

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 624.04.45.001.3

**К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС
В ПЕРИОД ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

© 2020 В.Н. Медведев *, А.С. Киселев **, А.С. Киселев **, В.Ф. Стрижов *,
А.Н. Ульянов *, М.И. Скорикова *, Ю.И. Пимшин ***

**Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия*

***Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

****Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В работе приводятся результаты исследования изменения НДС и геометрических параметров защитной оболочки вблизи узла сопряжения цилиндрической части с куполом и в зоне расположения подкрановых путей полярного крана на этапе приемо-сдаточных испытаний.

Ключевые слова: защитная оболочка, перемещения, деформации, напряжения, усилия.

Поступила в редакцию 13.12.2019

После доработки 16.12.2019

Принята к публикации 19.12.2019

Введение

Применение геодезического контроля перемещений защитных оболочек АЭС на этапе преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний в дополнение к штатной системе контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) позволило получить более полную картину деформированного состояния, в том числе в зонах защитной оболочки, где датчики контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) отсутствуют. На примере энергоблока № 3 Ростовской АЭС детально рассмотрены особенности изменения НДС и геометрических параметров защитной оболочки вблизи узла сопряжения цилиндрической части с куполом и в зоне расположения подкрановых путей полярного крана.

Влияние суточных колебаний температур окружающей среды на показания датчиков силы

На изменение напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС на этапе строительства после ее преднапряжения кроме деформаций ползучести железобетона и релаксации напряжений в проволоках арматурных канатов оказывают влияние суточные и сезонные колебания температур окружающей среды.

В данном разделе дана оценка изменения усилий на тяжных анкерах арматурных канатов цилиндра и купола защитной оболочки 3-го энергоблока Ростовской АЭС до начала приемосдаточных испытаний (до 08.08.2014 г.) от влияния суточных колебаний температур окружающей среды, включая солнечное излучение. Контроль усилий на концах арматурных канатов СПЗО выполнялся при помощи датчиков силы ПСИ-01.

В защитных оболочках АЭС КИА располагается, как правило, в четырех вертикальных створах, в створах № 1, 2 и 4 датчики расположены со смещением на 20° от осей, а в створе № 3 смещение от оси составляет 40° (рис. 1).

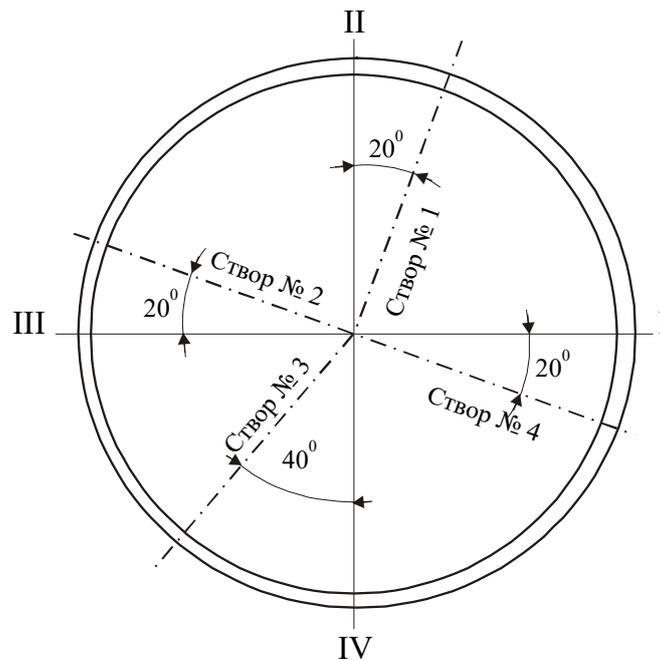


Рисунок 1 – Местоположение створов относительно осей, в которых расположены датчики контрольно-измерительной аппаратуры [Location of the sections relative to the axes where the control sensors of instrumentation are located]

Результаты измерений, полученные в различные моменты времени 31.07.2014 г., показывают, что колебания усилий в течение суток могут составлять около 10 тс.

Максимальные колебания усилий наблюдались в армоканатах купола защитной оболочки вблизи оси II (юго-западная сторона). Например, усилия в армоканате купола К13А в 15 часов 55 минут составляли 837,4 тс, а в 23 часа 52 минуты – 830,1 тс, т.е. за 8 часов усилия снизились на 7,3 тс (см. табл. 1).

Минимальные колебания усилий наблюдались в армоканатах купола защитной оболочки вблизи оси IV (северо-восточная сторона). Например, усилия в армоканате купола К32А в 15 часов 55 минут составляли 833,7 тс, а в 23 часа 52 минуты – 831,9 тс, т.е. за 8 часов усилия снизились на 1,8 тс (см. таблицу 1).

При этом температура воздуха за этот период времени снизилась с 31,9 °С до 25,4 °С на 6,5 °С (см. таблицу 2). Вероятно, наиболее существенный вклад в изменение усилий в армоканатах вносит солнечное излучение, что подтверждается разностью приращения усилий в армоканатах с юго-западной и северо-восточной сторон сооружения.

Таким образом, оценка изменения усилий на тяжных анкерах арматурных канатов защитной оболочки 3-го энергоблока Ростовской АЭС от влияния суточных колебаний температур окружающей среды и солнечного излучения показала, что колебания усилий в течение суток могут составлять около 10 тс. Эти изменения усилий носят циклический характер и могут отрицательно влиять на эксплуатационные свойства СПЗО в части возможности подтяжки и замены армоканатов при длительной эксплуатации из-за увеличения контактных напряжений между цапгами и поверхностями в отверстиях анкерного блока.

Анализ результатов работ по ремонту арматурных канатов, имевших обрывы и дефекты в период преднапряжения защитной оболочки, показал, что при разгрузке арматурных канатов были случаи их обрыва.

Причиной обрыва проволок армоканата при его разгрузке является то обстоятельство, что при этом к армоканату требуется приложить большее усилие, чем при преднапряжении. Чтобы вырвать канат с цапговым зажимом из гнезда анкерного блока требуется дополнительное усилие порядка 5 тс. Если при первоначальном

преднапряжении усилие в армоканате составляло порядка 20 тс, то при демонтаже – порядка 25 тс (600 бар), т.е. больше на 25 %.

Следовательно, в случае необходимости подтяжки или замены армоканатов при длительной эксплуатации СПЗО из-за увеличения контактных напряжений между цангами и поверхностями в отверстиях анкерного блока потребуется приложить усилие, значительно большее, чем при преднапряжении. Поэтому вопрос о возможности подтяжки армоканатов при длительной эксплуатации должен быть рассмотрен с учетом действия циклической нагрузки.

Таблица 1 – Результаты измерений усилий (тс) в армоканатах, полученные с помощью датчиков силы ПСИ-01 в различном времени суток 31.07.2014 г. [The results of tendon forces measurements with the force sensors PSI-01 at various time instants of the day 07/31/2014]

№ армо-каната	10:49	14:52	15:55	16:57	17:59	19:01	21:06	23:52
К-12Б	804,9	809,2	809,5	809,3	808,9	807,6	804,2	802,3
К-13А	833,1	837,2	837,4	837,2	836,8	835,7	832	830,1
К-14А	852	856,3	856,6	856,5	856	855	851,1	849,3
К-15А	845,8	849,4	849,6	849,3	848,6	847,2	843,6	842,4
К-16Б	814,1	817,7	817,7	817,5	816,8	815	812	810,4
К-30А	856,8	856	856	856,1	856	856	855,1	854,1
К-32А	834,1	833,6	833,7	833,7	833,7	833,7	832,7	831,9
К-34А	824,2	824,5	824,6	824,8	824,6	824,7	823,7	822,8
К-3А	820,5	822,6	823,7	824,1	824,1	824,2	820,7	818,8
К-3Б	820,5	822,4	823,7	824,6	824,8	825,1	821,5	819
К-7А	816,3	818,1	819,3	819,6	819,8	819,9	816,7	814,8

Таблица 2 – Температура воздуха в г. Волгодонске 31.07.2014 г. [Air temperature in Volgodonsk 07/31/2014]

Время	Температура, °С	Облачность, %	Давление, мм рт. ст.	Ветер, м/сек
0:00	+24.8	Ясная погода	756	Юго-восточный, 2 м/сек
3:00	+23.2	Ясная погода	756	Юго-восточный, 1 м/сек
6:00	+22.2	Ясная погода	756	Восточный, 2 м/сек
9:00	+25.6	Малооблачно (20%)	757	Восточный, 2 м/сек
12:00	+28.7	Малооблачно (20%)	756	Северо-восточный, 3 м/сек
15:00	+31.9	Малооблачно (20%)	755	Северо-восточный, 2 м/сек
18:00	+30.3	Небольшая облачность (30%)	754	Северо-восточный, 2 м/сек
21:00	+25.4	Небольшая облачность (30%)	754	Северо-восточный, 2 м/сек

Особенности изменения НДС и геометрических параметров защитной оболочки вблизи узла сопряжения цилиндрической части с куполом

Оценка НДС защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС выполнялась с учетом показаний датчиков контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), установленных в теле сооружения в период возведения, показаний датчиков силы ПСИ-01, установленных на анкерах армоканатов системы преднапряжения защитной оболочки, результатов измерений перемещений стенки защитной оболочки при помощи датчиков типа ПЛПС, результатов измерений геометрических параметров защитной оболочки геодезическими методами [1].

Результаты контроля НДС и геометрических параметров защитной оболочки вблизи узла сопряжения цилиндрической части с куполом показали, что конструкция при подъеме давления работает нелинейно.

На рисунке 3 приведены графики приращения напряжений в меридиональной стержневой арматуре в период прямо-сдаточных испытаний защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС. Рассматривается купольная часть защитной оболочки на радиусе $R = 19$ м. Можно видеть, что у внутренней поверхности стены оболочки на каждом шаге подъема внутреннего давления происходит увеличение растягивающих напряжений, а у наружной поверхности на первом шаге при давлении 0,07 МПа наблюдается рост сжимающих напряжений, затем происходит незначительное колебание напряжений. Следовательно, работа защитной оболочки в зоне узла сопряжения носит моментный характер: растяжение у внутренней поверхности и сжатие у наружной. [2] При этом изменения геометрических параметров в зоне узла сопряжения цилиндра с куполом защитной оболочки не наблюдается.

В период прямо-сдаточных испытаний ЗО энергоблока №3 РoАЭС проводились измерения геометрических параметров геодезическими методами. Схема расположения исследуемых точек на купольной и цилиндрической частях оболочки представлена на рисунке 2.

На рисунке 4 приведены графики приращения перемещений купола защитной оболочки в период прямо-сдаточных испытаний в створе I-II. Точка № 1 расположена в районе непосредственного примыкания к опорному кольцу. Далее точки располагаются с определенным шагом от опорного кольца до вершины купола [3-5]. На вершине купола расположена точка № 0. На рисунке 4 также можно видеть, что работа защитной оболочки в зоне узла сопряжения носит моментный характер. Наибольшее перераспределение напряжений происходит при повышении давления с 0,19 до 0,29 МПа.

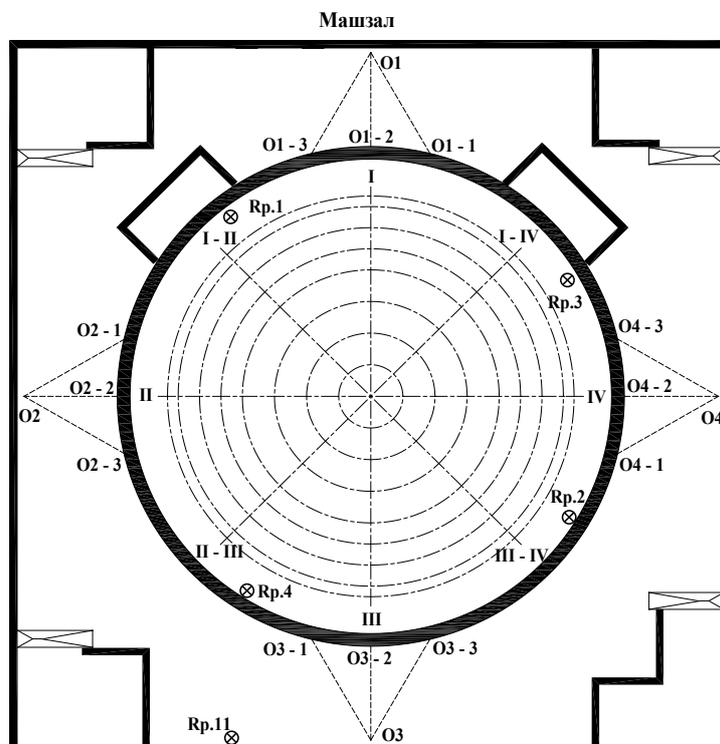


Рисунок 2 – Схема расположения исследуемых точек на купольной и цилиндрической частях оболочки (точки располагаются в местах пересечений окружных и меридиональных направлений) [The location scheme of the observable points on the dome and cylindrical parts of the containment (points are located at the intersections of circular and meridional directions)]

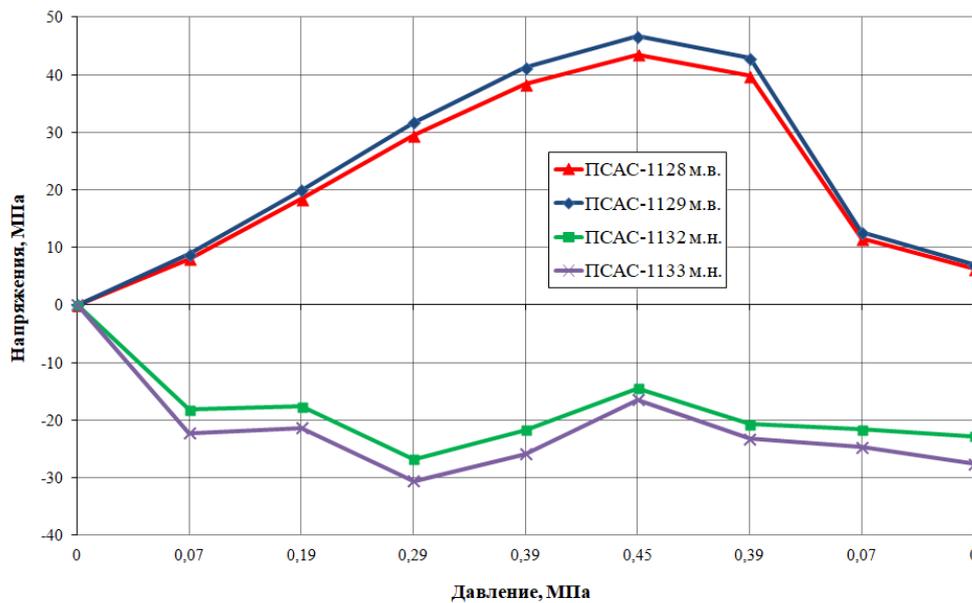


Рисунок 3 – Приращение напряжений в меридиональной стержневой арматуре в период приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки, энергоблок №3 РoАЭС, створ №1, купол, R = 19 м (1128-1133 – номера датчиков в ЗО, м.в – меридиональный внутренний, м.н. – меридиональный наружный) [The stress increments in the meridional steel reinforcing rods during the acceptance test of the containment, power unit No. 3 of the Rostov NPP, section No. 1, dome, R = 19 m (1128-1133 – sensor numbers in the containment, m.v. – meridional internal, m.n. – meridional outer)]

Такой характер поведения защитной оболочки в период приемо-сдаточных испытаний соответствующим образом повлиял на показания датчиков силы ПСИ-01. Приведенные в таблице №3 приращения усилий в отдельных армоканатах купола защитной оболочки при испытаниях на герметичность и прочность показали, что все датчики работали исправно. При подъеме давления до 0,07 МПа зафиксировано увеличение усилий от 2,5 до 4 тс. В дальнейшем происходило незначительное увеличение или снижение усилий в зависимости от изменения геометрии ЗО.

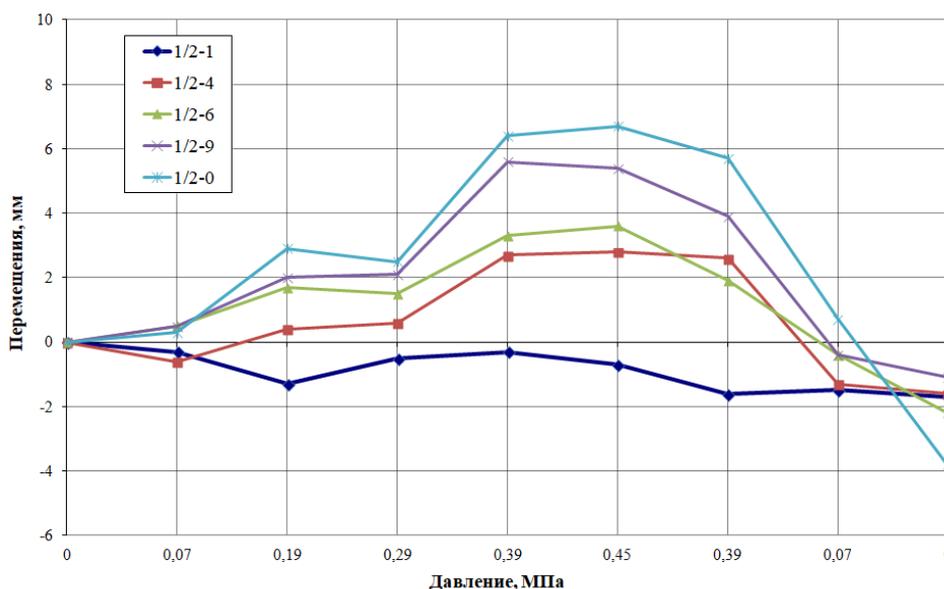


Рисунок 4 – Приращения перемещений купола защитной оболочки в период приемо-сдаточных испытаний, энергоблок №3 Ростовской АЭС, створ I-II (1/2-0 – вершина купола, 1/2-9 – радиус 3 м, 1/2-6 – радиус 10 м, 1/2-4 – радиус 12,5 м, 1/2-1 – вблизи опорного кольца) [Displacement increments of the containment dome during the acceptance tests, power unit No. 3 of the Rostov NPP, section I-II (1/2-0 – the top of the dome, 1/2-9 – radius 3 m, 1/2-6 – radius 10 m, 1/2-4 – radius 12.5 m, 1/2-1 – near the support ring)]

Таким образом, показания датчиков ПСИ-01 в период испытаний зависят от изменения геометрических параметров сооружения.

Таблица 3 – Приращения усилий в отдельных армоканатах купола защитной оболочки при испытаниях на герметичность и прочность [Force increments in individual tendons of the containment dome during tests for tightness and strength]

№ Армоканата	Дата 08.08.14, давление 0,0 МПа	Дата 10.08.14, давление 0,07 МПа	Дата 10.08.14, давление 0,19 МПа	Дата 10.08.14, давление 0,29 МПа	Дата 11.08.14, давление 0,39 МПа	Дата 12.08.14, давление 0,45 МПа	Дата 13.08.14, давление 0,39 МПа	Дата 13.08.14, давление 0,07 МПа	Дата 14.08.14, давление 0,0 МПа
	Приращения усилий, тс								
К-11А	0	2,7	-0,7	2,3	0,7	1,4	3	0,9	-2
К-12Б	0	2,6	-0,6	1,8	0,3	1,2	2,4	0,8	-3
К-13А	0	2,8	-1,3	2	0,2	1,6	3,1	0,1	-3
К-14А	0	2,5	-0,7	1,7	0,2	1,5	2,6	0,5	-2,2
К-14Б	0	3,4	0,2	3	1	1,5	3,4	1,3	-1,4
К-15А	0	3,6	-0,4	3,1	0,8	1,8	3,5	0,6	-2,1
К-16Б	0	4	-0,8	3,4	1	2,2	4,3	0,7	-2

Особенности изменения НДС и геометрических параметров защитной оболочки в зоне расположения подкрановых путей полярного крана

Подкрановая консоль полярного крана обладает определенной жесткостью, вследствие чего при преднапряжении и испытаниях защитной оболочки в этой зоне перемещения могут быть меньше, чем в однородной зоне. Например, перемещения от преднапряжения в створе №1 на отметке 36,9 м составили -10,7 мм, а на отметке 47 м порядка -6,8 мм. В период испытаний при давлении 0,45 МПа на отметке 36,9 м перемещения были максимальными и составили 7,95 мм, после сброса испытательного давления геометрические параметры ЗО вернулись в исходное состояние.

В зоне расположения полярного крана на отметке 47 м в период испытаний при давлении 0,45 МПа перемещения не были максимальными и составляли 4,4 мм, при снижении давления до 0,39 МПа перемещения увеличились до 4,98 мм, а после сброса испытательного давления геометрические параметры защитной оболочки уменьшилась еще на 2,33 мм (см. рис. 5). Суммарные перемещения после сброса давления составили 7,3 мм, что сопоставимо с изменениями на отметке 36,9 м.

Следовательно, за счет жесткости подкрановой консоли полярного крана на этапе преднапряжения перемещения защитной оболочки были ниже ожидаемого значения на 2,9 мм, а при подъеме внутреннего давления в период приемо-сдаточных испытаний жесткость была снижена, в результате после сброса давления оболочка дополнительно переместилась на 2,33 мм и, как следствие, произошло снижение усилий в армоканатах в зоне расположения подкрановой консоли.

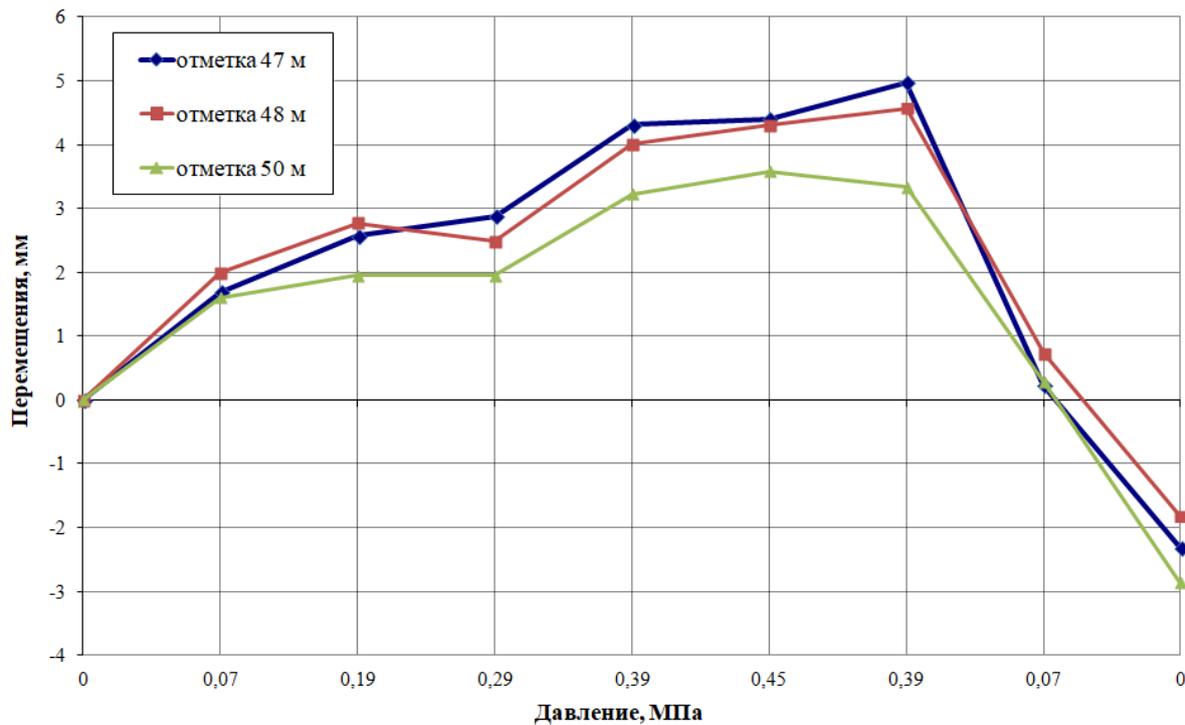


Рисунок 5 – Приращения перемещений стенки 3О в период приемо-сдаточных испытаний, энергоблок №3 Ростовской АЭС, отметка 47.0, 48.0 и 50 м, створ №1 [Displacement increments of the wall of the containment during the acceptance tests, power unit No. 3 of the Rostov NPP, mark 47.0, 48.0 and 50 m, section No. 1]

Таким образом, подкрановая консоль полярного крана обладает определенной жесткостью, что препятствует перемещению защитной оболочки при преднапряжении. Изменение геометрических параметров при испытаниях защитной оболочки приводит к снижению жесткости. Поэтому целесообразно проводить рихтовку подкрановых путей полярного крана только после проведения испытаний защитной оболочки.

Результаты расчета НДС защитной оболочки энергоблока

Выполнены расчеты НДС защитной оболочки 3-го блока Ростовской АЭС в период преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний в процессе приложения испытательного давления с учетом действующих на этот период времени усилий в армоканатах СПЗО и температур окружающей среды. Расчеты проводились в нелинейной постановке (с учетом процессов ползучести в бетоне) для достижения лучшего соответствия расчетных и экспериментальных данных.

Проведенный анализ показал, что полученные расчетные значения перемещений и параметров НДС 3О энергоблока № 3 Ростовской АЭС при её преднапряжении и в процессе приемо-сдаточных испытаний качественно и количественно соответствуют измеренным [6, 7].

На рисунке 6 приведено распределение радиальных перемещений защитной оболочки при воздействии преднапряжения и испытательного давления $P = 0,45$ МПа. За исключением локальных областей на куполе бетон защитной оболочки работает в состоянии двухосного сжатия (см. рис. 7 и 8), что обеспечивает ее работоспособность даже при максимальной испытательной нагрузке.

Однако в расчетах учесть влияние жесткости подкрановой консоли полярного крана достаточно сложно, поэтому влияние данного фактора на рисунке 6 не прослеживается [8-12].

Таблица 4 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений перемещений стенки защитной оболочки при воздействии преднапряжения и максимального испытательного внутреннего давления на отметке 36,9 м [Comparison of the calculated and experimental values of the displacements of the wall of the containment under the influence of prestress and maximum test internal pressure at 36.9 m]

№ Створа	Приращения радиальных перемещений стенки оболочки от обжатия, мм	Приращения радиальных перемещений стенки оболочки при давлении 0,45 МПа, мм
	Измеренные / расчетные	
1	-10,7 / -9,8	7,95 / 7,6
2	-9,53 / -9,62	7,39 / 6,9
3	-12,96 / -12,4	7,24 / 7,1
4	-12,15 / -12,6	7,22 / 6,8

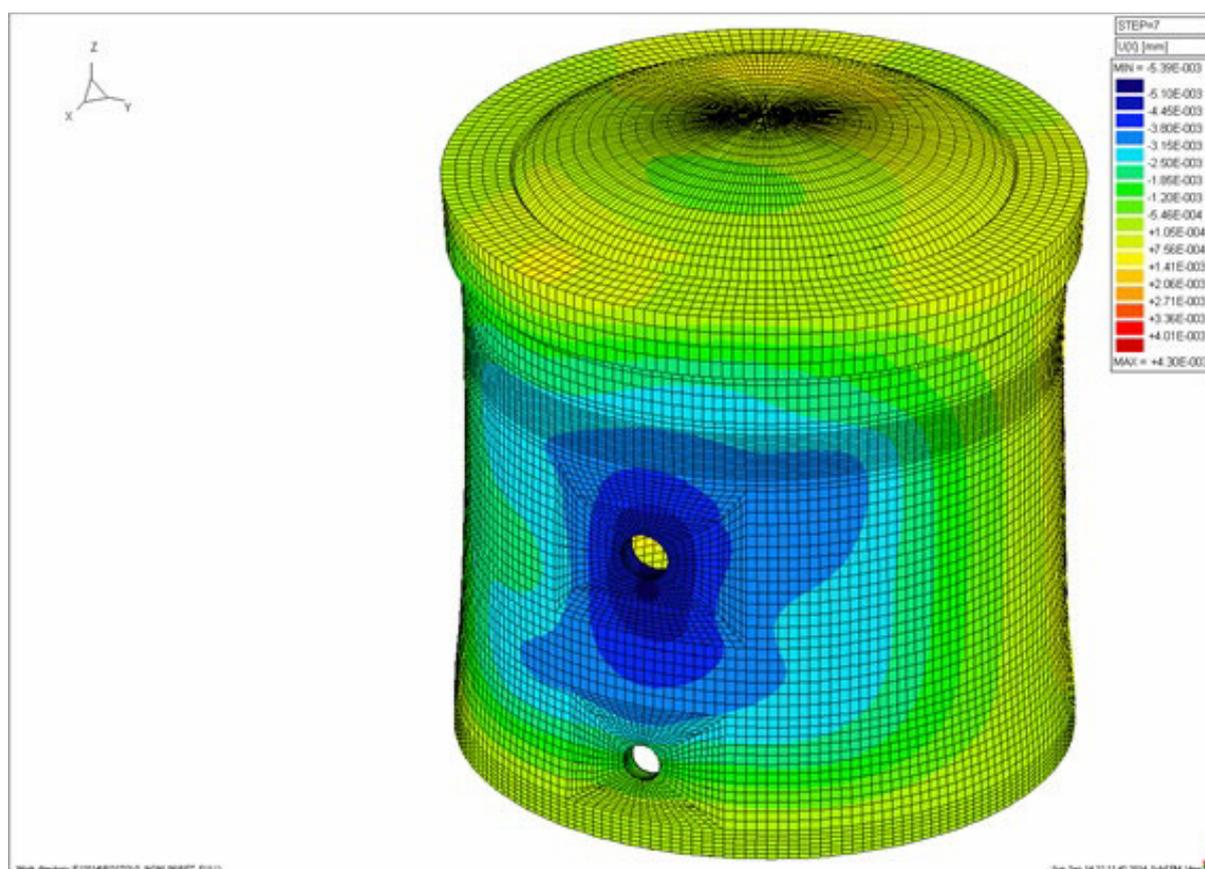


Рисунок 6 – Распределение радиальных перемещений [мм] защитной оболочки при воздействии преднапряжения и испытательного давления $P=0,45$ МПа [Distribution of radial displacements [mm] of the containment under loads induced by the prestressing and test pressure $P = 0.45$ MPa]

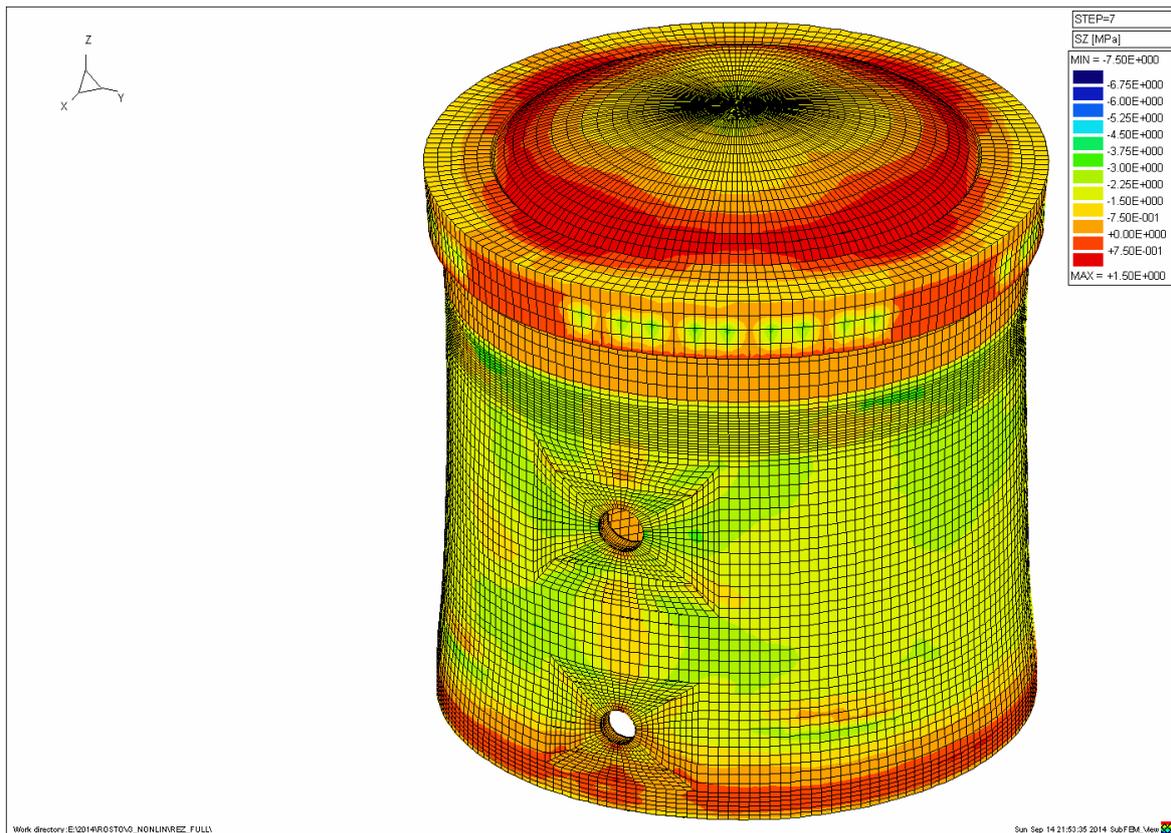


Рисунок 7 – Распределение меридиональных напряжений [МПа] на внешней поверхности защитной оболочки при воздействии испытательного давления $P = 0,45$ МПа [Distribution of meridional stresses [MPa] on the outer surface of the containment exposed to test pressure $P = 0.45$ MPa]

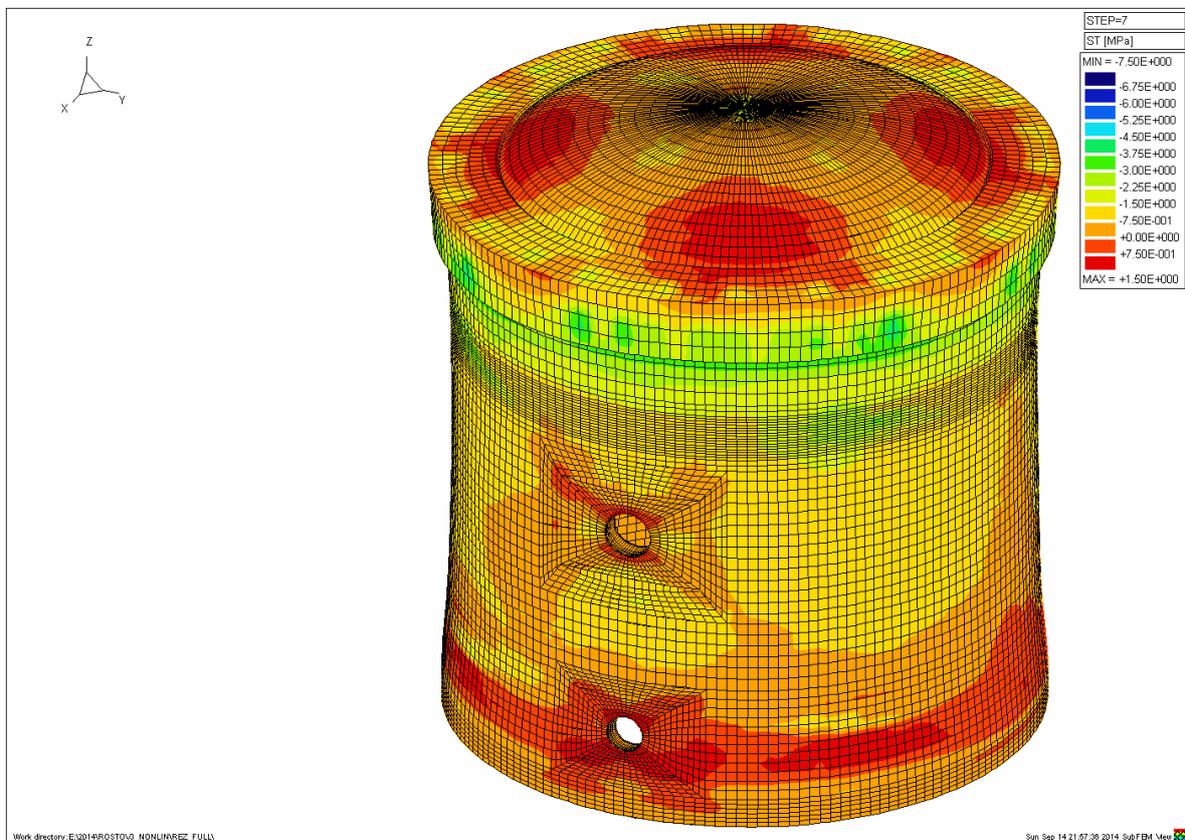


Рисунок 8 – Распределение окружных напряжений [МПа] на внешней поверхности защитной оболочки при воздействии испытательного давления $P = 0,45$ МПа [The distribution of circular stresses on the outer surface of the containment exposed to test pressure $P = 0.45$ MPa]

Выводы

1. Оценка изменения усилий на тяжных анкерах арматурных канатов защитной оболочки 3-го энергоблока Ростовской АЭС от влияния суточных колебаний температур окружающей среды и солнечного излучения показала, что колебания усилий в течение суток могут составлять около 10 тс, наиболее существенный вклад в изменение усилий в армоканатах вносит солнечное излучение

2. В случае необходимости подтяжки или замены армоканатов при длительной эксплуатации СПЗО из-за увеличения контактных напряжений между цапгами и поверхностями в отверстиях анкерного блока потребуется приложить усилие, значительно большее, чем при преднапряжении. Поэтому вопрос о возможности подтяжки армоканатов при длительной эксплуатации должен быть рассмотрен с учетом действия циклической нагрузки.

3. Измерение геометрических параметров защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС геодезическими методами и их анализ в процессе преднапряжения и в период приемо-сдаточных испытаний позволил получить дополнительную информацию о деформировании сооружения и установить характер перераспределения напряжений, главным образом, вблизи опорного кольца.

4. Результаты контроля НДС и геометрических параметров защитной оболочки вблизи узла сопряжения цилиндрической части с куполом показали, что конструкция при подъеме давления работает нелинейно, наибольшее перераспределение напряжений происходит при повышении давления с 0,19 до 0,29 МПа, при этом изменения геометрических параметров в этой зоне защитной оболочки не наблюдаются.

5. Показания датчиков ПСИ-01 в период испытаний напрямую зависят от изменения геометрических параметров сооружения, незначительное увеличение или снижение усилий в армоканатах происходило в зависимости от изменения геометрии защитной оболочки.

6. Подкрановая консоль полярного крана обладает определенной жесткостью, что препятствует перемещению защитной оболочки при преднапряжении. Изменение геометрических параметров при испытаниях защитной оболочки может привести к снижению жесткости, поэтому рихтовку подкрановых путей полярного крана целесообразно проводить только после проведения испытаний защитной оболочки.

7. Проведенный расчетный анализ показал, что полученные расчетные значения перемещений в средней части цилиндра защитной оболочки при ее преднапряжении и в процессе приемо-сдаточных испытаний качественно и количественно соответствуют измеренным.

8. В соответствии с требованием п. 156 НП 010-16, а также учитывая, что в период эксплуатации отдельные датчики КИА теряют работоспособность, в период испытания на герметичность эксплуатируемых защитных оболочек необходимо выполнять геодезический контроль перемещений сооружения, сравнивая результаты измерений с результатами расчета на каждом этапе подъема внутреннего давления. Геодезический контроль перемещений внутренней поверхности защитной оболочки рекомендуется выполнять до начала испытаний и после их проведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев, В. Н.* Натурные наблюдения на этапе строительства защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС / В. Н. Медведев [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 3 (12). С. 89-99.
2. *Скорицова, М. И.* Влияние реологических характеристик бетона на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС / М. И. Скорицова [и др.] // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126, № 6. – С. 317-320.

3. *Пимшин, Ю. И.* Влияние крана кругового действия на техническое состояние строящейся защитной герметичной оболочки АЭС / Ю. И. Пимшин [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016 – № 2 (19). – С. 33-42.
4. *Забазнов, Ю. С.* Геодезическое обеспечение мониторинга технического состояния защитных герметичных оболочек атомных электрических станций (АЭС) в период их строительства, преднапряжения и испытания / Ю. С. Забазнов [и др.] // Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы: материалы международной конференции, Москва, 27-28 мая 2014 г. / МИИГАиК – Москва : МИИГАиК, 2014. – С. 19-23.
5. *Пимшин, Ю. И.* Диагностика технического состояния защитных оболочек АЭС / Ю. И. Пимшин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Геодезия и Аэрофотосъемка. – 2016. – № 4. – С. 55.
6. *Сальников А. А.* Особенности НДС защитных оболочек АЭС на этапе возведения, преднапряжения, приемо-сдаточных испытаний и эксплуатации / А. А. Сальников [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: материалы междунар. науч.-техн. конф. Москва, 23-24 мая 2018 года. – Москва. – 2018. – С. 24-30.
7. *Пимшин, Ю. И.* Оценка напряженно-деформированного состояния защитных герметичных оболочек на примере блоков Ростовской АЭС / Ю.И. Пимшин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Геодезия и Аэрофотосъемка. – 2017. – № 3. – С. 36-42.
8. *Стрижов, В. Ф.* Применение экспертной системы оценки НДС защитных оболочек АЭС на этапе сооружения и эксплуатации / В. Ф. Стрижов [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 25-38.
9. *Скорикова, М. И.* Оценка НДС защитной оболочки энергоблока № 4 Ростовской АЭС в период приемо-сдаточных испытаний / М. И. Скорикова // Сборник трудов XIX научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. – 2018. – С. 155-158.
10. *Медведев, В. Н.* Результаты испытаний защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС / В. Н. Медведев [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2(15). – С. 71-83.
11. *Гайрабеков, И. Г.* Результаты выполненных работ в рамках мониторинга защитных герметичных оболочек строящихся блоков Ростовской АЭС / И. Г. Гайрабеков [и др.] // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – 2014. – № 7-1. – С. 29-30.
12. *Медведев, В. Н.* К вопросу о деградации защитных оболочек АЭС / В. Н. Медведев [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 4(5). – С. 66-73.

REFERENCES

- [1] 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).
- [2] Medvedev V.N., Skorikova M.I. *Vliyaniye reologicheskikh kharakteristik betona na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye zashchitnoy obolochki AES* [Influence of the Rheological Characteristics of Concrete on the Stress-Strain State of Containments of Nuclear Power Plants]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 2019. № 6(126). P. 317-320 (in Russian).
- [3] Pimshin Yu.I., Klyushin E.B., Gubeladze O.A., Medvedev V.N., Burdakov S.M., Zayarov Yu.V. *Vliyanie krana krugovogo 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).
- [4] Zabaznov Yu.S., Pimshin Yu.I., Klyushin E.B. *Geodezicheskoe obespechenie monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya zashchitnykh germetichnykh obolochek atomnykh elektricheskikh stantsiy (AES) v period ikh stroitel'stva, prednapryazheniya i ispytaniya* [Geodetic Support of Monitoring of Technical Condition of Protective Tight Covers of the Nuclear Power Plants (NPP) during their Construction, Pretension and Test]. The collection of articles following the results of scientific and technical conferences. Issue 7 (in two parts). Part 1. Moscow: MIIGAik / annex to the «Geodesy and Aero Photofilming» magazine №6, 2014. P. 19-23 (in Russian).
- [5] Pimshin Yu.I., Klushin E., Medvedev V., Gubeladze O., Naugol'nov V., Zayarov Yu., Zabaznov Yu. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya zashchitnykh obolochek AES* [Checking Technical Condition of Protective Leak-Tight Containment of Nuclear Power Plants]. *Izvestia vuzov «Geodeziya i aerofotos"yemka»* [Geodesy and Aerophotography]. 2016. №4. P. 55-59 (in Russian).

- [6] Salnikov A.A., Medvedev V.N., Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Skorikova M.I. Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zashchitnykh obolochek AES na etape vozvedeniya, prednapryazheniya, priyemo-sdatochnykh ispytaniy i ekspluatatsii [Specifics of the Stress-Strain State of Containments of Nuclear Power Plants at the Stage of Construction, Prestress, Hand-Over Tests and Operation] Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoy energetiki [Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Moscow]. 2018. P. 24-30 (in Russian).
- [7] Pimshin Yu., Medvedev V., Naumenko G., Naugolnov V., Zabaznov Yu. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zashchitnykh germetichnykh obolochek na primere blokov Rostovskoy AES [Assessing the Stress and Strain State of Containments by the Example of Rostov Nuclear Power Plant] Izvestia vuzov «Geodeziya i aerofotos"yemka» [Geodesy and Aerophotography]. 2017. №3. P. 36-42 (in Russian).
- [8] Strizhov V.F., Medvedev V.N., Kiselev Aleksandr S., Kiselev Aleksei S., Ul'yanov A.N., Skorikova M.I. Primeneniye ekspertnoy sistemy otsenki NDS zashchitnykh obolochek AES na etape sooruzheniya i ekspluatatsii [Application of the Expert System for Assessing of the Stress-Strain State of Containments of Nuclear Power Plants at the Stage of Construction and Operation]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. № 1(30). P. 25-38 (in Russian).
- [9] Skorikova, M.I. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zashchitnoy obolochki energobloka № 4 Rostovskoy AES v period priyemo-sdatochnykh ispytaniy [Evaluation of the Stress-Strain State of the Containment of Power Unit No. 4 of the Rostov NPP during the Acceptance Tests] Proceedings of the XIX Scientific School of Young Scientists of the IBRAE RAN. 2018. P. 155-158 (in Russian).
- [10] Medvedev V.N., Kiselev Aleksandr S., Kiselev Aleksey S., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Salnikov A.A. Rezul'taty ispytaniy zashchitnoy obolochki energobloka №3 Rostovskoy AES [Test Results of the Rostov NPP Power Unit №3 Protective Cover]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2015. № 2(15). P. 71-83 (in Russian).
- [11] Gayrabekov, I.G. Pimshin YU.I., Gubeladze O.F., Medvedev V.N. Rezul'taty vpolnennykh rabot v ramkakh monitoringa zashchitnykh germetichnykh obolochek stroyashchikhsya blokov Rostovskoy AES [The Results of the Work Carried out in the Framework of Monitoring the Containments of the Building Blocks of the Rostov NPP] Izvestia vuzov «Geodeziya i aerofotos"yemka» [Geodesy and Aerophotography]. 2014. № 7-1. P. 29-30. (in Russian).
- [12] Medvedev V.N., Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N., Strizhov V.F. K voprosu o degradatsii zashchitnykh obolochek AES [On the Degradation of the Containments of Nuclear Power Plants]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2012. – № 4(5). P. 66-73 (in Russian).

Monitoring of Nuclear Power Plant Containments During the Acceptance Tests

V.N. Medvedev^{*1}, Aleksandr S. Kiselev^{**2}, Aleksei S. Kiselev^{**3}, V.F. Strizhov^{*4},
A.N. Ulyanov^{*5}, M.I. Skorikova^{*6}, Yu.I. Pimshin^{***7}

^{*}Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), Bolshaya Tulskaaya St., 52,
Moscow, Russia 115191

^{**}National Research Center «Kurchatov Institute», Akademika Kurchatova pl., 1, Moscow, 123182, Russia

^{***}Volgodonsk Engineering Technical Institute the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹ORCID iD: 0000-0003-2182-9769

Wos Researcher ID: U-8092-2018

e-mail: cont@ibrae.ac.ru

²ORCID iD: 0000-0002-1405-4080

Wos Researcher ID: U-8140-2018

e-mail: alkis_rrcki@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0002-2450-4495

Wos Researcher ID: U-8820-2018

e-mail: kis-rncki@rambler.ru

⁴ORCID iD: 0000-0003-2244-6612

Wos Researcher ID: V-5004-2018

e-mail: vfs@ibrae.ac.ru

⁵ORCID iD: 0000-0003-4850-4825

WoS Researcher ID: U-8123-2018

e-mail: anumsk661@rambler.ru

⁶ORCID iD: 0000-0002-9090-346X

WoS Researcher ID: U-8075-2018

e-mail: skorikova@ibrae.ac.ru

⁷ORCID iD: 0000-0001-6610-8725

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: YIPimshin@mephi.ru

Abstract – The article presents the results of the study of changes in the stress-strain state and the geometric parameters of the containment shell near the junction of the cylindrical part with the dome and in the area of the crane rail of the polar crane during the acceptance tests.

Key words: containment, displacements, deformations, stresses, forces.