

УДК 624.04.45.001.3

НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ЭТАПЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ЭНЕРГБЛОКА №3 РОСТОВСКОЙ АЭС

© 2014 г. В.Н. Медведев *, Александр С. Киселев *, Алексей С. Киселев *,
А.Н. Ульянов*, В.Ф. Стрижов*, Е.А. Потапов**

* Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, г. Москва
** Ростовская АЭС, г. Волгодонск, Ростовская обл.

В работе рассматриваются особенности напряжённо-деформированного состояния защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС на стадии возведения и преднапряжения.

Ключевые слова: содержание, тяговый трос (арматурный напрягаемый элемент, арматурный пучок (проволок), пучковая арматура), напряжение, усилие (попытки).

Поступила в редакцию 01.07.2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационная пригодность преднапряженных защитных оболочек РО энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в расчетные периоды строительства и эксплуатации определяется, главным образом, напряженно-деформированным состоянием (НДС) строительных конструкций защитной оболочки и уровнем их преднапряжения.

В соответствии с действующей нормативной документацией контроль НДС защитной оболочки необходимо проводить с момента начала возведения сооружения [Л. 1]. Для этого используется проектная информационно-измерительная система защитной оболочки, включающая: преобразователи силы арматуры струнные (ПСАС), преобразователи линейных деформаций струнные (ПЛДС), преобразователи температуры струнные (ПТС), преобразователи линейных перемещений струнные (ПЛПС). Кроме того, установлены датчики силы ПСИ-01, предназначенные для измерения усилий на тяжных концах арматурных канатов.

В рамках данной работы рассматриваются особенности напряжённо-деформированного состояния защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС на стадии возведения и преднапряжения.

1. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА СТАДИИ ВОЗВЕДЕНИЯ

Ниже приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния защитной оболочки 3-го энергоблока Ростовской АЭС на стадии возведения, включая период бетонирования.

1.1 НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ В ПЕРИОД БЕТОНИРОВАНИЯ

Изменения напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне в период бетонирования обусловлены:

- экзотермией бетона, возникающей после бетонирования;
- колебаниями температуры окружающей среды;
- деформациями усадки бетона.

Оценка НДС защитной оболочки приводится по показаниям датчиков, установленных в защитной оболочке 3-го энергоблока Ростовской АЭС, представленных в виде графиков изменения напряжений в стержневой арматуре, деформаций в бетоне и температуры в зависимости от времени. Для оценки логичности работы датчиков типа ПСАС и ПЛДС использовались показания датчиков температуры, работа которых за период наблюдения показала достаточно стабильные показания.

Оценка логичности работы датчиков типа ПТС выполнялась по очевидным критериям. Во-первых, фиксировался подъем температуры в бетоне от его экзотермии до 55°C и затем снижение до 25-30°C в летний период, подъем температуры до 28°C и последующее снижение до 5°C в зимний период. Во вторых, происходит отслеживание климатических температурных колебаний, что также свидетельствует о работоспособности датчиков типа ПТС.

Например, на представленных на рисунках 1–2 графиках хорошо прослеживается изменение температуры от экзотермии бетона, в первые сутки после бетонирования температура поднимается до 56°C и затем снижается до 25°C в течение 2,5 суток. Напряжения в меридиональной арматуре при этом меняются незначительно. В тоже время в кольцевой арматуре напряжения возрастают до -40 МПа в течение первых суток и затем снижаются до -20 МПа, что связано со стеснением деформаций кольцевого направления при повышении температуры в стенке защитной оболочки.

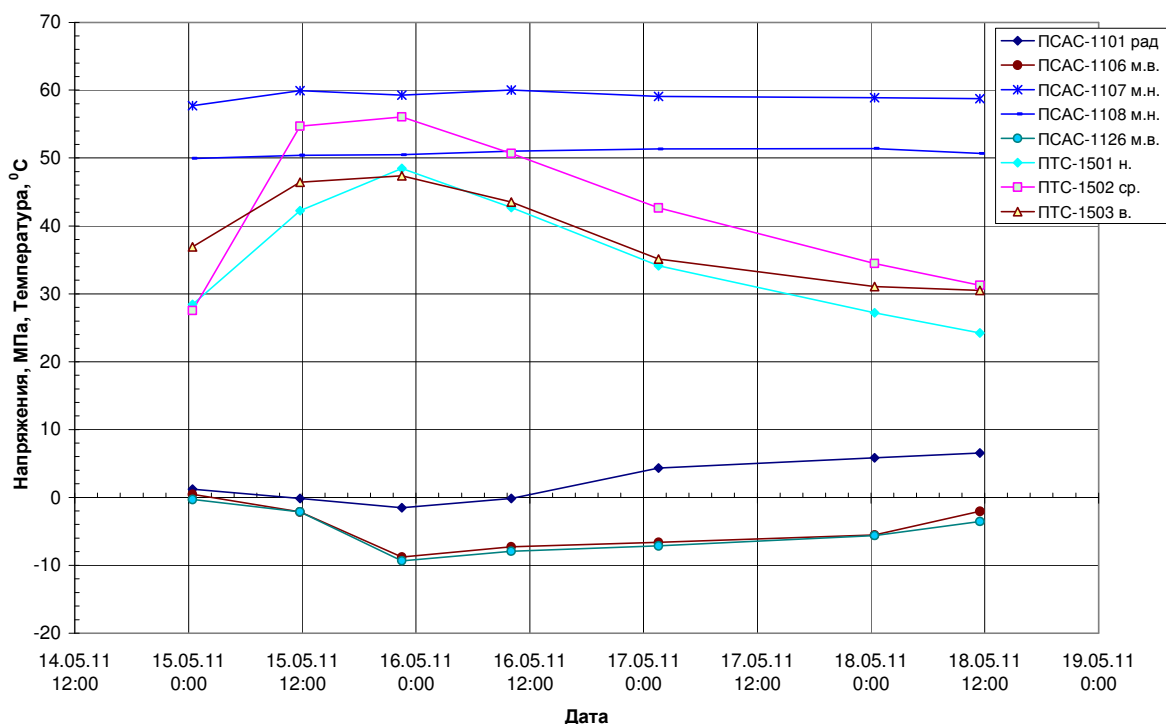


Рис. 1. – Измерение напряжений в меридиональной стержневой арматуре и температуры в бетоне с момента окончания бетонирования захватки оболочки (15.05.2011) по 18.05.2011, 3-й блок РоАЭС, створ №1, отметка 13,2 м

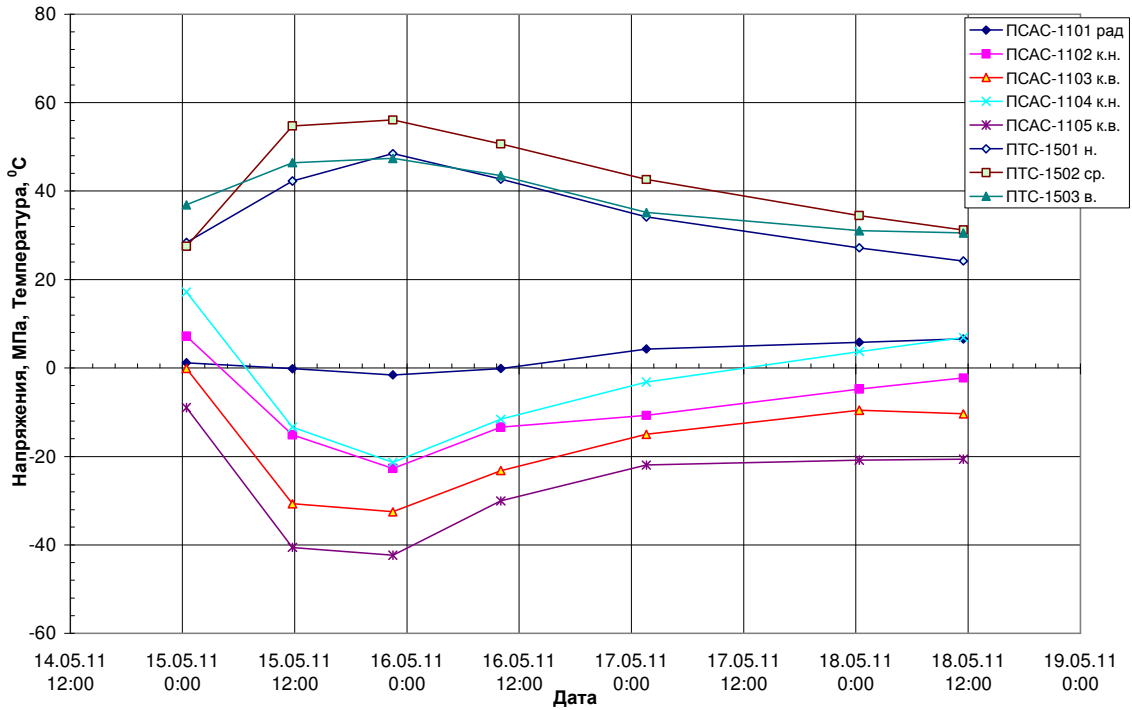


Рис. 2. – Измерение напряжений в кольцевой стержневой арматуре и температуры в бетоне с момента окончания бетонирования захватки оболочки (15.05.2011) по 18.05.2011, 3-й блок РоАЭС, створ №1, отметка 13,2 м

Аналогичный характер наблюдается и при измерении деформаций в бетоне: в меридиональном направлении деформации изменяются незначительно, а в кольцевом направлении увеличение сжимающих деформаций составляет порядка $-125 \cdot 10^{-6}$ (см. рисунок 3).

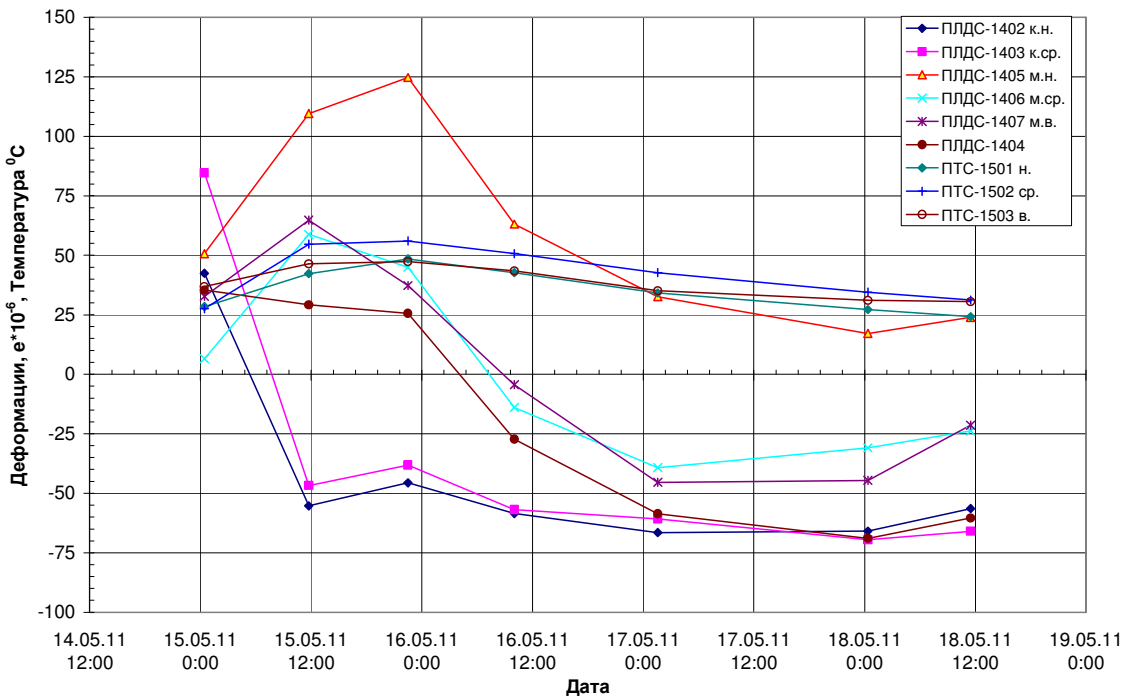


Рис. 3. – Измерения деформаций и температуры в бетоне с момента окончания бетонирования захватки оболочки (15.05.2011) по 18.05.2011, 3-й блок РоАЭС, створ №1, отметка 13,2 м. Показания конуса учтены

Таким образом, результаты измерений показывают, что экзотермия бетона по-разному влияет на деформации и напряжения в кольцевом и меридиональном направлениях. Так, из-за стесненных условий работы оболочки в кольцевом направлении возникают деформации сжатия в бетоне и сжимающие напряжения в стержневой арматуре. В меридиональном направлении от экзотермии сжатие не значительно или вообще отсутствует. Через несколько суток (от 3 до 5) температура в бетоне снижается, и показания датчиков становятся близкими к значениям, действующим перед бетонированием.

1.2 НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ПОСЛЕ БЕТОНИРОВАНИЯ ДО НАЧАЛА ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ СООРУЖЕНИЯ

В данном разделе приводятся показания датчиков, установленных в защитной оболочке 3-го энергоблока Ростовской АЭС, в виде графиков изменения напряжений в стержневой арматуре, деформаций в бетоне и температуры в зависимости от времени. При этом рассматривается работа приборов с момента окончания бетонирования каждой захватки в местах установки датчиков и по 10.09.2013 г.

Следует отметить, что на показания датчиков КИА в этот период времени оказывают влияние следующие три фактора:

- деформации усадки бетона;
- собственный вес вышележащих конструкций;
- колебания температуры окружающей среды.

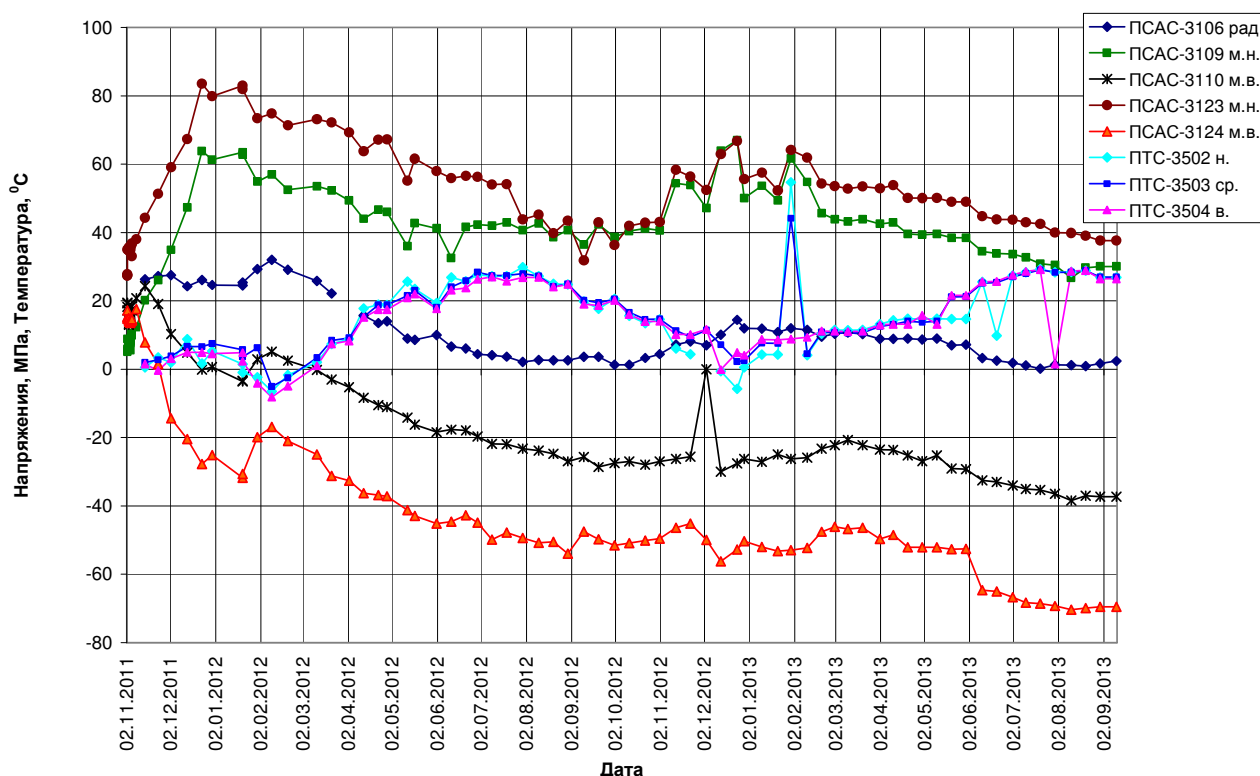


Рис. 4 – Измерение напряжений в меридиональной стержневой арматуре и температуры в бетоне с момента окончания бетонирования захватки оболочки (02.11.2011) по 10.09.2013, 3-й блок РоАЭС, створ №3, отметка 32,6 м.

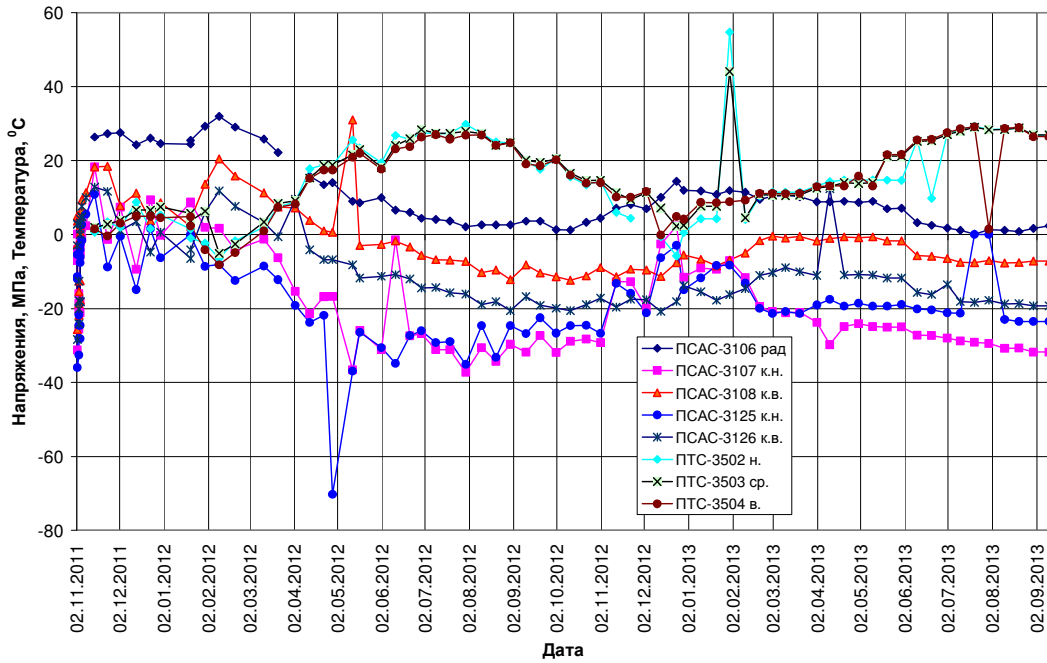


Рис. 5. – Измерение напряжений в кольцевой стержневой арматуре и температуры в бетоне с момента окончания бетонирования захватки оболочки (02.11.2011) по 10.09.2013, 3-й блок РоАЭС, створ №3, отметка 32,6 м

Собственный вес вышележащих конструкций наряду с деформациями усадки бетона приводит к увеличению сжатия в оболочке. При этом влияние собственного веса сказывается, главным образом, на меридиональных деформациях и напряжениях, в кольцевом направлении влияние собственного веса минимально.

На рисунке 6 распределения компонентов напряжений от воздействия собственного веса представлены в виде эпюр меридиональных (SM) и окружных (ST) напряжений [МПа] в вертикальном сечении защитной оболочки. Значения компонентов напряжений на наружной поверхности соответствуют напряжениям в бетоне, а на внутренней поверхности – напряжениям в металлической облицовке.

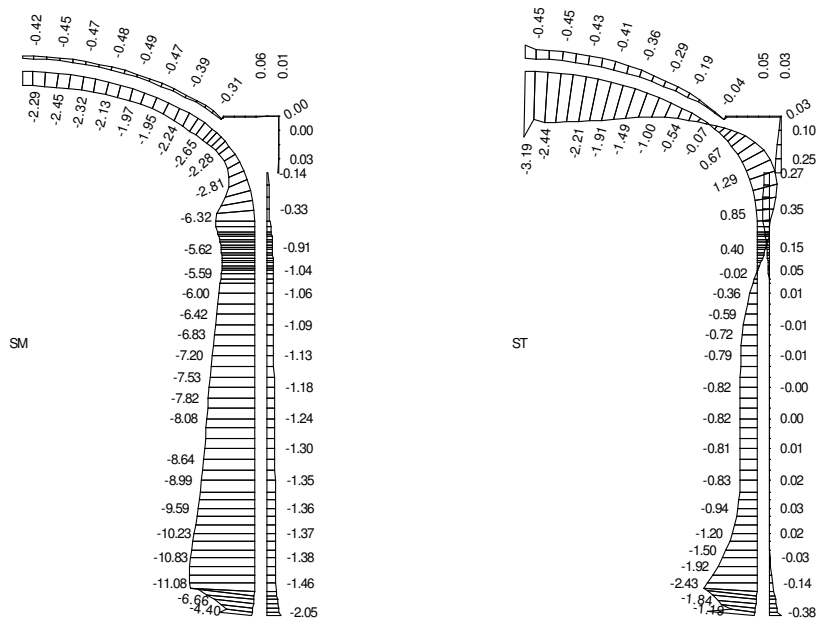


Рис. 6. – Эпюры меридиональных (SM) и окружных (ST) напряжений [МПа] в сечении Fi= 2000 (створ 3) защитной оболочки 3 блока Ростовской АЭС от воздействия собственного веса

2 НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ЭТАПЕ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ

На рисунках 7-8 приведены приращения напряжений в стержневой арматуре (ПСАС) и температуры в бетоне (ПТС) при преднапряжении защитной оболочки с 10.09.2013 по 19.12.2013 г., на которых можно видеть, что показания каждой пары датчиков у наружной и внутренней поверхности хорошо согласуются между собой и показывают стабильные результаты.

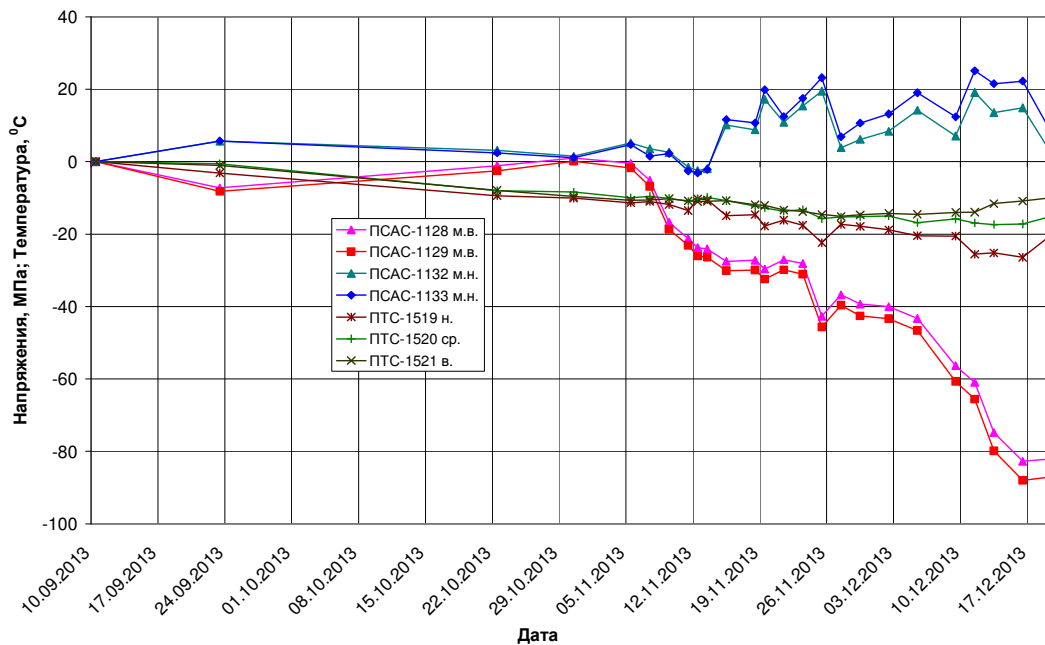


Рис. 7. – Приращение напряжений в меридиональной стержневой арматуре и температуры в бетоне при преднапряжении защитной оболочки с 10.09.2013 по 19.12.2013, 3-й блок РоАЭС, створ №1, купол, R=19 м

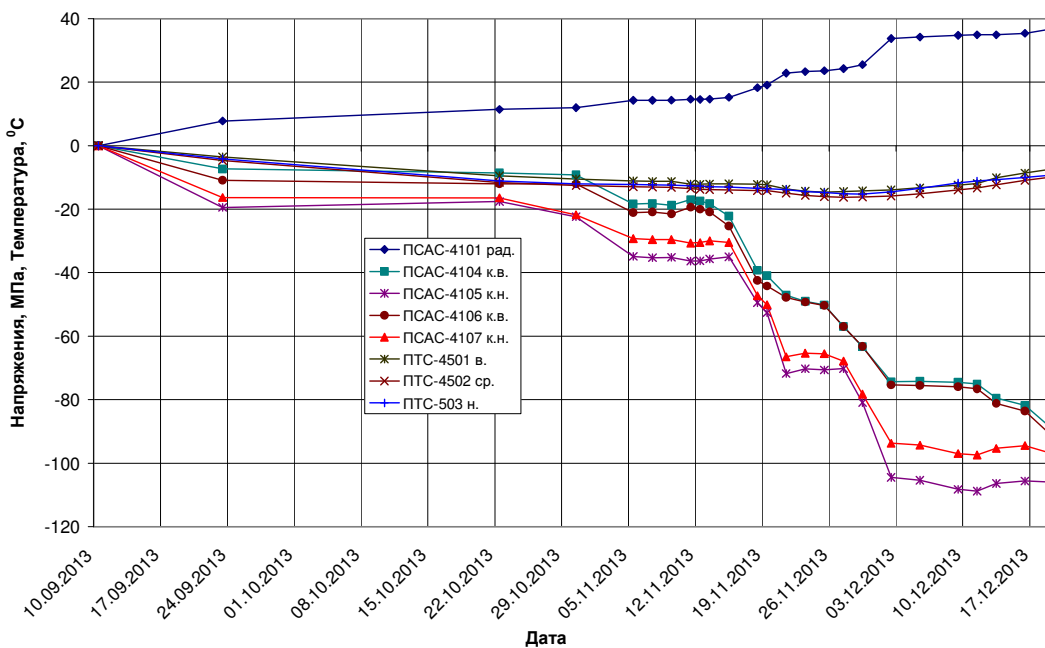


Рис. 8. – Приращение напряжений в кольцевой стержневой арматуре и температуры в бетоне при преднапряжении защитной оболочки с 10.09.2013 по 19.12.2013, 3-й блок РоАЭС, створ №4, отметка 32,6 м

Анализ приведенных данных показывает, что полученные расчетные значения параметров напряженно-деформированного состояния ЗО 3-го блока РоАЭС при ее преднапряжении качественно соответствуют измеренным (см. таблицу № 1). Количественно в целом по всем проанализированным сечениям соответствие результатов расчета и измеренных значений напряжений в ненапрягаемой арматуре можно считать удовлетворительным. Погрешность расчета составляет в среднем от 5 до 15%.

Таблица 1. – Сравнение расчетных и измеренных напряжений в стержневой арматуре от преднапряжения в цилиндре защитной оболочки с учетом измерения температуры в бетоне, 3-й блок РоАЭС, створ №4, отметка 32,6 м

Тип датчика	Показания перед обжатием, 10.09.13	Показания после натяжения всех а/к, 19.12.13	Приращение от всех а/к, МПа (3-2)	Расчетные значения от натяжения всех а/к	Расчетные значения с учетом температуры
1	2	3	4	5	6
ПСАС-4101 рад.	12,23	49,08	36,85		
ПСАС-4102 м.в.	-51,17	-92,34	-41,17	-36,457	-40,052
ПСАС-4103 м.н.	11,75	-20,91	-32,66	-34,514	-31,772
ПСАС-4104 к.в.	-25,08	-114,66	-89,58	-106,400	-109,422
ПСАС-4105 к.н.	-24,81	-130,84	-106,04	-97,434	-93,79
ПСАС-4106 к.в.	5,15	-86,72	-91,87	-106,400	-109,422
ПСАС-4107 к.н.	-30,73	-127,82	-97,09	-97,434	-93,79
ПСАС-4108 м.в.	-80,21	-118,13	-37,92	-36,457	-40,052
ПСАС-4109 м.н.	43,43	15,83	-27,60	-34,514	-31,772
ПТС-4501 в.	28,85	21,51	-7,34		
ПТС-4502 ср.	30,62	20,81	-9,81		
ПТС-4503 н.	12,23	49,08	36,85		

Для измерения перемещений защитной оболочки от воздействия предварительного напряжения арматурных канатов и деформаций ползучести железобетона в средней части цилиндра защитной оболочки, на отметке 36,9 м установлено 12 датчиков типа ПЛПС (преобразователей линейных перемещений струнных). Датчики типа ПЛПС устанавливаются группами по 3 шт. в каждом из 4 створов.

Результаты измерений показали, что все 12 датчиков ПЛПС находятся в работоспособном состоянии, о чем свидетельствует хорошая сходимость получаемых результатов измерений в каждом из 4 створов с расчетными данными (см. таблицу №2).

Таблица 2. – Сравнение расчетных и экспериментальных значений радиальных перемещений ЗО 3-го блока Ростовской АЭС на отметке 36,9 м после натяжения всех канатов СПЗО

Створ	Расчетные перемещения, мм	Измеренные перемещения, мм	Δ между расчетом и измерениями, мм
I	-10,4	-10,9	0,5 (4,6%)
II	-8,7	-9,3	0,6 (6,4%)
III	-12,7	-14,0	1,3 (9,1%)
IV	-12,1	-13,2	1,1 (8,3%)

Максимальная погрешность расчета в результате уточнений расчетной модели уменьшилась по сравнению с результатами, полученными на предыдущем этапе работы, по радиальным перемещениям на отметке 36 м по высоте 30 имеет место в III створе и составляет 9,1%. В абсолютных значениях это соответствует 1,3 мм. Соответствие измеренных и рассчитанных перемещений можно считать удовлетворительным. Погрешность расчета может быть связана с рядом факторов, связанных с нелинейным характером деформирования бетона в отдельных наиболее нагруженных зонах, а также с температурными условиями деформирования, которые могут быть учтены в расчете лишь приближенно.

Сопоставление результатов расчета с данными радиальных перемещений в средней части цилиндра оболочки показало достаточно хорошее согласование, что также свидетельствует об обеспечении проектного уровня обжатия защитной оболочки.

3 ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ ПО ПРЕДНАПРЯЖЕНИЮ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ

При производстве работ по преднапряжению защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС были приняты меры по совершенствованию технологии натяжения армоканатов с учетом результатов выполнения аналогичных работ на энергоблоке № 5 Нововоронежской АЭС энергоблоке № 4 Калининской АЭС [Л. 2-3]. Принимая во внимание достаточно большой разброс потерь усилий при выполнении анкеровки пучков на Калининской АЭС, на этот процесс обратили особое внимание. Учитывая достаточно большое количество датчиков ПСИ-01, установленных на оболочке энергоблока № 3 Ростовской АЭС, появилась возможность не только контролировать усилие на тяжном конце пучка при анкеровке, но также оценивать время стабилизации усилия по длине пучка после его заанкеривания.

Проектная величина усилий в арматурных канатах при преднапряжении (на домкрате) составляет 9,0 МН (918 тс), с учетом потерь преднапряжения на анкерном устройстве усилия в армоканатах по проекту составляют: 8,7 МН (887,15 тс) – в цилиндрической части оболочки; 8,58 МН (874,92 тс) – в купольной части оболочки.

По установленной разработчиком технологии натяжения армоканатов рекомендуется поднять давление в домкрате до проектного уровня (465 бар) и ожидать 5 минут. Период ожидания в 5 минут, по мнению разработчика, необходим для преодоления прочности на сдвиг смазки в канате в оболочке из ПЭВП.

Результаты работ с использованием установленной разработчиком технологии натяжения армоканатов показали, что после преднапряжения первых девяти армоканатов в цилиндре оболочки усилия на анкере в среднем составляли 849,27 тс, что на 4,3% ниже проектных значений.

Средние значения потерь усилий в канатах на анкеровку составляют 79,4 тс или 8,55%. Максимальные потери в армоканате № 87Б – 102,68 тс или 11,05%, минимальные потери в армоканате № 73А – 56,5 тс или 6,09%.

В этой связи для достижения проектного уровня натяжения армоканатов было предложено увеличить время выдержки усилия на домкрате перед передачей нагрузки с домкрата на анкер с 5 до 15 минут. Полученные результаты показывают, перед передачей нагрузки на анкерный блок усилия на домкрате имели переменчивый характер, а усилия на анкере незначительно возросли (см. рисунок № 9).

После этого было предложено во время выдержки (15 минут) каждые 5 минут давление поднимать до проектного.

Анализ результатов преднапряжения, выполненных с учетом вышесказанного, показал, что вначале давление быстро упало на 15 бар, после повторной подтяжки

давление упало на 6 бар, а на третьем этапе – на 2 бара. При этом перед передачей нагрузки с домкрата на анкер усилия имели большую величину и более стабильный характер, что важно для определения распределения усилий по длине каждого армоканата. На анкере усилия приблизились к проектной величине (см. рисунок № 10).

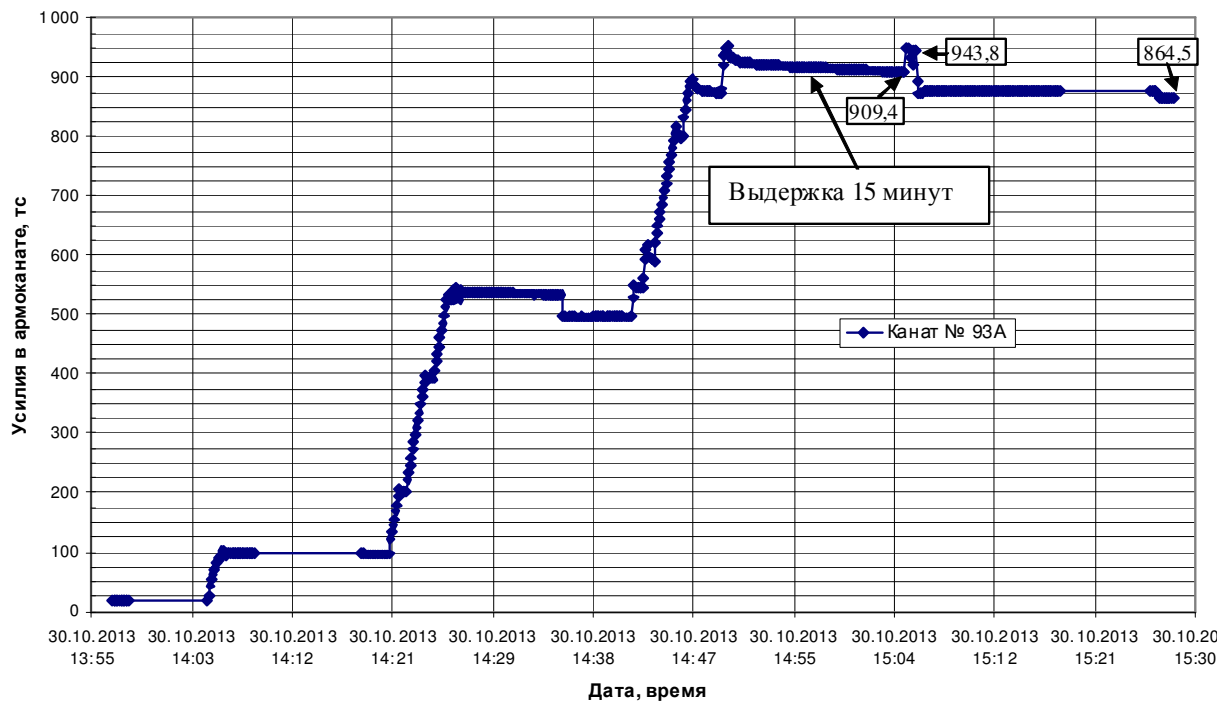


Рис. 9. – График натяжения армоканата № 93А, расположенного в защитной оболочке энергоблока № 3 Ростовской АЭС. Выдержка 15 минут

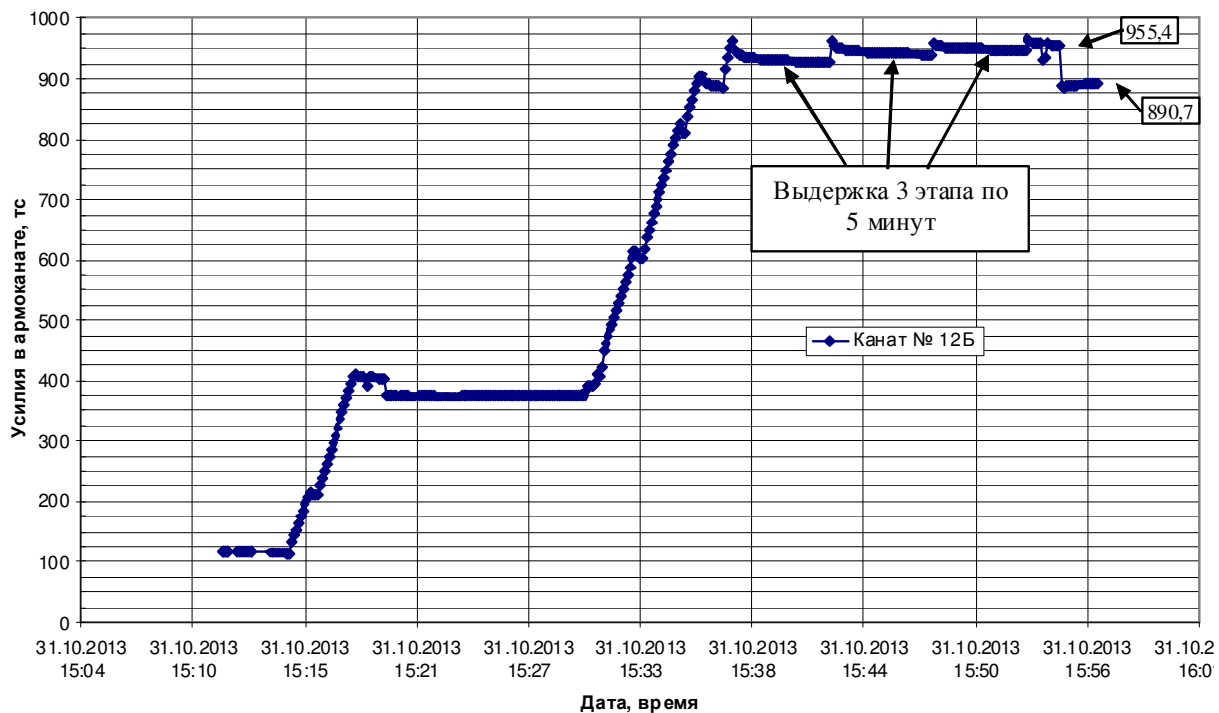


Рис. 10. – График натяжения армоканата № 12Б, расположенного в защитной оболочке энергоблока № 3 Ростовской АЭС. Выдержка 3 этапа по 5 минут

На основании полученных измерений ИБРАЭ РАН было сделано предложение по изменению технологии натяжения армоканатов системы преднапряжения защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС: на последнем этапе натяжения армоканата после достижения проектного давления P_a (465 бар) выдерживать нагрузку в течение 15 минут, при этом через каждые пять минут поднимать давление до P_a (465 бар).

После того, как Ростовской АЭС были согласованы изменения в технологии, преднапряжение армоканатов выполнялось с учетом рекомендаций ИБРАЭ РАН.

В результате в армоканатах цилиндра защитной оболочки средние усилия после передачи нагрузки с домкрата на анкер составляет 878,67 тс. В армоканатах купола защитной оболочки средние усилия после передачи нагрузки с домкрата на анкер составляет 879,59 тс.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что усовершенствованная технология натяжения армоканатов позволила обеспечить проектный уровень преднапряжения защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС.

ВЫВОДЫ

1) Проведение натуральных наблюдений на этапе строительства защитной оболочки позволило проследить особенности работы контрольно-измерительной аппаратуры в процессе возведения и получить исходные данные для уточняющего расчета НДС сооружения перед проведением приемо-сдаточных испытаний.

2) Анализ работы датчиков КИА на этапе бетонирования, показал увеличение температуры бетона от экзотермии до 25-30 °С. Напряжения в меридиональной арматуре при этом меняются незначительно. В тоже время в кольцевой арматуре напряжения возрастают до -40 МПа в течение первых суток и затем снижаются до -20 МПа, что связано со стеснением деформаций кольцевого направления при повышении температуры в стенке защитной оболочки.

3) Проведение натуральных наблюдений в процессе выполнения предварительного напряжения защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС позволило своевременно откорректировать и согласовать технологию выполнения работ, в результате чего был достигнут проектный уровень преднапряжения.

4) Предложенная ИБРАЭ РАН технология натяжения канатов может быть использована при замене армоканатов СПЗО на действующих блоках АЭС, а также при преднапряжении защитных оболочек АЭС нового поколения (АЭС 2006).

5) Натурные измерения усилий в армоканатах и напряженно-деформированного состояния защитной оболочки в процессе выполнения и после окончания предварительного напряжения, показали достаточно хорошее согласование с результатами выполненных впоследствии расчетов, что позволяет утверждать о готовности защитной оболочки к проведению предпусковых испытаний внутренним давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД ЭО 1.1.2.99.0007-2011. Типовая инструкция по эксплуатации производственных зданий и сооружений атомных станций [Текст]. – М., 2011.
2. *Медведев, В.Н. и др.*. Сравнительный анализ систем предварительного напряжения защитных оболочек АЭС [Текст] / В.Н. Медведев, А.Н. Ульянов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – Спецвыпуск. – С. 99–105.
3. *Медведев, В.Н. и др.* О применении модернизированной системы преднапряжения СПЗО-М на защитных оболочках АЭС [Текст] / В.Н. Медведев, А.Н. Ульянов, Александр С. Киселев, Алексей С. Киселев, В.Ф. Стрижов // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – №2–3(4). – С. 20–26.

Full-scale Observations During Containment Erection of Rostov NPP Unit №3

V.N. Medvedev *, Aleksander S. Kiselev **, Aleksey S. Kiselev **, A.N.
Ul'yanov *, V.F. Strizhov ***, E.A. Potapov ****

*Nuclear Safety Institute (IBRAE), Moscow,
Rostov NPP, Volgodonsk, Rostov region*

* e-mail: cont@ibrae.ac.ru; ** e-mail: kis-rncki@rambler.ru; *** e-mail: vfs@ibrae.ac.ru;

**** e-mail: tn17046@yandex.ru

Abstract – The paper focuses on the features of the Rostov NPP Unit 3 containment stress-strain state during its erection and prestressing.

Keywords: containment, tendon, concrete, tension, efforts.

REFERENCES

- [1] RD JeO 1.1.2.99.0007-2011. Tipovaja instrukcija po jekspluatacii proizvodstvennyh zdaniy i sooruzhenij atomnyh stancij [RD EO 1.1.2.99.0007-2011. Standard maintenance instruction of production buildings and constructions of nuclear power plants]. M., 2011. (in Russian)
- [2] Medvedev V.N., Ul'janov A.N. Sravnitel'nyj analiz sistem predvaritel'nogo naprjazhenija zashhitnyh obolochek AJeS [Comparative analysis of preliminary tension systems of protective covers of the NPP]. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij [News of higher educational institutions]. Severo-Kavkazskij region [North Caucasus region]. Tehnicheskie nauki [Technical science]. 2008, Specvypusk [Special issue], ISSN 0321-2653, pp. 99–105. (in Russian)
- [3] Medvedev V.N., Ul'janov A.N., Kiselev Aleksandr S., Kiselev Aleksey S., Strizhov V.F. O primenenii modernizirovannoj sistemy prednaprjazhenija SPZO-M na zashhitnyh obolochkah AJeS [About use of the modernized system of SPZO-M pretension on the NPP protective covers]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2012, №2–3(4), ISSN 2305-414X, pp. 20–26. (in Russian)