
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 528.048

**КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНОЙ
ОБОЛОЧКИ АЭС ПРИ ПРЕДНАПРЯЖНИИ, ИСПЫТАНИИ И
ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

© 2017 Ю.И. Пимшин*, Г.А. Науменко**, С.М. Бурдаков*, Ю.С. Забазнов*

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

** *Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия*

В работе рассмотрена теория оценки технического состояния защитной герметичной оболочки (ЗГО) и опыт применения мобильной геодезической диагностической системы на энергоблоке №4 Ростовской атомной электрической станции (РоАЭС). Изучены результаты штатной встроенной системы, предназначенной для определения и оценки напряженно деформированного состояния защитных герметичных оболочек в период приёма-сдачи и эксплуатации, и выполнено сравнение с результатами геодезической системы, полученными на тех же этапах существования ЗГО.

Ключевые слова: защитная герметичная оболочка, техническое состояние, преднапряжение, испытание, контроль, мобильная геодезическая диагностическая система, оценка напряженно деформированного состояния.

Поступила в редакцию: 11.12.2017

В 2016 году введено в действие НП-010-16 «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций», где указано, что [4]:

«...Проверка ЛСБ и их элементов на соответствие проектным характеристикам должна обеспечиваться путем проведения следующих видов испытаний:

...

– *испытание на прочность...»*

«...Испытания ГО на прочность проводятся избыточным давлением, а также разрежением *один раз за весь срок службы* блока АС при подготовке к вводу блока АС в эксплуатацию...»

«...При испытаниях ГО на прочность необходимо:

– *экспериментально определять динамику изменения параметров напряженно-деформированного состояния в контрольных точках, установленных в проекте АС;*
– *сопоставлять данные испытаний с расчетными и (или) предельно допустимыми значениями, установленными в проекте АС...»*

«...В процессе испытания ГО на прочность должны регистрироваться следующие параметры:

– данные визуального осмотра наружных поверхностей ГО, доступных для осмотра;

– *параметры напряженно-деформированного состояния ГО в контрольных точках;*

– температура элементов ГО;

– усилия в арматурных канатах системы преднапряжения защитной оболочки,

на которых установлены датчики контроля усилия натяжения;

- параметры среды в объеме зоны локализации аварии;
- температура окружающей среды вне ГО;
- данные геодезического контроля перемещений элементов ГО.

Эти параметры (за исключением температуры окружающей среды) следует измерять в контрольных точках ГО, которые должны быть указаны в проекте АС и программе испытаний...»

Резюмируя данную выдержку, отметим то, что параллельно с результатами встроенной системы датчиков в процессе испытаний оболочки требуется получение перемещений контрольных точек, которые должны быть указаны в проекте АС и в программе испытаний, и сравнивать величины полученных перемещений с расчетными или предельно допустимыми значениями, установленными в проекте АС. В современных реализуемых проектах АС информация по размещению контрольных точек и по их расчетным перемещениям или проектным предельно допустимым значениям отсутствует. Поскольку данные проекты разработаны, прошли экспертизу до введение в действие НП-010-16. Однако требования, изложенные в «Нормах и правилах» не могут не реализовываться на строящихся АС. В соответствии с этим коллективом авторов разработана, реализована и предлагается следующая методика решения данной задачи.

Контролируемые точки располагают непосредственно на поверхности защитной оболочки, при этом, на цилиндрической части размещают в безмоментных зонах на строительных осях оболочки и приурочивая их положение к зонам размещения блоков датчиков встроенной системы [1-7]. На купольной части располагают на четвертных осях, размещают так же в безмоментных зонах, и приурочивая их положение к зонам размещения блоков датчиков встроенной системы (см. рис. 1, рис. 2.)

При поэтапном контроле внешних геометрических параметров гермооболочки положение контролируемых точек, расположенных на цилиндрической части на вертикальных сечениях, определяют методом пространственной полярной засечки, электронными тахеометрами, имеющие следующие параметры точности измерения вертикальных и горизонтальных углов 1" и дальности 0.5 мм. Положение контролируемых точек, расположенных на купольной части защитной оболочки, определяли методом геометрического нивелирования, с точностью не менее 0.5 мм.

Положение контрольных точек определяют на этапах [8-15]:

- до преднапряжения;
- по окончанию полной программы обжатия;
- непосредственно перед испытанием;
- по полкам довления 0.7, 2.0, 3.0, 4.0, 4.6, 4.0, 0.7, 0.

По результатам измеренных значений перемещений $\Delta R_{пред}$, полученных на этапе после реализации полной программы обжатия, вычисляют расчетные предельно допустимые значения перемещений контрольных точек оболочки при ее испытании. При этом первоначально вычислили значение перемещений для полки набора давления 4.6 атм. Для этого согласно СП 52-102-2004.

$$1.5 \leq \frac{\Delta R_{пред}}{\Delta R_{исп}^*},$$

где $\Delta R_{исп}^*$ – расчетное значение перемещения контрольной точки при наборе давления 4.6 атм.

$$\text{Или } \Delta R_{исп(4.6)}^* \leq 0,667 \cdot \Delta R_{пред}.$$

Далее для всех остальных полок давления получают расчетные значения перемещений путем линейного интерполирования:

$$\Delta R^*_{исп(x_i)} \leq \Delta R^*_{исп(4.6)} \cdot \frac{x_i}{4.6},$$

где x_i – значение давления на соответствующих полках при испытании.

Данная методика была использована при преднапряжении и испытании оболочки четвертого энергоблока Ростовской АЭС. В результате проведения геодезических работ, выполненных при формировании геодезического обоснования и при обжатии оболочки, получили следующие результаты.

Контроль геометрических параметров цилиндрической части был осуществлен путем поцикловых измерений контрольных расстояний между точками геодезического обоснования и контролируемыми точками, расположенными на поверхности защитной оболочки (см. рис. 1).

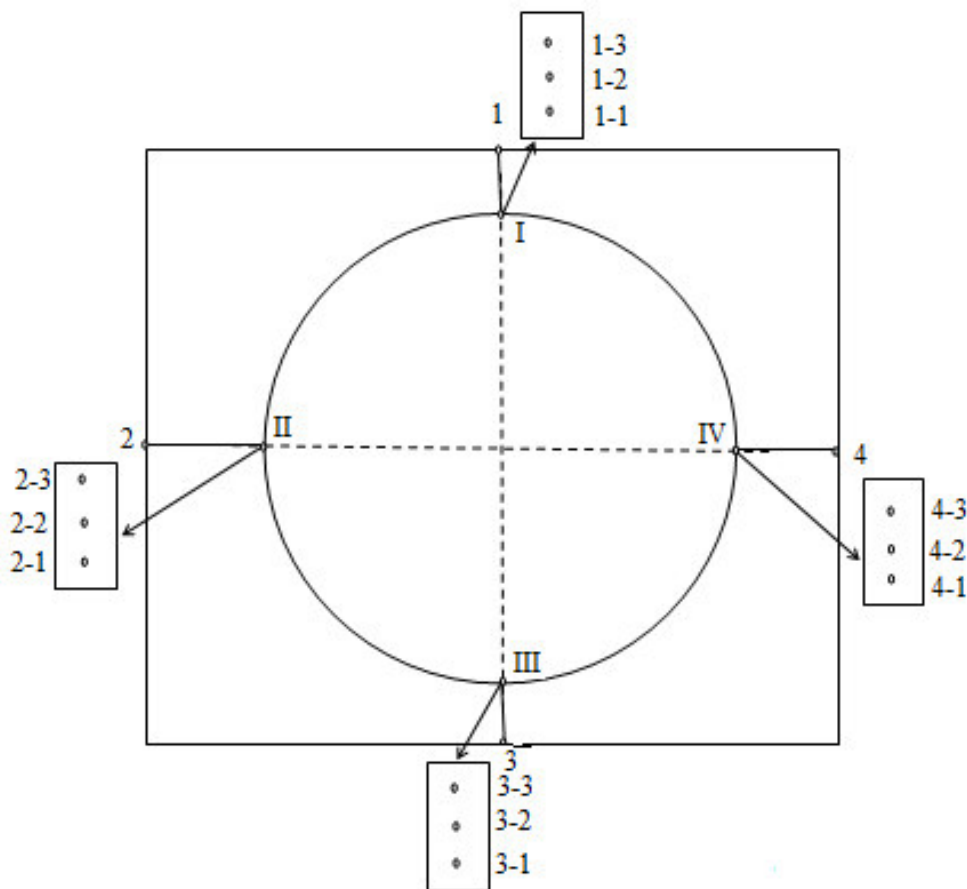


Рис. 1. – Схема контроля деформаций цилиндрической части при обжатии оболочки
[Scheme of cylindrical part deformation monitoring during shell compression]

Результаты работ приведены в табл. 1.

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поциклового нивелирования контролируемых точек, расположенных на поверхности защитной оболочки (см. рис. 2). Результаты работ приведены в таблице 3.

Примечание:

– 16.06.2016, 28.06.2016 г. – были выполнены два цикла измерений до преднапряжения;

– 27.04.2017 – был выполнен цикл измерений после выполнения полной

программы натяжения канатов.

Непосредственно после завершения полной программы обжатия оболочки (апрель 2017 г.) в ее цилиндрической части на горизонте 47.0 – 50.0 м были зарегистрированы перемещения, направленные на уменьшение радиуса горизонтального сечения, соответствующие величинам порядка -12.6 мм в координатной плоскости осей 3-1 и -14.92 в координатной плоскости осей 4-2.

Таблица 1. – Значения перемещений точек, расположенных на внешней поверхности цилиндра защитной оболочки [Values of point displacements located on the outer surface of the containment cylinder]

№ п/п	Δ_1	Δ_2	$\Delta_1 - \Delta_2$	$(\Delta_1 + \Delta_2)/2$	Δ_3	$\Delta_{\text{Ср.}} - \Delta_3$	Среднее по осям м
	16.06.2016	28.06.2016	16.06-28.06	$\Delta_{\text{Ср.}}$	27.04.2017	$\Delta_{\text{преднапряж.}}$	
Ось-3							оси 3-1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,305402	0,30346	0,001942	0,304431	0,314982	-0,01055	-0,01088
2	0,276165	0,273846	0,00232	0,275006	0,286183	-0,01118	-0,01255
3	0,266165	0,26273	0,003435	0,264448	0,27598	-0,01153	-0,01438
						Ср.	-0,0126
Ось-4							оси 4-2
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,320403	0,321081	-0,00068	0,320742	0,34016	-0,01942	-0,01558
2	0,310294	0,30916	0,001134	0,309727	0,329304	-0,01958	-0,01475
3	0,30595	0,305329	0,000621	0,305639	0,326907	-0,02127	-0,01443
						Ср.	-0,01492
Ось-1							
0	0	0	0	0	0	0	
1	0,28736	0,285967	0,001392	0,286663	0,332872	-0,01121	
2	0,292746	0,289866	0,00288	0,291306	0,340224	-0,01392	
3	0,277634	0,27383	0,003804	0,275732	0,327967	-0,01723	
Ось-2							
0	0	0	0	0	0	0	
1	0,353886	0,354026	-0,00014	0,353956	0,365702	-0,01175	
2	0,340498	0,339632	0,000866	0,340065	0,349986	-0,00992	
3	0,329837	0,329524	0,000314	0,32968	0,337272	-0,00759	

По этим перемещениям вычислены значения ожидаемых перемещений для программы испытаний этой оболочки (см. табл. 2).

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поциклового нивелирования контролируемых точек, расположенных на поверхности защитной оболочки (см. рис. 2). Результаты работ приведены в табл. 3.

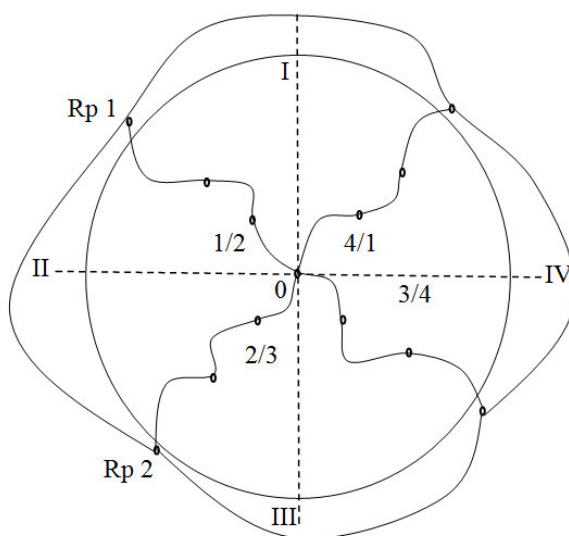
Непосредственно после завершения полной программы обжатия оболочки (апрель 2017 г.) в ее купольной части были зарегистрированы перемещения, направленные на уменьшение отметок центра –19.3 мм.

При испытании гермооболочки контроль геометрических параметров цилиндрической части был осуществлен путем поциклового измерения перемещений контрольных точек, на соответствующих полах давления, создаваемого внутри оболочки. Результаты работ приведены в таблице 4.

Таблица 2. – Расчетные величины перемещений для этапа испытаний [Estimated values of displacements for the test stage]

№ осей	$\Delta_{преднапряж.}$	Расчетные $\Delta_{испытание}$ при давлении				
		4,6	0,7	2,0	3,0	4,0
оси 3;1						
	-0,0126*	0,0084	0,00128	0,00365	0,00548	0,00731
оси 4;2						
	-0,01492*	0,00995	0,00151	0,00432	0,00649	0,00865
Ср. по столбцу	-0,01376	0,009175	0,001395	0,003985	0,005985	0,00798

* – фактические величины перемещений, полученные после этапа преднапряжения.

**Рис. 2.** – Схема нивелирования купольной части при обжатии оболочки [Scheme of dome part leveling when compressing the shell]**Таблица 3.** – Результаты нивелирования купола защитной оболочки и расчетные величины перемещений для этапа испытаний [Results of containment dome leveling and estimated values of movements for the test phase]

№ точек	Н	Н	$\Delta_{преднапряж.}$	Расчетные значения перемещений точек, расположенных на внешней поверхности купола защитной оболочки при ее испытании				
	(16.06.2016+28.06.2016)/2	27.04.2017		4,6	0,7	2,0	3,0	4,0
	м	м	м					
Rp1	0	0						
4-1	4,646067	4,628967	-0,0171	-0,0114	-0,00173	-0,00496	-0,00743	-0,00991
2-1	4,6606	4,6418	-0,0188	-0,01253	-0,00191	-0,00545	-0,00817	-0,0109
0	4,8952	4,8759	-0,0193	-0,01287	-0,00196	-0,00559	-0,00839	-0,01119
Rp2	-0,0008	-0,0007						
2-3	4,673067	4,6536	-0,01947	-0,01298	-0,00197	-0,00564	-0,00846	-0,01129
4-3*	4,682133	4,669066	-0,01307	-0,00871	-0,00133	-0,00379	-0,00568	-0,00758
0	4,8952	4,8759	-0,0193	-0,01287	-0,00196	-0,00559	-0,00839	-0,01119

* – величины строки, исключенные из обработки.

Таблица 4. – Результаты контроля цилиндрической части оболочки при ее испытании [Results of shell cylindrical part testing during its testing]

№№ точек по створам	Перемещения цилиндрической части ЗГО на соответствующих полкам давлений, в м.							
	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0
1-1	0,002156	0,00354	0,00513	0,007697	0,007084	0,007571	0,002402	0,001469
1-2	0,000683	0,00339	0,006766	0,007668	0,008955	0,008439	0,002538	0,001914
1-3	0,000814	0,002827	0,005786	0,007502	0,00808	0,00741	0,003802	0,001854
Ср.	0,001218	0,003252	0,005894	0,007622	0,00804	0,007807	0,002914	0,001746
2-1	0,002281	0,00321	0,006728	0,0067	0,00731	0,006902	0,002944	0,001155
2-2	0,00034	0,004614	0,005288	0,007018	0,00828	0,006911	0,00338	0,001826
2-3	0,00049	0,004866	0,005316	0,007164	0,008043	0,00761	0,003789	0,00116
Ср.	0,001037	0,00423	0,005777	0,006961	0,007878	0,007141	0,003371	0,001032
3-1	0,00185	0,00429	0,00508	0,008526	0,00842	0,0077	0,00194	0,00142
3-2	0,00157	0,00533	0,00781	0,00903	0,0099	0,00899	0,00223	0,00174
3-3	0,00133	0,00428	0,00698	0,00808	0,00815	0,008047	0,00248	0,00195
Ср.	0,001583	0,004633	0,006623	0,008545	0,008823	0,008246	0,002217	0,001703
4-1	0,00045	0,0031	0,00405	0,006285	0,00674	0,006419	0,00172	0,00117
4-2	0,00169	0,0049	0,00557	0,00851	0,00908	0,007738	0,00323	0,0028
4-3	0,00227	0,00493	0,0062	0,0085	0,00912	0,008629	0,00232	0,00166
Ср.	0,00147	0,00431	0,005273	0,007765	0,008313	0,007595	0,002423	0,001877
Среднее по столбцу:	0,001327	0,004106	0,005892	0,007723	0,008264	0,007697	0,002731	0,001843

Сравнительные характеристики фактических величин перемещений, определенных на цилиндрической части оболочки и их расчетных значений, полученных по максимальной величине перемещения определенного на этапе после преднапряжения (см. табл. 5, рис. 3).

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поцикловых измерений контрольных превышений между точками геодезического обоснования и контролируемыми точками, расположенными и закрепленными на купольной части оболочки. Результаты работ приведены в таблице 6.

Таблица 5. – Величины перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Values of calculated and actual data movement during the testing phase]

	Перемещения цилиндрической части ЗГО по соответствующим полкам давлений, в м.							
	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0
<i>Факт.</i>	0,001327	0,004106	0,005892	0,007723	0,008264	0,007697	0,002731	0,001843
Расчет.	0,001395	0,003985	0,005985	0,00798	0,009175			

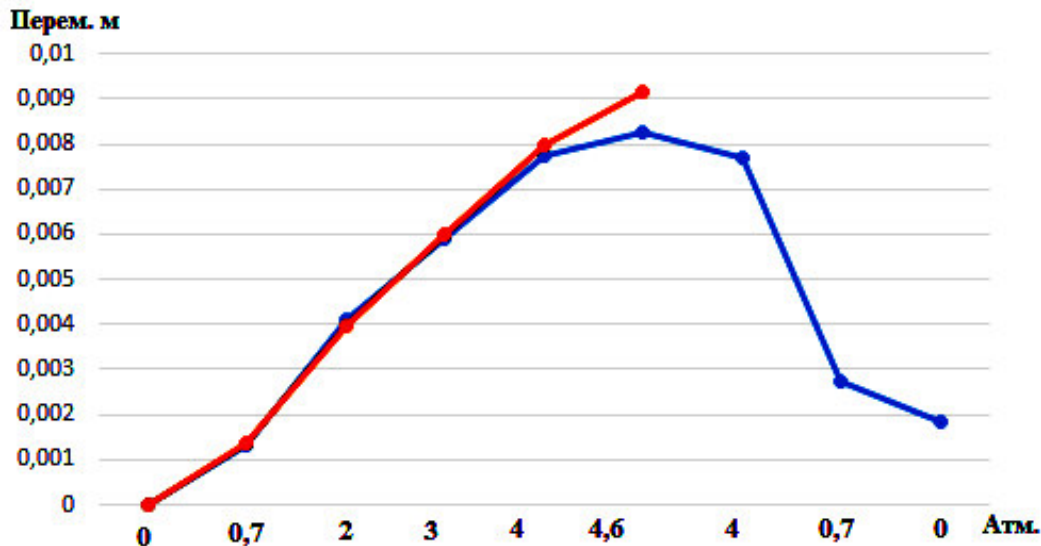


Рис. 3. – График перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Schedule of calculated and actual data movement during the testing phase]

Таблица 6. – Результаты контроля купольной части оболочки [Dome monitoring results]

№№ точек по створам	Перемещения купольной части ЗГО по соответствующим полкам давлений, в м.								
	0-0,7	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0
Rp-1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(1/2) 2	0,0004	0,0024	0,0037	0,0043	0,0103	0,0126		0,0046	0,002
(1/2) 1	0,0058	0,0058	0,0075	0,0105	0,01287	0,01325	0,01175	0,0085	0,0025
0	0,0016	0,0028	0,0051	0,0082	0,0097	0,01025	0,00535	0,0002	-0,002
(1/4) 1	0,0064	0,006	0,0092	0,0135	0,0119	0,01325		0,0058	0,0035
(1/4) 2	0,0052	0,0053	0,0078	0,0103	0,01325	0,01435		0,0062	0,0041
Rp2*	-0,0008	0,0006	0,0015	0,0031	0,00173	0,00285		0,0021	0,0035
(4/3) 2	0,002	0,0042	0,0059	0,0081	0,01287	0,01425		0,0046	0,002
(4/3) 1	0,0049	0,0058	0,0084	0,0119	0,01193	0,0125	0,014	0,004	0,0036
0	0,0016	0,0028	0,0051	0,0082	0,00983	0,00105	0,00535	0	-0,002
(3/2) 1	0,0032	0,0049	0,0073	0,0096	0,01145	0,0122			0,0026
(3/2) 2	0,0025	0,0035	0,0064	0,0087	0,0116	0,0137		0,0045	0,0036
Ср. по столбцу:	0,00333	0,00435	0,00664	0,00933	0,01157	0,01266	0,009112	0,004278	0,00199

* – отметки реперов, исключенные из обработки.

Сравнительные характеристики фактических величин перемещений, определенных на купольной части оболочки и их расчетных значений, полученных по максимальной величине перемещения определенного на этапе после преднапряжения (см. табл. 7, рис. 4).

Таблица 7. – Величины перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Values of calculated and actual data movement during the testing phase]

	Перемещения купольной части ЗГО по соответствующим полкам давлений, в м.							
	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0
Факт.	0,00333	0,00664	0,00933	0,01157	0,01266	0,009112	0,004278	0,00239
Расчет.	0,00191	0,00545	0,00817	0,0109	0,01253			

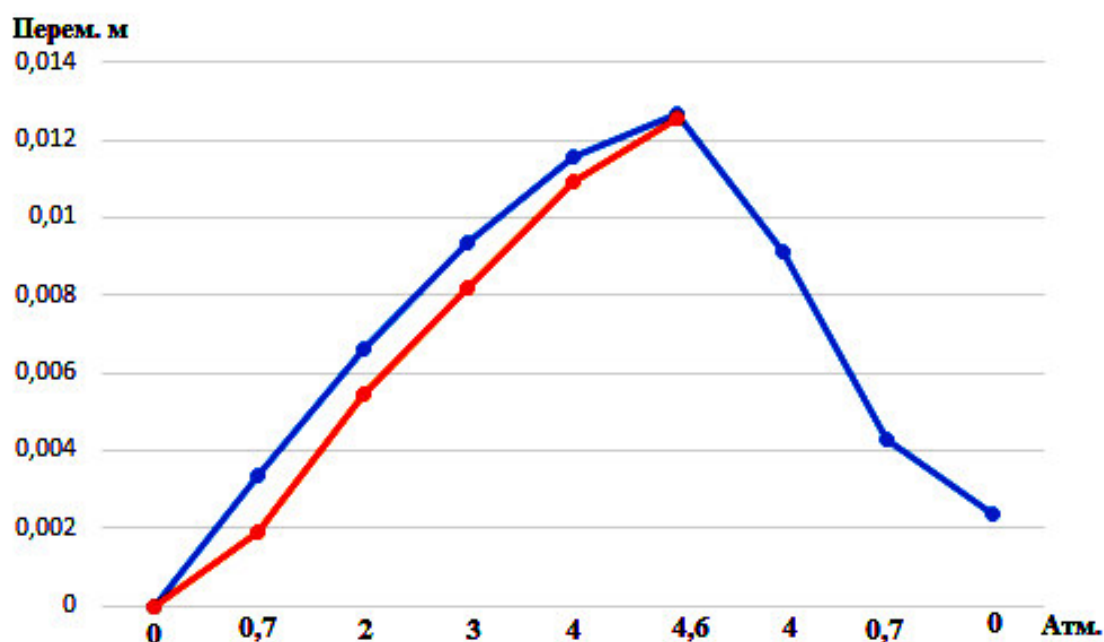


Рис. 4. – График перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Schedule of calculated and actual data movement during the testing phase]

Коэффициенты запаса прочности, определенные по перемещениям, полученным по контрольным точкам, установленным на внешней поверхности ЗГО по цилиндру $K_c=1,665$, по куполу $K_c=1,484$. Используя расчетное процентное соотношение (95%) относительных деформаций по поперечному сечению оболочки получим расчетные коэффициенты запаса прочности по внутренней поверхности стены ЗГО[6]:

- цилиндрической части $K_B= 1,753$;
- купольной части $K_B= 1,562$.

Результат анализа измеренных приращений напряжений встроенной системой по которым вычислены коэффициенты запаса прочности (см. табл.8) и соответствующие коэффициенты, полученные по величинам перемещений контрольных точек по абсолютной величине в среднем, отличаются не более 8%.

Таблица 8. – Результаты измерений датчиков ПСАС встроенных в окружную арматуру [Results of sensor measurements built into the circumference fittings]

№ п/п	Привязка (усл.отм.), м	№ створа	Внешняя (Пз)	Внутренняя (Вз)
			$K_{II}=\sigma_{IIo}/\sigma_{IIu}$	$K_B=\sigma_{Bo}/\sigma_{Bu}$
Цилиндр				
1	32.6	1	1,38	1,59
2	44.0	1	1,45	1,63
3	32.6	3	1,41	1,62
Ср.			1,41	1,61
Купол				
4	6.0	1	1,30	1,58
5	12.0	1	1,46	1,60
Ср.			1,38	1,59

Таким образом, предложенная методика контроля величин перемещения контрольных точек адекватно отображает техническое состояние оболочки и может быть рекомендована к внедрению на строящихся объектах использования атомной энергии в рамках концерна Росэнергоатом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серия норм по безопасности. № NS-G-1/10.* Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных электростанций. Руководство по безопасности. [Текст] – Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2008.– 143 с.
2. *СП 52-102-2004.* Предварительно напряженные железобетонные конструкции. [Текст] – М.: ФГУП ЦПП, 2005.– 42 с.
3. *СТО СРО-С 60542960 00017-2014.* Стандарт организации. Объекты использования атомной энергии. Система предварительного напряжения защитной оболочки реакторного отделения АЭС. Требования к конструированию, строительству, эксплуатации и ремонту. Утверждено решением общего собрания членом СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ», Протокол № 10 от 12 февраля 2014 года. [Текст] – М.: СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ», 2014.– 28 с.
4. *НП-010-16.* Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций». Приказ Ростехнадзора от 24.02.2016 N 70 (ред. от 17.01.2017) [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». – Режим доступа: URL:http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163/– 5.12.2017.
5. *Пимшин, Ю.И. и др.* Диагностика технического состояния защитных оболочек АЭС. [Текст] / Ю.И. Пимшин, Е.Б. Ключин, В.Н. Медведев, О.А. Губеладзе, В.А. Наугольников, Ю.В. Заяров, Ю.С. Забазнов // Известия высших учебных заведений «Геодезия и Аэрофотосъёмка». – 2016.– № 4. – С.55–59.
6. *Пимшин, Ю.И. и др.* Оценка напряженно-деформированного состояния защитных герметичных оболочек на примере блоков Ростовской АЭС. [Текст] / Ю.И. Пимшин, В.Н. Медведев, Г.А. Науменко, В.А. Наугольников, Ю.С. Забазнов // Известия высших учебных заведений «Геодезия и Аэрофотосъёмка». – 2017.– № 3. – С.36–42.
7. *Пимшин, Ю.И. и др.* Анализ работы строительных элементов герметичной оболочки АЭС при ее преднапряжении и испытании. [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, Ю.С. Забазнов, Л.Ф. Кирильчик // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона: сетевой журн. – 2014. – №1. – Режим доступа: URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2263> – 5.12.2017.
8. *Забазнов, Ю.С. и др.* Геодезическое обеспечение мониторинга технического состояния защитных герметичных оболочек атомных электрических станций (АЭС) в период их строительства, преднапряжения и испытания [Текст] / Ю.С. Забазнов, Е.Б. Ключин, Ю.И. Пимшин // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Выпуск 7 (в двух частях) – Ч.1. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2014/ Прилож. к журналу «Геодезия и Аэрофотосъемка» – 2014.– №6. – С. 19–23.
9. *Пат. 2426089 Российская Федерация, МПК G01, М 99/00.* Способ определения деформационных характеристик сооружений [Текст] / Пимшин Ю.И., Наугольников В.А., Пимшин И.Ю., Забазнов Ю.С., Яковлев В.В.; заявитель и патентообладатель Пимшин Ю.И., Наугольников В.А., Пимшин И.Ю., Забазнов Ю.С., Яковлев В.В.– № 2010105351/28; заявл. 15.02.10; опубл. 20.08.11, бюл. №22. – 2 с.: ил.
10. *Пат. 2546990 Российская Федерация, МПК G01, М 99/00.* Способ определения деформационных характеристик защитной герметичной оболочки [Текст] / Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Губеладзе О.А., Пимшин П.Ю.; заявитель и патентообладатель Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Губеладзе О.А., Пимшин П.Ю., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ростовский государственный строительный университет", РГСУ.– № 2013154404/28; заявл. 06.12.13; опубл. 10.04.15, бюл. №10.– 8 с.: ил.
11. *Пат. 2577555 Российская Федерация, МПК G01, М 99/00.* Способ оценки эксплуатационной надежности защитной герметичной оболочки реакторного отделения АЭС [Текст] / Пимшин Ю. И., Ключин Е. Б., Забазнов Ю. С., Губеладзе О. А., Пимшин П. Ю.; заявитель и патентообладатель Пимшин Ю. И., Ключин Е. Б., Забазнов Ю. С., Губеладзе О. А., Пимшин П. Ю., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ростовский государственный строительный университет",

- РГСУ.– № 2014152168/28; заявл. 22.12.2014; опубл. 20.03.2016, бюл. №16.– 2 с.: ил.
12. Программа натуральных наблюдений за защитной оболочкой энергоблока №3 Ростовской АЭС в период возведения, преднапряжения, приёмо-сдаточных испытаний и эксплуатации [Текст]. – М.: ОАО «Атомтехэнерго», 2011.
 13. Нормы проектирования железобетонных конструкций локализирующих систем безопасности атомных станций. ПНАЭ Г-10-007- 89 [Текст]. – Госпроматомнадзор СССР, 1991.
 14. *Медведев, В.Н. и др.* Анализ результатов предварительного напряжения защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев, А.Н. Ульянов, В.Ф. Стрижов, А.С. Киселев // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: тез. Девятой междунар. науч.-техн. конф.: пленарные и секционные доклады. – МНТК-2014, Москва, 21–23 мая 2014 г. – М., 2014. – С. 290–295.
 15. *Карпенко, Н.И.* Общие модели механики железобетона [Текст] / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

REFERENCES

- [1] NS-G-1/10. Seriya norm po bezopasnosti. Proektirovanie sistem zashchitnoy obolochki reaktora dlya atomnykh elektrostantsiy. Rukovodstvo po bezopasnosti. [A Series of Safety Standards. Designing of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants. Safety Guide.]. Vienna. "IAEA" [International Atomic Energy Agency], 2008, 143 p. (in English)
- [2] SP 52-102-2004. Predvaritel'no napryazhennye zhelezobetonnye konstruksii. [Pre-stressed Reinforced Concrete Structures]. Moscow. "FSUE CDP" [Federal State Unitary Enterprise "Center of design products in construction"], 2005, 42 p. (in Russian)
- [3] STO SRO-S 60542960 00017-2014. Standart organizatsii. Objekty ispolzovaniya atomnoy energii. Sistema predvaritel'nogo napryazheniya zashchitnoy obolochki reaktornogo otdeleniya AES. Trebovaniya k konstruirovaniyu, stroitelstvu, ekspluatatsii i remontu. [The standard of the Organization. Objects of Atomic Energy Use. The System of Protective Shell Preliminary Voltage of the Nuclear Power Plant Reactor Compartment. Requirements for the Design, Construction, Operation and Repair.]. Moscow. "SOYUZATOMSTROY" [Self-regulating organization Association "Association of organizations performing construction, reconstruction, major repairs of nuclear facilities" SOYUZATOMSTROY"], 2014, 28 p. (in Russian)
- [4] NP-010-16. Federalnye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii «Pravila ustroystva i ekspluatatsii lokalizuyushchikh sistem bezopasnosti atomnykh stantsiy» [Federal rules and regulations in the field of the use of atomic energy "Rules for the Design and Operation of Localizing Safety Systems for Nuclear Power Plants"], Ofitsial'nyy sayt kompanii «Konsultant Plyus» [Official site of the Consultant Plus company], 2016. Available at: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163. (in Russian)
- [5] Pimshin Yu.I., Klyushin E.B., Medvedev V.N., Gubeladze O.A., Naugolnov V.A., Zayarov Yu.V., Zabaznov Yu.S. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zashchitnykh obolochek AES [Diagnosis of the Technical Condition of the Nuclear Power Plant Protective Shells] [Geodesy and Aerophotography], 2016, №4, ISSN 0536-101X, p. 55–59. (in Russian)
- [6] Pimshin Yu.I., Medvedev V.N., Naumenko G.A., Naugol'nov V.A., Zabaznov Yu.S. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zashchitnykh germetichnykh obolochek na primere blokov Rostovskoy AES [Estimation of the Stress-Strain State of Protective Hermetic Shells on the Example of Rostov NPP Units] [Geodesy and Aerophotography], 2017, №3, ISSN 0536-101X, p. 36–42. (in Russian)
- [7] Pimshin Yu.I., Zabaznov Yu.S., Kiril'chik L.F. Analiz raboty stroitelnykh elementov germetichnoy obolochki AES pri ee prednapryazhenii i ispytanii [Analysis of the Work of Building Elements of the Nuclear Power Plants Hermetic Shell during its Prestressing and Testing] [E-journal "Engineering journal of Don"], 2014, №1. – Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2263>. (in Russian)
- [8] Zabaznov Yu.S., Klyushin E.B., Pimshin Yu.I. Geodezicheskoe obespechenie monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya zashchitnykh germetichnykh obolochek atomnykh elektricheskikh stantsiy (AES) v period ikh stroitelstva, prednapryazheniya i ispytaniya [Geodetic Support for Monitoring the Technical Condition of Protective Sealed Shells of Nuclear Power Plants (NPPs) during their Construction, Pre-Stress and Testing] [the collection of articles following the results of scientific and technical conferences. Release 7 (in two parts). – Ch1. – М.: МИГАiK / annex to the "Geodesy and Aerophotography" magazine №6], 2014. p. 19–23. (in Russian)
- [9] Pimshin Yu.I., etc. Sposob opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik sooruzheniy [Way of Definition of Construction Deformation Characteristics]. Patent RF, №2426089, 2011. (in Russian)

- [10] Pimshin Yu.I., etc. Sposob opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik zashchitnoy germetichnoy obolochki [Way of Definition of Deformation Characteristics of a Protective Tight Cover]. Patent RF, №2546990, 2015. (in Russian)
- [11] Pimshin Yu.I., etc. Sposob otsenki ekspluatatsionnoy nadezhnosti zashchitnoy germetichnoy obolochki reaktornogo otdeleniya AES [Method for Assessing the Operational Reliability of the Protective Hermetic Shell of the Nuclear Power Plant Reactor Compartment]. Patent RF, № 2577555, 2016. (in Russian)
- [12] Programma naturnykh nablyudenij za zashhitnoj obolochkoj energobloka №3 Rostovskoj AES v period vozvedeniya, prednapryazheniya, priyomo-sdatochnyx ispytanij i ekspluatatsii [The program of natural supervision over the Rostov NPP power unit № 3 protective cover during construction, pretension, acceptance tests and operation]. M. Pub. OAO «Atomtexenergo» [JSC Atomtekhnenergo], 2011. (in Russian)
- [13] Normy proektirovaniya zhelezobetonnnykh konstrukcij lokalizuyushhih sistem bezopasnosti atomnykh stancij. PNAE G-10-007-89 [Norms of design of ferroconcrete designs of the localizing security systems of nuclear power plants. PNAE G-10-007 - 89]. Pub. Gospromatomnadzor SSSR [Gospromatomnadzor of the USSR], 1991. (in Russian)
- [14] Medvedev V.N., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Kiselev A.S. Analiz rezultatov predvaritel'nogo napryazheniya zashhitnoj obolochki energobloka № 3 Rostovskoj AES [Analysis of results of preliminary tension of a protective cover of the Rostov NPP power unit № 3]. Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoj energetiki [Safety, efficiency and economy of nuclear power]: tez. Devyatoj mezhdunar. nauch.-tehn. konf.: plenarnye i sekcionnye doklady. – MNTK [theses of the IX international scientific and technical conference: plenary and section reports] – 2014, Moscow, May 21–23, 2014. M. 2014, pp. 290–295. (in Russian)
- [15] Karpenko N.I. Obshhie modeli mexaniki zhelezobetona [General models of mechanics of reinforced concrete]. M. Pub. Strojizdat [Stroyizdat], 1996, ISBN 5-274-01682-0, 416 p. (in Russian)

Geometric Parameter Monitoring of Nuclear Power Plant Protective Shell During Prestressing, Testing and Its Technical State Determining

Yu.I. Pimshin*¹, G.A. Naumenko², S.M. Burdakov*³, Yu.S. Zabaznov*⁴**

* *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University “MEPhI”, Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ *e-mail: yipimshin@mephi.ru*

ORCID: 0000-0001-6610-8725

WoS ResearcherID: J-6791-2017

³ *e-mail: SMBurdakov@mephi.ru*

ORCID iD: 0000-0002-8599-6008

WoS ResearcherID: F-6903-2017

⁴ *e-mail: Jur-rik@mail.ru*

ORCID iD is 0000-0003-1856-5221

Your ResearcherID is: V-3311-2017

** *Don state technical university,*

Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, Rostov region, Russia, 344000

² *e-mail: geodez@aanet.ru*

ORCID: 0000-0002-7512-4687

WoS ResearcherID: J-7170-2017

Abstract – The paper considers the estimation theory of the protective hermetic shell technical condition and the experience of using the mobile geodetic diagnostic system at the Rostov Nuclear Power Plant Unit No. 4. The results of a regular built-in system designed for determining and evaluating the stress-strain state of protective hermetic shells during the take-and-take period and operation are compared. They are compared with the results of the geodetic system obtained at the same stages of the protective hermetic shell.

Keywords: protective hermetic shell, technical condition, prestressing, testing, monitoring, mobile geodetic diagnostic system, stress-strain state evaluation.