертной системы оценки НДС защитной оболочки АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ

Экспертная система может быть адаптирована для оценки НДС и обеспечения эксплуатационной пригодности защитных оболочек блоков АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ с учетом всех конструктивных особенностей защитных оболочек (геометрии, армирования, распределения усилий в канатах системы предварительного напряжения, полного спектра нагрузок, включая аварийные и сейсмические).

На рисунке 8а и б показаны распределения кольцевых и меридиональных напряжений по объему модели оболочки АЭС-2006 с учетом воздействия эксплуатационных и аварийных нагрузок. Расчеты НДС защитной оболочки выполнены для случая воздействия нагрузок в момент начала аварии, включающей собственный вес, преднапряжение, внутреннее давление и температурную нагрузку, которая соответствует начальному стационарному распределению температуры.

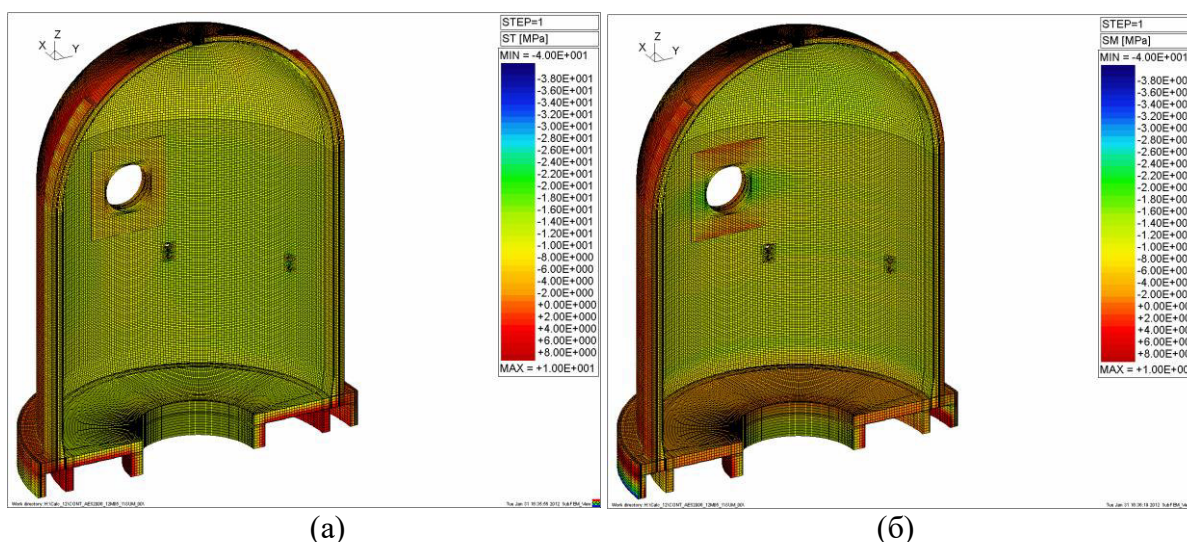


Рисунок 8 – Распределение кольцевых (а) и меридиональных (б) напряжений в бетоне от воздействия суммарной аварийной нагрузки в момент начала аварии [Distribution of ring (a) and meridional (b) stresses in concrete from the impact of the total emergency load at the time of the accident]

Наиболее напряженными зонами защитной оболочки АЭС-2006 являются:

- узел сопряжения цилиндрической части оболочки с основанием,
- зона в окрестности крупной технологической проходки,
- зоны расположения пилостр на цилиндрической части,
- зоны купола в области пересечения армоканатов в трех направлениях и зоны концов пилостр.

Разработанная конечноэлементная модель 3О позволяет в рамках экспертной системы проводить оценку достаточности обжатия 3О проекта АЭС-2006 аналогично тому, как это делается для 3О ВВЭР-1000.

4 Оценка НДС защитной оболочки АЭС по показаниям ПДИ

В настоящее время экспертная система дорабатывается с целью возможности дополнительно оценивать НДС защитной оболочки по показаниям датчиков ПДИ, предназначенных для измерения деформаций в консолях полярного крана.

Особо следует отметить, что кран кругового действия – это технологическое

оборудование, которое выполняет сопровождение основных механомонтажных работ на стадии строительства и в период планово-предупредительных ремонтов при эксплуатации. Кроме того, выполняет работы по загрузке свежего и выгрузке отработанного топлива.

Физические принципы работы защитной оболочки заключаются в том, что после монтажа крана кругового действия на подкрановый путь в районе ходовых колес воздействует сила, обусловленная его собственным весом и весом оборудования (корпус реакторной установки, парогенераторы и т.д.), устанавливаемого с помощью крана. Стена защитной оболочки в зоне крепления консоли воспринимает момент силы, который вызывает деформации сооружения [10, 11].

На данном этапе работы изучен вопрос о возникновении эллиптичности и трещинообразования стенки защитной оболочки АЭС при воздействии нагрузок от работающего полярного крана при монтаже оборудования (корпус реакторной установки, парогенераторы и т.д.) в период возведения сооружения. Разработаны методика и расчетная модель (рис. 9), позволяющие выполнить анализ НДС защитной оболочки с учетом нагрузок от работы полярного крана при монтаже оборудования.

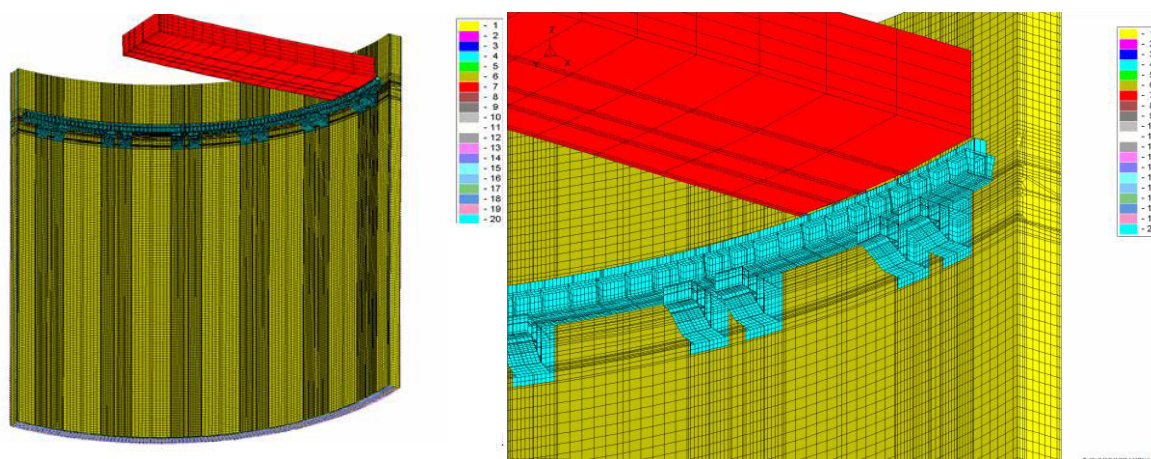


Рисунок 9 – Расчетная модель одной четвертой части ЗО с полярным краном и ее увеличенный фрагмент (номера материалов: 1 – бетон, 4 – сталь покрывной балки и консолей, 6 – стальная облицовка, 7 – кран, 8 – колеса крана, 12-20 – арматура) [Calculated model of one fourth of the containment with a polar crane and its enlarged fragment (material numbers: 1 – concrete, 4 – steel of the girder beam and consoles, 6 – steel lining, 7 – crane, 8 – crane wheels, 12-20 – reinforcement)]

В результате выполненного расчетного анализа получены данные о распределении перемещений узлов модели (рис. 10а) и компонентов НДС (рис. 10б) при нагружении подкрановой консоли весом крана после монтажа.

Можно отметить, что в зоне подкрановых консолей, ближайших к опорным конструкциям крана имеет место характерное выпучивание стенки оболочки. Это связано с совместным деформированием крана, подкрановых путей и стенки оболочки. Величина перемещений составляет порядка 2,04 мм, что на диаметре защитной оболочки дает увеличение диаметра на 4,08 мм. Это значение достаточно хорошо соответствует результатам измерений при повороте крана на 90^0 после монтажа, где увеличение диаметра вдоль оси крана составило 4,66 мм.

Основной причиной появления растягивающих напряжений на внешней поверхности защитной оболочки в зоне подкрановых консолей является совместное деформирование крана (прогиб), подкрановых конструкций и стенки оболочки. Под действием веса крана (и поднимаемого груза) подкрановая консоль прогибается вниз. При этом головка рельса из-за поворота сечения стремится переместиться к оси

оболочки. Однако опорные конструкции крана не позволяют ей такого смещения и кран, и подкрановые конструкции совместно распирают оболочку наружу.

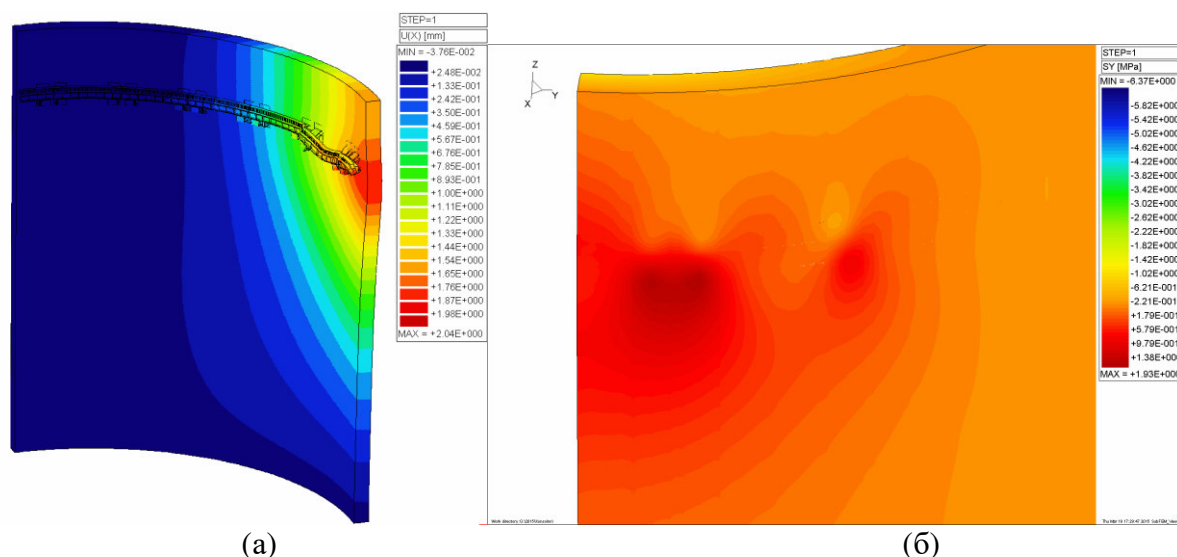


Рисунок 10 – Перемещения стенки оболочки и подкрановых конструкций в направлении оси крана (перемещения показаны в масштабе для наглядного отображения деформаций) – (а) и распределение окружных напряжений в бетоне стенки оболочки при воздействии собственного веса полярного крана (вид снаружи оболочки) – (б) [Displacement of the containment wall and crane structures in the direction of the crane axis (displacements are shown on the scale for visual display of deformations) – (a) and the distribution of circumferential stresses in the concrete of the containment wall when exposed to its own weight of the polar crane (outside view of the containment) – (b)]

Анализ полученных результатов показал, что при воздействии на цилиндрическую часть оболочки веса полярного крана в результате выпучивания наружу стенки защитной оболочки в зоне установки подкрановых консолей, расположенных вдоль оси крана, на внешней поверхности бетонной стенки оболочки возникают растягивающие окружные напряжения 1,9 МПа. Меридиональные напряжения достигают 1,58 МПа. Зона растягивающих меридиональных напряжений менее протяженна, чем зона растягивающих окружных напряжений. Полученный уровень растягивающих окружных напряжений близок к пределу прочности бетона на растяжение и, следовательно, в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне защитной оболочки могут образовываться меридиональные трещины незначительной глубины. Напряжения в указанных областях могут быть и выше значений, полученных из расчета, с учетом отклонений рельсового пути крана от идеальной окружности. Особенно негативны случаи уменьшения диаметра подкрановых путей, т.к. усилие распора подкрановых путей и стенки оболочки в результате совместного деформирования с краном в этом случае должно возрастать.

Выводы

1. Экспертная система позволяет формировать базу данных по показаниям датчиков КИА и датчиков силы ПСИ-01 для расчетов напряженно-деформированного состояния защитной оболочки, графическое представление данных позволяет оценивать работоспособность самих датчиков.
2. Экспертная система позволяет исключать необоснованные подтяжки арматурных канатов при проведении КПР, которые отрицательно сказываются на состоянии этих канатов, а также бетона и металлической облицовки сооружения.
3. В случае самопроизвольного обрыва одного или нескольких арматурных

канатов в процессе эксплуатации защитной оболочки экспертная система определяет достаточность уровня обжатия конструкции для восприятия аварийной нагрузки или указывает на необходимость принятия срочных мер по восстановлению ее эксплуатационной пригодности: подтяжка арматурных канатов, проходящих вблизи оборванных канатов, или срочная замена оборванных канатов.

4. В период с 02.07.2018 по 06.07.2018 года на энергоблоке №3 Ростовской АЭС была испытана на герметичность система герметичного ограждения. Испытания проводились путем создания разряжения в герметичном объеме $0,03 \pm 0,05$ кгс/см² и избыточного давления 1,4 кгс/см² с дополнительным измерением утечки на промежуточных ступенях.

Характер приращений напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне в период испытаний защитной оболочки на герметичность показал, что конструкция работает в упругой стадии, т.к. после снятия нагрузки показания приборов возвращаются в исходное состояние. Это позволяет утверждать, что защитная оболочка удовлетворяет проектным критериям оценки НДС в период испытаний.

5. Экспертная система использовалась для оперативной оценки эксплуатационной безопасности защитной оболочки энергоблоков № 3 и 4 Ростовской АЭС в период испытаний на герметичность в соответствии с требованиями нормативных документов по безопасности.

6. Применение разработанной экспертной системы для прогноза и анализа НДС ЗО действующих блоков АЭС (в перспективе и для защитных оболочек АЭС нового поколения – АЭС 2006, ВВЭР-ТОИ) является эффективным инструментом подтверждения выполнения требований по эксплуатационной пригодности защитных оболочек.

7. В процессе возведения на конструкцию оболочки действуют нагрузки от веса полярного крана, полная масса которого с учетом подкранового рельса составляет 650 тонн. В этой связи рекомендуется устанавливать ПДИ в проектное положение до монтажа полярного крана

8. В настоящее время экспертная система дорабатывается с целью возможности дополнительно оценивать НДС защитной оболочки по показаниям датчиков ПДИ, предназначенных для измерения деформаций в консолях полярного крана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев, В.Н.* Разработка экспертной системы оценки напряженного состояния для защитной оболочки 1-го энергоблока Волгодонской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – Спецвыпуск – С. 107-112.
2. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст]. – Москва, 2004.
3. РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011. Мониторинг строительных конструкций атомных станций [Текст]. – Москва, 2011.
4. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Текст]. – Москва, 2011.
5. НП-010-16. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций [Текст]. – Москва, 2016.
6. Патент на изобретение RU 2548267. Способ натяжения арматурных канатов [Текст] / Л.А. Большов, В.Н. Медведев, В.Ф. Стрижов, А.Н. Ульянов. – 20.04.2015.
7. *Медведев, В.Н.* Натурные наблюдения на этапе строительства защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 3 (12). – С. 89-99.
8. *Медведев, В.Н.* Результаты испытаний защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2 (15). – С. 71-83.

9. Сальников, А.А. Особенности НДС защитных оболочек АЭС на этапе возведения, преднапряжения, приемо-сдаточных испытаний и эксплуатации [Текст] / А.А. Сальников [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: материалы 11-й междунар. научно-технич. конф. Москва, 23-24 мая 2018 г. – Москва : Концерн Росэнергоатом, 2018. – С. 24-30.
10. Пимшин, Ю.И. Влияние крана кругового действия на техническое состояние строящейся защитной герметичной оболочки АЭС [Текст] / Ю.И. Пимшин [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2 (19). – С. 33-42.
11. Пимшин, Ю.И. Оценка напряженно-деформированного состояния защитных герметичных оболочек на примере блоков Ростовской АЭС [Текст] / Ю.И. Пимшин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 3. – С. 36-42.

REFERENCES

- [1] Medvedev V.N., Ulyanov A.N., Kiselev Al-Ndr S., Kiselev Alexey S., Strizhov V.F., Bayuklin V.F. Razrabotka e`kspertnoj sistemy` ocenki napryazhennogo sostoyaniya dlya zashhitnoj obolochki 1-go e`nergobloka Volgodonskoj AE`S [Development of Expert System for Assessing the Stress State for the Volgodonsk NPP1st Unit Containment]. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Texnicheskie nauki [News of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Science]. 2008. Special issue. P. 107-112 (in Russian).
- [2] SNiP 52-01-2003. Betonny`e i zhelezobetonny`e konstrukcii. Osnovny`e polozheniya [SNiP 52-01-2003. Concrete and Reinforced Concrete Structures. The Main Provisions]. Moskva [Moscow]. 2004 (in Russian).
- [3] RD E`O 1.1.2.99.0624-2011. Monitoring stroitel`ny`x konstrukcij atomny`x stancij [RD EO 1.1.2.99.0624-2011. Monitoring of Building Structures of Nuclear Power Plants]. Moskva [Moscow]. 2011 (in Russian).
- [4] GOST 31937-2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa texnicheskogo sostoyaniya [GOST 31937-2011. Buildings and Constructions. Rules of Inspection and Monitoring of Technical Condition]. Moskva [Moscow]. 2011 (in Russian).
- [5] NP-010-16. Pravila ustrojstva i e`kspluatacii lokalizuyushix sistem bezopasnosti atomny`x stancij [NP-010-16. Rules for Design and Operation of Localized Safety Systems of Nuclear Power Plants]. Moskva [Moscow]. 2016 (in Russian).
- [6] Sposob natyazheniya armaturny`x kanatov. L.A. Bol`shov, V.N. Medvedev, V.F. Strizhov, A.N. Ul`yanov. Patent na izobretenie RUS 2548267. 20.04.2015 [The Method of Tension Reinforcing Ropes. L.A. Bolshov, V.N. Medvedev, V.F. Strizhov, A.N. Ulyanov. Patent for Invention RUS 2548267. 04/20/2015] (in Russian).
- [7] Medvedev V.N. Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Potapov E.A. Naturny`e nablyudeniya na e`tape stroitel`stva zashhitnoj obolochki e`nergobloka № 3 Rostovskoj AE`S [Field Observations at the Construction Stage of the Containment of the Power Unit No. 3 of the Rostov NPP]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2014. № 3 (12). P. 89-99 (in Russian).
- [8] Medvedev V.N. Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Salnikov A.A. Rezul`taty` ispy`tanij zashhitnoj obolochki e`nergobloka № 3 Rostovskoj AE`S [Test Results of the Containments of the Rostov NPP Power Unit No. 3 ]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2015 № 2 (15). P. 71-83 (in Russian).
- [9] Salnikov A.A. Medvedev V.N., Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N. Strizhov V.F., Skorikova M.I. Osobennosti NDS zashhitny`x obolochek AE`S na e`tape vozvedeniya, prednapryazheniya, priemo-sdatochny`x ispy`tanij i e`kspluatacii [Features of NPP Containments at the Stage of Construction, Prestressing, Acceptance Tests and Operation]. Bezopasnost`, e`ffektivnost` i e`konomika atomnoj e`nergetiki: materialy` 11-j mezhdunar. nauchno-texnich. konf. Moskva [Safety, Efficiency and Economics of Atomic Energy: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference Moscow]. May 23-24, 2018. Moskva [Moscow]: Rosenergoatom Concern. 2018. P. 24-30 (in Russian).
- [10] Pimshin Yu.I., Klyushin E.B., Gubeladze O.A., Medvedev V.N., Burdakov S.M., Zayarov Yu.V. Vliyanie kрана кругового dejstviya na texnicheskoe sostoyanie stroyashhejsya zashhitnoj germetichnoj obolochki AE`S [The Effect of a Circular Action Valve on the Technical Condition of the Protective Containment of the NPP under Construction]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2016. № 2 (19). P. 33-42 (in Russian).
- [11] Pimshin Yu.I., Medvedev V.N., Naumenko G.A., Char V.A., Zabaznov Yu.S. Ocenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zashhitny`x germetichny`x obolochek na primere

blokov Rostovskoj AE`S [Assessment of the Stress-Strain State of Containments on the Example of the Rostov NPP Units]. *Izvestiya vy'sshix uchebny`x zavedenij. Geodeziya i aerofotos`emka* [News of Higher Educational Institutions. Surveying and Aerial Photography]. 2017. № 3. P. 36-42 (in Russian).

Application of the Expert System for Assessing of the Stress-Strain State of Nuclear Power Plant Containments at the Stage of Construction and Operation

**V.N. Medvedev¹, Aleksandr S. Kiselev², Aleksei S. Kiselev³,
V.F. Strizhov⁴, A.N. Ul'yanov⁵, M.I. Skorikova⁶**

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Bol'shaya Tul'skaya St., 52, Moscow, Russia, 115191

¹*ORCID iD: 0000-0003-2182-9769*

Wos Researcher ID: U-8092-2018

e-mail: cont@ibrae.ac.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-1405-4080*

Wos Researcher ID: U-8140-2018

e-mail: alkis_rrcki@mail.ru

³*ORCID iD: 0000-0002-2450-4495*

Wos Researcher ID: U-8820-2018

e-mail: kis-rncki@rambler.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0003-2244-6612*

Wos Researcher ID: V-5004-2018

e-mail: vfs@ibrae.ac.ru

⁵*ORCID iD: 0000-0003-4850-4825*

Wos Researcher ID: U-8123-2018

e-mail: cont@ibrae.ac.ru

⁶*ORCID iD: 0000-0002-9090-346X*

Wos Researcher ID: U-8075-2018

e-mail: skorikova@ibrae.ac.ru

Abstract – Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences develops an expert system for assessing the stress-strain state of the containments of WWER-1000 NPP units. The expert system consists of the software package CONT, force control sensors in armored channels, sensors of instrumentation equipment. The paper provides a description of the expert system for assessing the stress-strain state of NPP containment and the features of its application.

Keywords: containment, stress-strain state, expert system.