

*На правах рукописи*

**ЗАБАЗНОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО  
КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ  
ОБОЛОЧЕК АЭС**

**Специальность: 25.00.32 - Геодезия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Волгодонск – 2017**

Работа выполнена в Волгодонском инженерно-техническом институте - филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научный руководитель: **Пимшин Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хорошилов Валерий Степанович**, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, профессор кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования

**Зотов Михаил Витальевич**, кандидат технических наук, доцент, ООО Научно производственная фирма «Интербиотех», директор

Ведущая организация: АО «Концерн «Росэнергоатом»  
«Нововоронежская атомная станция»

Защита состоится 28 сентября 2017 года в 12 час. на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., 4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного университета геодезии и картографии.  
([http://miiigaik.ru/nauka/dissertacionnyy\\_sovet/dissertatsii](http://miiigaik.ru/nauka/dissertacionnyy_sovet/dissertatsii))

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Вшивкова Ольга Владимировна

## **Общая характеристика диссертации**

**Актуальность работы.** В условиях современного позитивного развития атомной отрасли все большее значение принимает обеспечение надежной и безопасной эксплуатации АЭС. В настоящее время в России ведется строительство атомных станций с реактором ВВЭР-1000 и его модификациями, так как этот тип реактора зарекомендовал себя как наиболее отвечающий выше названным требованиям.

Особое место во всестороннем изучении элементов АЭС занимают исследования контуров защиты, одним из которых является защитная герметичная оболочка (ЗГО). Защитная герметичная оболочка характеризуется сложным строительным решением и является элементом, обеспечивающим защиту окружающей среды от негативного события, возможного в гермообъеме, с одной стороны, и обеспечение защиты работающего реактора от внешних воздействий, с другой стороны. На сегодняшний момент не существует достоверной системы оценки технического состояния герметичных оболочек реакторных отделений ВВЭР 1000 на продолжительный срок эксплуатации. Актуальность работы заключается в том, что в ней предложена мобильная геодезическая система контроля и оценки технического состояния ЗГО на неограниченный срок ее эксплуатации.

**Степень разработанности темы исследования.** Разработка средств диагностики технического состояния защитных оболочек АЭС в период их преднапряжения, испытания и эксплуатации является сложной и многоплановой задачей. В настоящее время в данном направлении работают такие крупные научные организации как АО «Атомэнергопроект» (АЭП), г. Москва, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской Академии Наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва, и др. Разработаны технические решения защитных герметичных оболочек, в том числе и встроенная система контроля их технического состояния. Но на сегодняшний момент не существует надежной технологии определения

напряженно деформированного состояния герметичных оболочек реакторных отделений ВВЭР 1000 на продолжительный срок их эксплуатации.

**Целью работы является** разработка методики геодезического обеспечения диагностики технического состояния ЗГО в периоды ее обжатия, испытаний и эксплуатации для повышения объективности и надежности оценки эксплуатационной пригодности защитной оболочки на неограниченном сроке ее существования, что обеспечивает повышение безопасности АЭС.

#### **Научные задачи работы.**

1. Анализ особенности работы строительных элементов ЗГО при приложении к ним сил в процессе преднапряжения и испытания оболочки с целью определения максимально нагруженных зон.
2. Определение расположения зон однородных деформаций по поверхностям ЗГО, расположение которых должно быть учтено при построении структуры геодезической диагностической системы.
3. Обоснование методики размещения контролируемых точек по исследуемым поверхностям защитной оболочки с учетом расположения деформационных зон и блоков датчиков штатной встроенной системы.
4. Разработка методики построения геодезической диагностической системы для определения деформационных характеристик ЗГО в период их преднапряжения, испытания и на любом временном этапе эксплуатации.
5. Разработка методики оценки технического состояния оболочки на основе определения перемещений исследуемых точек до преднапряжения, после преднапряжения, во время испытаний при наборе давления 4,6 атм, и далее при эксплуатации.

**Объектом исследования** является защитная герметичная оболочка реакторного отделения АЭС, которая обладает сложным строительным решением и является элементом, обеспечивающим защиту окружающей среды от негативного расчетного события, гипотетически возможного в гермообъеме, с одной стороны, и обеспечение защиты работающего реактора

от внешних воздействий, с другой стороны.

### **Научная новизна работы:**

1. доказано, что использование величин перемещений исследуемых точек для оценки технического состояния защитной герметичной оболочки обеспечивают результаты, аналогичные использованию величин напряжений в тех же зонах;

2. разработан математический аппарат, позволяющий оценить техническое состояние защитной герметичной оболочки и её ресурсных характеристик по величине перемещения исследуемых точек.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в разработке теоретических основ методики оценки технического состояния ЗГО на основе определения перемещений исследуемых точек мобильной геодезической диагностической системой на этапах существования оболочки, что позволит определить техническое состояние оболочки и оценить ее остаточный ресурс.

**Практическая значимость работы.** Разработана методика геодезического обеспечения диагностики технического состояния ЗГО в период ее обжата, испытаний и эксплуатации, которая обеспечивает оперативный и объективный контроль перемещений исследуемых точек, расположенных на внешних поверхностях строительных частей защитных оболочек АЭС на основе которых определяются коэффициенты запаса прочности и оценки остаточного ресурса ЗГО.

**Методология и методы исследования.** Используются математико-статистический метод исследования, который включает в себя метод аппроксимации на основе экспериментальных данных исследуемого объекта, т.е. построение модели исследуемого объекта и исследование свойств на соответствующих этапах его существования.

### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту.**

1. Установлены зоны однородных деформаций, расположение которых должно быть учтено при построении структуры мобильной геодезической

диагностической системы. Обоснована методика размещения контролируемых точек по исследуемым поверхностям защитной оболочки с учетом расположения деформационных зон и блоков датчиков штатной встроенной системы.

2. Предложена методика создания геодезического обоснования, восстанавливаемого в любой период существования ЗГО. Для этого основные строительные конструкции реакторного отделения используют в качестве исходных элементов.

3. Разработана методика оценки технического состояния оболочки на основе определения перемещений исследуемых точек на этапах до преднапряжения, после преднапряжения, при ее испытании при наборе давления 4,6 атм. и при эксплуатации, по которым определяются коэффициенты запаса прочности и коэффициент оценки остаточного ресурса защитной оболочки.

**Достоверность научных положений.** Исследования, приведенные в диссертации, основаны на анализе научных источников по выбранной теме, выполнении теоретических и практических исследований, экспериментальной проверке достоверности полученных результатов. Обработка результатов измерений и их анализ выполнены на основе методов математической статистики и теории погрешности измерений.

**Апробация результатов исследования.** Работа обсуждалась на научных международных конференциях ВИТИ НИЯУ МИФИ, научно-практических конференциях «Союза геодезистов Юга Росси», а также на международной научно-технической конференции «Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы», посвященной 235-летию основания МИИГАиК.

**Личный вклад автора** состоит в самостоятельной разработке изложенной в диссертации теории геодезического обеспечения диагностики технического состояния защитных оболочек АЭС в любой период ее существования. При этом разработана методика оценки технического состояния оболочки на основе определения перемещений исследуемых точек на этапах до преднапряжения, после преднапряжения, при ее испытании при наборе дав-

ления 4,6 атм. и при эксплуатации, по которым определяются коэффициенты запаса прочности и коэффициент оценки остаточного ресурса защитной оболочки. Кроме того, впервые в практике испытаний оболочек на прочность установлено, что при изменении давления от 2 до 3 атм. в купольной части регистрируется зона пластических деформаций, что не соответствует проектным параметрам и требует уточнения алгоритма расчета прочности ЗГО.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них четыре статьи – в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Основные идеи диссертации защищены тремя патентами РФ на изобретение.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх разделов с подразделами, заключения, приложения и списка литературы. Общий объём работы – 142 стр. Диссертация содержит 16 таблиц и 86 рисунков. Список литературы включает 106 наименований.

### **Содержание диссертации**

**Во введении** обосновывается актуальность темы и определены основные направления исследований, сформулирована цель работы.

**В первом разделе** рассмотрены вопросы состояния и перспектив развития энергетического комплекса России, место и роль атомной энергетики в энергетическом комплексе России. Выполнен обзор и проведен анализ достоинств и недостатков существующих систем защиты, а также характеристики контуров защиты АЭС, место и роль защитной герметичной оболочки (ЗГО) в комплексе защитных барьеров.

Конструктивное решение ЗГО должно обеспечивать надежную герметизацию гермообъема. Утечка газа из гермозоны может происходить через дефекты конструкции стальной диафрагмы (например, ее сварных швов), систему шлюзов и проходов коммуникаций. Проектом устанавливается, что величина утечки не должна превышать предельно допустимых значений. Так, например, величина утечки при максимальном расчётном давлении не должна превышать 0,3 % от объёма среды в зоне локализации аварии в сутки.

Второй основной функцией, решаемых защитной оболочкой, является обеспечение ее прочности, которая формируется работой преднапряжённого железобетона ее стен. В соответствии с этим для оценки соответствия расчетных параметров ЗГО и фактических перед сдачей в эксплуатацию проводят ее испытания на герметичность и прочность. Для контроля изменения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) защитная оболочка оснащена встроенной автоматизированной системой контроля (АСК), которая работает в автономном режиме. Система состоит из первичных средств измерения, устройства коммутации, регистрирующей и управляющей аппаратуры. Опыт применения АСК показал низкую ее надежность на продолжительный срок эксплуатации.

Кроме встроенной штатной системы контроля НДС, институтом Безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук «ИБРАЭ РАН» для оценки технической пригодности ЗГО разработана экспертная система. Данная система работает в комплексе с тензорезисторными датчиками силы НВ 005, установленными между опорной плитой и анкером каната, и предназначена для определения усилия в армоканатах.

Опыт эксплуатации существующих энергетических блоков показал, что выше описанные системы не обладают достаточной надежностью и достоверностью получения информации о техническом состоянии защитных оболочек НП 1000. Поэтому разработка методики геодезического обеспечения диагностики технического состояния защитных оболочек АЭС в период их преднапряжения, испытания и эксплуатации является своевременной и актуальной задачей, для достижения которой необходимо:

- разработать методику построения геодезической диагностической системы для определения геометрических параметров ЗГО в период ее преднапряжения, испытания и эксплуатации. В том числе разработать технологию создания геодезического обоснования, восстанавливаемого в любой период существования ЗГО. Обосновать методику размещения контролируемых точек по исследуемым поверхностям защитной оболочки с учетом расположения на



них деформационных зон;

– разработать методику обработки результатов измерений и оценки технического состояния защитной оболочки на основе определения перемещений исследуемых точек на этапах до преднапряжения, после преднапряжения, при испытании и далее при эксплуатации, по которым определяются коэффициенты запаса прочности и коэффициент оценки остаточного ресурса защитной оболочки.

**Во втором разделе «Разработка геодезического обеспечения технической диагностики защитных оболочек АЭС»** изложены результаты анализа работы строительных элементов герметичной оболочки при её преднапряжении и испытании. Разработка методики оценки деформированного состояния

объектов. Описаны методики формирования структуры мобильной геодезической диагностической системы, формирования планово-высотного обоснования и обработки измерительной информации.

Защитная герметичная оболочка конструктивно состоит из купольной и цилиндрической частей (см. рис.1). Строительное решение цилиндрической части оболочки таково, что рабочая арматура ориентирована по трём направлениям: радиальном, кольцевом, меридиональном. В средней части сечения стенки установлены каналы системы СПЗО, с пропущенными в них армоканатами. Строительное решение купольной части аналогично цилиндрической с той разницей, что форма купола представляет собой фигуру близкую к сегменту шара.

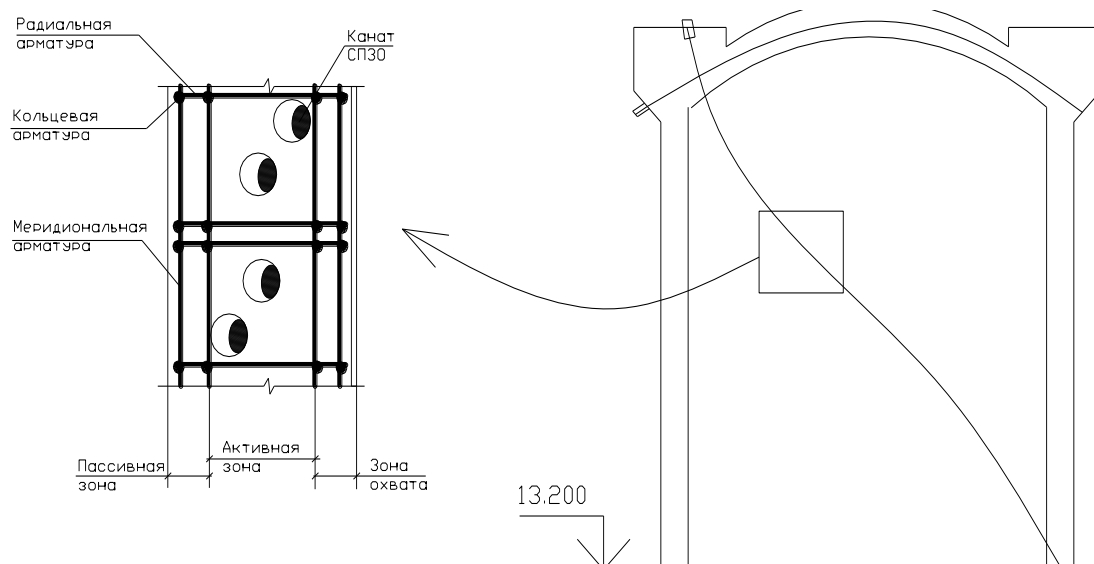


Рисунок 1. Схема защитной оболочки и расположения в ней рабочей арматуры и армоканатов

Рассматривая воздействие армоканатов, при их натяжении, на конструктивные элементы ЗГО необходимо отметить то, что усилие натяжения каната  $\overline{f_{ук}}$  совпадает с направлением укладки проволок его составляющих. В силу того, что в цилиндрической части канат располагается по геликоидальнопетливой схеме его воздействие на ЗГО определяется разложением усилия натяжения  $\overline{f_{ук}}$  на  $\overline{f_p}$  - радиальную и  $\overline{f_e}$  - вертикальную составляющие см. рис.2. При этом воздействие  $\overline{f_p}$  (радиальной составляющей) определяет изменение формы оболочки связанной с преобразованием ее из цилиндра в поверхность, имеющую вертикальное сечение стены гиперболической формы. Воздействие  $\overline{f_e}$  (вертикальной составляющей) определяет вертикальное сжатие стенки оболочки.

В купольной части канат располагается по ортогонально-петлевой схеме, его воздействие на ЗГО определяется разложением усилия натяжения  $\overline{f_{ук}}$  на  $\overline{f_p}$  - радиальную и  $\overline{f_2}$  - горизонтальную составляющие. При этом воздействие  $\overline{f_p}$  (радиальной составляющей) определяет изменение формы оболочки связанной с изменением радиуса кривизны сферической поверхности, при этом ее воздействие направлено центростремительно и перпендикулярно касательной плоскости к деформационной поверхности.  $\overline{f_2}$  горизонтальная

составляющая компенсируется строительными элементами опорного кольца и фактически не оказывает никакого влияния на параметры купольной части ЗГО.

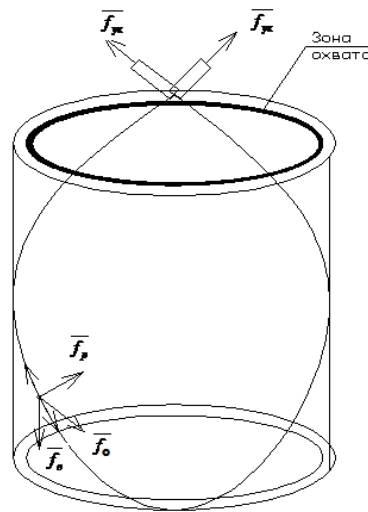


Рисунок 2. Схема цилиндрической части оболочки и воздействие на неё армоканата.

Таким образом воздействию сил СПЗО на строительные элементы оболочки практически не деформируемыми являются опорная плита и опорное кольцо. В то же время указанные воздействия СПЗО направлены на преднапряжение цилиндрической и купольной частей, именно они, воспринимая нагрузки, изменяют форму, т.е. деформируются. При этом зоны непосредственного примыкания цилиндрической части к опорной плите и опорному кольцу, а купольной части к опорному кольцу претерпевают минимальные перемещения, являются моментными зонами. Зоны, расположенные между минимально перемещаемыми и перемещаемыми максимально, являются переходными и зоны с устоявшимися максимальными перемещениями являются безмоментными. Распределение деформационных зон по строительным элементам ЗГО в графическом виде приведено на рис. 3.

При обжатии оболочки системой СПЗО наибольшие перемещения получают безмоментные зоны, которые в данном случае являются наиболее информативными. Выполнив измерения перемещений по исследуемым точкам, расположенным на внутренней и внешней поверхностях оболочки, выполняют оценку ее НДС.

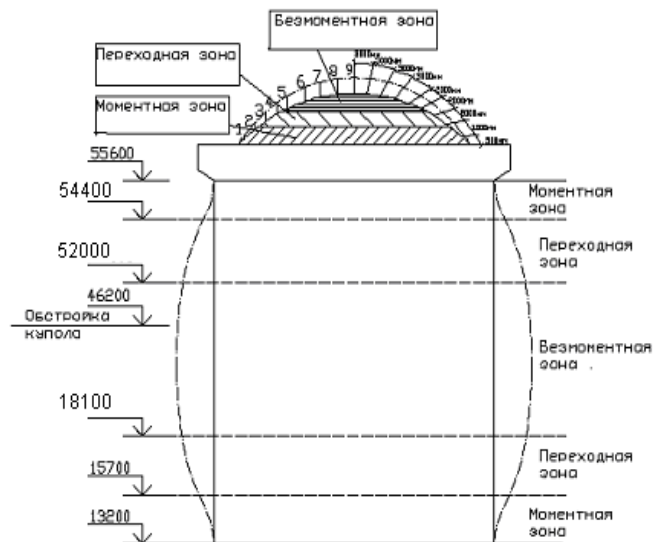


Рисунок 3. Распределение деформационных зон на строительных элементах ЗГО

Основным критерием оценки технического состояния ЗГО, исходя из требований СП-52-102-2004, ее надежности и оценки ресурсных характеристик является коэффициент запаса прочности, который определяется

$$K_0 = \frac{\Delta_{пред}}{\Delta_{дон}} \quad (1)$$

Применительно к ЗГО в качестве  $\Delta_{пред}$  принимают перемещения конструктивных точек размещенных на элементах (стенках) ЗГО при ее преднапряжении. В качестве  $\Delta_{дон}$  - принимают перемещения тех же точек на этапе испытаний при наборе внутреннего давления равного 4.6 атм.

Согласно нормативных требований к предварительно напряженным железобетонным конструкциями  $K_0 \geq 1.5$  на всех этапах эксплуатации начиная с преднапряжения. При этом после испытаний, определенный по результатам коэффициент  $K_0$  принимается начальным. Далее ежегодно определяются величины годовых перемещений  $\delta_i$ . Тогда текущий коэффициент на любом этапе ЗГО определяется

$$K_i = \frac{\Delta_{пред} + \sum_{i=1}^n \delta_i}{\Delta_{исп}} \quad (2)$$

Здесь  $f_{дег} = \Delta_{пред} + \sum_{i=1}^m \delta_i$  является функцией деградации ЗГО. При этом

$$d_i = \frac{K_i}{K_0}, \quad (3)$$

где  $d_i$  – параметр, определяет запас текущего ресурса ЗГО.

Таким образом, имея перемещения исследуемых точек на соответствующих этапах существования ЗГО обеспечивается возможность оценки его технического состояния и определения остаточного ресурса объекта независимо от встроенной штатной системы контроля.

Для определения перемещений исследуемых точек разработана мобильная геодезическая контрольно-измерительная система, являющаяся дублирующей штатной встроенной измерительной системы. Определим необходимые требования к построению мобильной геодезической измерительной системы (МГИС).

1. Объект исследуется путем координирования дискретно распределенных точек по его поверхностям, которые располагаются в максимально информативных зонах.

2. Положения исследуемых точек осуществляют и восстанавливают с точностью  $\pm 5$  мм, обеспечивающей достоверное определение результата.

3. Определение перемещения точек осуществляют с точностью  $\pm 1$  мм.

4. Контролируемые точки определяют в единой системе координат.

5. Контроль осуществляют с учетом программ преднапряжения, испытания и мониторинга за техническим состоянием объекта и в период эксплуатации.

Учитывая перечисленные требования к построению измерительной системы, сформулируем основные задачи, решение которых необходимо обеспечить при построении МГИС.

1. Создание геодезического обоснования в условной системе координат объекта и обеспечивающего стационарными исходными данными все исследуемые зоны ЗГО в процессе их контроля.

2. Распределение контрольных исследуемых точек с учетом расположения деформационных зон исследуемого объекта и размещение их в местах, обеспечивающих надежное определение и оценку искомых деформационных параметров.

3. Подбор методов, средств и методик измерений, гарантирующих получение заданной точности для последующего адекватного отображения деформационных характеристик исследуемого объекта.

4. Разработка методики совместной интерпретации деформационных характеристик объекта, с оценкой общих характеристик данного деформационного процесса и оценкой физико-механических свойств ЗГО.

В работе предлагается следующая *методика формирования плано-высотного обоснования*. Системой координат XYZ исследуемого объекта является декартова прямоугольная пространственная система координат, совпадающая в плане с системой координат реакторной установки  $X_p Y_p$ , а начало отсчета по оси Z осуществляется от строительного нуля объекта.

На исходном горизонте создается первая ступень  $(x_{(1)i}y_{(1)i}z_{(1)i})$ , на перекрытии обстройки реакторного отделения – вторая ступень  $(x_{(2)i}y_{(2)i}z_{(2)i})$ , на опорном кольце защитной оболочки – третья ступень  $(x_{(3)i}y_{(3)i}z_{(3)i})$ , на ее куполе – четвертая ступень  $(x_{(4)i}y_{(4)i}z_{(4)i})$  и в помещении ГА-701 реакторного отделения – пятая ступень  $(x_{(5)i}y_{(5)i}z_{(5)i})$ .

Пункты геодезического обоснования, закрепленные на перекрытии обстройки  $x'_{(2)i}, y'_{(2)i}, z'_{(2)i}$  формируется в виде замкнутого многоугольника с закрепленными вершинами. Разработана методика построения и последующего восстановления этого геодезического построения заключающегося в том, что для этих целей используются строительные конструкции обстройки и ЗГО, и выполняют таким образом, что параллельно сносятся образующие всех наружных стен обстройки путем отложения одинакового расстояния ( $L_0$ ) двух взаимно противоположных точках I, II с каждой их сторон. В последующем данные точки маркируются. Данное направление принимают как нормальное по отношению к оси  $OO'$  ЗГО см. рис.4. От этого направления I, II измеряют

два угла  $\beta_1, \beta_2$ , соответственно на правую и левую образующие цилиндрической части защитной герметичной оболочки.

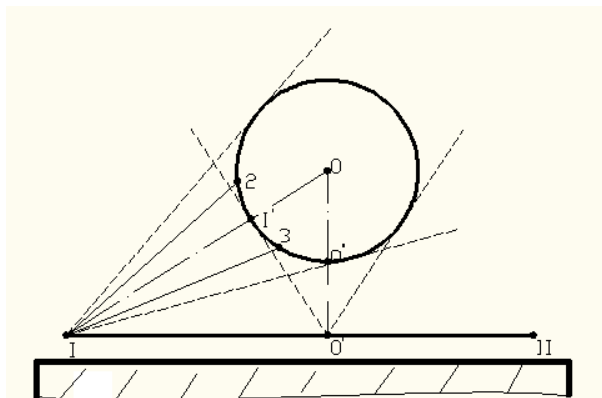


Рисунок 4. Схема измерения углов на обстройке купола.

Вычисляют среднее значение из двух измеренных углов

$$\beta_{cp} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (4)$$

Затем полученное среднее значение откладывают от нормального направления I-II в створе полученного направления I-I', измеряют расстояние  $(L_{I-I'})$ .

По результатам выполненных измерений определяют радиус  $R_{30}$

$$R_{30} = \frac{l_{I-I'} \cdot \sin\left(\frac{\beta_{21}}{2}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\beta_{21}}{2}\right)} \quad (5)$$

Далее вычисляют значения, катетов в треугольнике  $IOO^I$ , получим

$$l_{oo'} = ((l_{I-I'}) + R_{30}) \cdot \sin \beta_{cp} \quad (6)$$

$$l_{IO^I} = ((l_{I-I'}) + R_{30}) \cdot \cos \beta_{cp} \quad (7)$$

Далее в створах начального направления I-II от точки I откладывают отрезок  $L_{I-O'}$  и закрепляют точку  $O'$ . На точке  $O'$  строят перпендикуляр к створу I-II, данное направление совпадает с соответствующей строительной осью ЗГО. Выполнив описанные работы на четырех сторонах оболочки получают центральную фигуру, у которой центр  $O$  совпадают центр оболочки а,  $O_i'$  закреплены вне оболочки на перекрытии обстройки.

Далее в створе  $OO_{(i)}$ ' на поверхности оболочки закрепить две точки расположенных в едином вертикальном сечении при этом одна из точек должна располагаться на отметке 47 метров вторая на отметке ~ 49-54 метра. Далее точки  $OO''_{(i)}$  переносятся на опорное кольцо. После выполнения перечисленных выше работ выполняют разбивку купола по осевым направлениям и четвертным направлениям. Для этого переносят точки  $O''_1-O''_4$  на внутреннюю грань опорного кольца и закрепляют окрашиванием, четвертные оси разбивают - откладывая углов в  $45^0$  от основных осей.

Для формирования внутреннего геодезического обоснования для ЗГО в помещении ГА-701 выполняют следующие работы:

На стационарных строительных конструкциях (железобетонных выгородках, металлических стойках) закрепляют марки в виде металлических шайб (рис. 5).

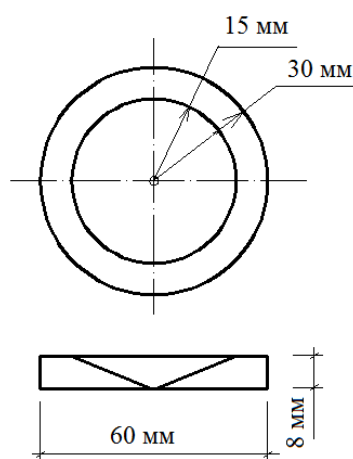


Рисунок 5. Схема марки

Далее размещают и закрепляют шайбы по внутренней поверхности ЗГО распределения их равномерно по окружности на облицовке. Марки размещают в двух горизонтальных сечениях на отметках 37.000 и 48.000.

Затем выполняют координирование установленных и закрепленных марок которые создают обоснование в ГА 701 и систему контролируемых точек. Координирования выполняют в системе координат осей ЗГО.

Для этого в герметичной зоне в любом удобном месте устанавливают тахеометр, имеющего функции измерения расстояний без отражателя. При свободном его ориентировании выполняют координирование точек 1 и 2 распо-



ложенных на одном из рельсов машины перегрузки топлива МП 1000. По координатам этих точек вычисляют дирекционный угол прямой 1-2 в системе координат прибора.

$$\alpha_{1-2} = \operatorname{arctg} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (8)$$

Имея ввиду, что рельсовый путь МП1000 параллелен оси II-IV реактора. Также известно то, что оси реактора развернуты относительно строительных осей на угол  $\beta$ . Исходя из этого вычисляют угол разворота тахеометра.

$$\gamma = \alpha_{1-2} + \beta \quad (9)$$

Выполнив азимутальный доворот тахеометра на угол  $\gamma$  обеспечивают параллельное расположение осей его системы координат и строительных осей ЗГО. Для контроля повторяют координирование точек 1 и 2 и вычисляют дирекционный угол  $\alpha_{1-2}$  который должен быть равен

$$\alpha_{1-2} = -\beta . \quad (10)$$

После ориентирования инструмента выполняют определение параллельного смещения его осей относительно строительных осей ЗГО.

Для этого измеряют горизонтальное проложение взаимно перпендикулярных направлениях от станции стояния инструмента до облицовки  $L_{x1}$ ,  $L_{x2}$ ,  $L_{y1}$ ,  $L_{y2}$ . Затем вычисляют параметры параллельных смещений систем координат:

$$X_T = (-1) \left[ \left( \frac{l_{x1} + l_{x2}}{2} \right) - l_{x2} \right] \quad (11)$$

$$Y_T = (-1) \left[ \left( \frac{l_{y1} + l_{y2}}{2} \right) - l_{y2} \right] \quad (12)$$

Которые являются координатами тахеометра в системе координат строительных осей ЗГО. Далее последовательно координируют шайбы расположенные в гермооболочке на строительных конструкциях и на металлической диафрагме ЗГО. При этом шайбы, расположенные на строительных конструкциях в гермообъеме будут являться геодезическим обоснованием, а

расположенные на диафрагме ЗГО - контролируемые, по положению которых оцениваются перемещения при обжатии оболочки и остаточные деформации после завершения этапа испытания оболочки на прочность.

*Основной задачей обработки измерительной информации* является получение деформационных характеристик исследуемого объекта. Величины перемещений исследуемых точек выражаются величинами горизонтальных или вертикальных отрезков между первоначальным и последующим положениями контролируемых точек. Принцип обработки повторных измерений заключается в том, что после выполнения очередного цикла измерений находят разности между смежными циклами  $i_1 - i$  и первым и текущим циклами  $i - i_0$ . При этом для ЗГО вертикальные перемещения определяются как разность отметок  $H_i$ , а горизонтальные перемещения – как разность радиусов  $R_i$ .

При изучении работы стенки цилиндра герметичной оболочки определили, что в период натяжения канатов СПЗО необходимо контролировать не только перемещение стенки, но и утолщение конструкции в процессе увеличения усилия на канатах. В каждом цикле, начиная с первого, определяют размер толщины стенки  $l = (R_2 - R_1)_i$ , где  $l$  – толщина стенки;  $R_2, R_1$  – внутренний и внешний радиус стены оболочки.

При определении геометрических параметров ЗГО в период преднапряжения и испытания вычисляют коэффициент  $K_0$ . При эксплуатации оболочки ежегодно определяют  $K_i$  и коэффициент текущего ресурса  $d_i$ . Затем выполняют оценку технического состояния оболочки, при этом руководствуется следующим:  $d_i \geq 1$  – ЗГО соответствует всем нормативным требованиям (прочность, уровень обжатия, напряжение в армокаркасе);  $0,67 \leq d_i \leq 1$  – ЗГО не соответствует нормативным требованиям, но находится в сжатом режиме работы и образование трещин в теле бетона невозможно;  $d_i \leq 0,67$  – ЗГО не соответствует уровню обжатия, находится в режиме растяжения, следствием чего является трещинообразование, отсутствие запаса прочности и аварийное состояние оболочки.

**В третьем разделе «Результаты производственных испытаний»** описано построение геодезической диагностической системы при обжати оболочки реакторного отделения третьего энергоблока РoAЭС и построение измерительной системы при испытании оболочек реакторных отделений первого и второго энергоблоков РoAЭС.

*На блоке № 3 сформировано многоярусное геодезическое обоснование.* Внешние геодезические сети располагаются на обстройке реакторного отделения и на опорном кольце защитной оболочки. При этом на обстройке обоснование создано в виде замкнутого многоугольника, четыре пункта расположены на строительных осях защитной оболочки.

Положение контролируемых точек, расположенных на цилиндрической части на вертикальных сечениях, определяли методом пространственной полярной засечки. Положение контролируемых точек, расположенных на купольной части защитной оболочки, определяли методом геометрического нивелирования.

Контроль внутренних геометрических параметров защитной оболочки осуществляли на стадии преднапряжения путем определения положения контролируемых точек, расположенных на горизонтах 38,0 и 48,0 м и равномерно распределенных по окружности в каждом сечении.

*Преднапряжение защитной оболочки.* В результате проведения геодезических работ, выполненных при обжати и преднапряжении защитной оболочки, получены следующие результаты.

В табл. 1 и табл. 2 приведены значения коэффициентов, полученные на внешних поверхностях ЗГО. Используя расчетное процентное соотношение (95%) относительных деформаций по поперечному сечению оболочки получим расчетные коэффициенты запаса по внутренней поверхности:

- цилиндрической части  $K_B = 1.57$ ;
- купольной части  $K_B = 1.52$ .

Для сравнения приведем результаты измерений штатной встроенной систе-

Таблица 1

Величины горизонтальных перемещений исследуемых точек, расположенных на вертикальных сечениях по осям на внешней поверхности ЗГО при ее обжати и испытании.

№ оси	Средние максимальные значения перемещений.		$K_{II}$ коэффициент запаса (цилиндр)
	Преднапряжение мм	Испытание мм	
1	-12.2	+8,1	
2	-9.2	+5,5	
3	-17.1	+12,6	
4	-12.3	+8,1	
Ср.	-12.8	+8,6	1,49

Таблица 2

Величины вертикальных перемещений исследуемых точек купольной части оболочки, расположенные на внешней поверхности ЗГО при ее обжати и испытании

Номера контролируемых точек	Средние максимальные значения перемещений		$K_{II}$ коэффициент запаса (купол)
	Преднапряжение мм	Испытание мм	
12 (1-2)	-9,5	+7,9	
6 (1-2)	-15,0	+9,8	
6 (3-4)	-15,0	+9,8	
12 (3-4)	-9,5	+8,4	
0	-16,0	+9,3	
12 (4-1)	-9,5	+8,4	
6 (4-1)	-15,0	+9,8	
6 (2-3)	-15,0	+9,8	
12 (2-3)	-9,5	+7,9	
0	-16,0	+9,3	
Ср.	-13,0	+9,0	1,44

мы, полученных при преднапряжении и испытании ЗГО энергоблока №3 Ростовской АЭС.

Таблица 3

Результаты измерений датчиков ПСАС встроенных в окружающую арматуру

№ п/п	Привязка (усл.отм.) м	№ ство- ра	Внешняя (Пз)			$\frac{\sigma_{\text{По}}}{\sigma_{\text{Во}}} \cdot 100\%$	Внутренняя (Вз)		
			$\sigma_{\text{По}}$	$\sigma_{\text{Пи}}$	$K_{\text{П}}$		$\sigma_{\text{Во}}$	$\sigma_{\text{Ви}}$	$K_{\text{В}}$
Цилиндр									
1	32.6	1	-99.46	75.85		84.45	-117.79	67.91	
2	44.0	1	-84.37	64.01		77.11	-109.41	71.70	
3	32.6	3	-93.28	71.97		93.28	-100.0	62.66	
Ср.			-92,37	70,61	1,31		-109,07	67,42	1,62
Купол									
4	6.0	1	-49.54	41.53		42,94	-115.38	66.60	
5	12.0	1	-44.38	38.70		93.05	-47.64	34.3	
Ср.			-46,96	40,12	1.17		-81,51	50,45	1.62

На блоке № 2 сформировано многоярусное геодезическое обоснование.

Измерения выполнялись в соответствии с этапами изменения давления внутри ЗГО. Всего было выполнено 11 циклов измерений при изменении величины давления. В графическом виде перемещения исследуемых точек на куполе представлены на рис.6.

Итогом работ по контролю геометрических параметров ЗГО второго блока РоАЭС стали следующие результаты:

- максимальные вертикальные перемещения купольной части при давлении 4,6 атм для точек 8–9 составили 19 мм, горизонтальные перемещения для цилиндрической части для точек  $I = 7$  составили 9 мм;
- максимальные остаточные деформации купольной и цилиндрической частей гермооболочки составили 2 мм;
- зона пластических деформаций купольной части зарегистрирована при изменении давления от 2 до 3 атм;
- вертикальные перемещения опорного кольца купольной части гермооболочки при возрастании внутреннего давления до 4,6 атм составили –8 мм.

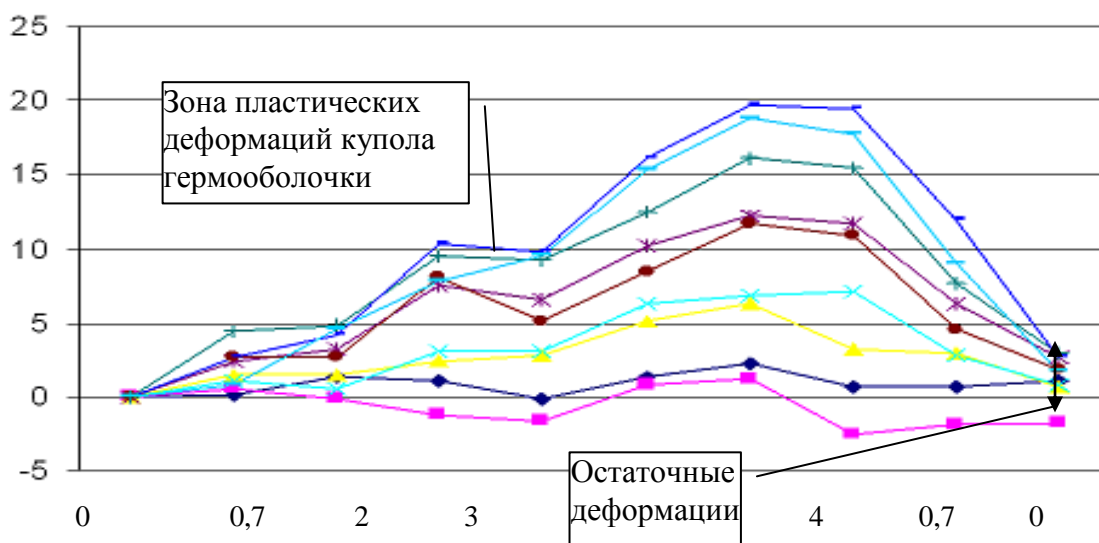


Рисунок 6. График перемещения точек 1–9

Результаты всех выполненных работ подтверждают работоспособность предложений и достоверность теоретических исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итогом** выполненных работ являются следующие научные результаты и положения.

1. Изучен современный уровень технических решений при оценке состояния защитных оболочек при их преднапряжении, испытании и эксплуатации. При этом установлено, что используемые для этих целей штатная встроенная система контроля и экспертная система обладают рядом недостатков, которые делают их малоэффективными и не обеспечивают надежное определение текущего технического состояния ЗГО и оценку их остаточного ресурса на продолжительный срок эксплуатации АЭС.

2. Выполнен анализ работы строительных элементов герметичной оболочки при её преднапряжении и испытании. В частности, рассмотрены деформации конструктивных элементов в оболочке при ее обжатии системой СПЗО. Также рассмотрены физические процессы, свойственные этапу испытаний ЗГО на прочность. Установлены зоны однородных деформаций, расположение которых должно быть учтено при построении структуры геодезической диагностической системы.

3. Разработана методика построения геодезической диагностической системы для определения геометрических параметров ЗГО в период ее преднапряжения, испытания и эксплуатации. В том числе, предложена методика создания геодезического обоснования, восстанавливаемого в любой период существования ЗГО. Для этого основные строительные конструкции реакторного отделения используют в качестве исходных элементов. Обоснована методика размещения контролируемых точек по исследуемым поверхностям защитной оболочки с учетом расположения на них деформационных зон.
4. Разработана методика обработки повторных результатов измерений и оценки деформационных характеристик защитной оболочки на основе применения определяемого по результатам измерений сплошного распределения стрел прогиба (амплитуд) по поверхностям исследуемого элемента и на основе этого установление конкретного распределения зон однородных деформаций.
5. Разработана методика оценки технического состояния оболочки на основе определения перемещений исследуемых точек на этапах до преднапряжения, после преднапряжения, при испытании при наборе давления 4,6 атм и далее при эксплуатации, по которым определяются коэффициенты запаса прочности и коэффициент оценки остаточного ресурса защитной оболочки.
6. Проведены производственные испытания геодезической измерительной системы при диагностике технического состояния защитных оболочек АЭС в период ее преднапряжения, испытания и эксплуатации. При этом впервые в практике испытаний оболочек на прочность установлено, что при изменении давления от 2 до 3 атм. в купольной части регистрируется зона пластических деформации, что не соответствует проектным параметрам и требует уточнения алгоритма расчета.
7. Основные положения диссертационной работы внедрены в производство на Ростовской АЭС при преднапряжении, испытании на прочность и эксплуатации защитных оболочек энергоблоков №1, 2, 3.

Материалы работы вошли в РД ЭО 1.1.2.99.0538-2011 «Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса защитных оболочек АЭС с реактором ВВЭР-1000», М., 2011 г.

Результаты диссертационного исследования **рекомендуется** использовать при строительстве и эксплуатации АЭС ВВЭР 1000 с целью повышения безопасности эксплуатации.

**Перспективы** дальнейшей разработки темы исследования состоят в модернизации предложенной методики в проекте АЭС-2006 и последующих конструкциях двухслойных железобетонных оболочек.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Забазнов Ю.С. Диагностика технического состояния защитных герметичных оболочек АЭС / Ю.И. Пимшин, Е.Б. Ключин, В.Н. Медведев, О.А. Губеладзе, Ю.В. Заяров, В.А. Наугольников. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016.-Т.60, №4. -55-59. ВАК Web of Science.
2. Забазнов Ю.С. Геодезическая технология определения деформаций гермо-оболочки / Ю.С. Забазнов, И.Г. Гайрабеков, Ю.И. Пимшин // Инженерный Вестник Дона. – 2010. № 4. – Режим доступа к журн.: [http://www.ivdon.ru/uploaddir/articles.245.big\\_image.doc](http://www.ivdon.ru/uploaddir/articles.245.big_image.doc)
3. Забазнов Ю.С. Геодезический контроль геометрии выравниваемого здания/ Ю.С. Забазнов, И.Г. Гайрабеков, Ю.И. Пимшин // Инженерный Вестник Дона. – 2010. № 4. – Режим доступа к журн.: [http://www.ivdon.ru/uploaddir/articles.250.big\\_image.doc](http://www.ivdon.ru/uploaddir/articles.250.big_image.doc)
4. Ю.С. Забазнов, Л.Ф. Кирильчик. Анализ работы строительных элементов герметичной оболочки АЭС при ее преднапряжении и испытании / // Инженерный Вестник Дона. – 2014. № 1. – Режим доступа к журн.: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2263>
5. Пимшин Ю.И., Наугольников В.А., Пимшин И.Ю., Забазнов Ю.С., Яковлев В.В. Пат. № 2426089. МПК G01M 99/00 Способ определения деформационных характеристик сооружений 2011.
6. Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Губеладзе О.А., Пимшин П.Ю. Патент №



2546990 МПК G01M 99/00 Оpubл. 10.04.2015 Бюл. 10, Способ определения деформационных характеристик защитной герметичной оболочки.

7.Пимшин Ю.И., Ключин Е.Б, Забазнов Ю.С., Пимшин П.Ю. Пат. № 2577555. МПК G01M99/00, Оpubл. 10.04.2015 Бюл. 10, Способ оценки эксплуатационной надежности защитной герметичной оболочки реакторного отделения АЭС.

8.Гайрабеков И.Г. Геодезическое обеспечение испытаний герметичной оболочки реакторного отделения / И.Г. Гайрабеков, Л.Ф. Кирильчик, Г.А. Науменко, Ю.С. Забазнов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. –2010. – спецвыпуск. – С. 42–48.

9.Забазнов Ю.С. Анализ причин, влияющих на изменение эксплуатационной надежности зданий и сооружений / Ю.С. Забазнов, И.Г. Гайрабеков, Н.В. Несмашный // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. – 2009. – спец. выпуск. – С.58–62.

10.Забазнов Ю.С. Геодезическое обеспечение испытаний защитной оболочки реакторного отделения / Ю.С. Забазнов // Бюллетень союза геодезистов. – 2009. – Вып. 3. – С. 34–39.

11.Кирильчик Л.Ф. Геодезическое обеспечение испытаний герметичных оболочек реакторных отделений / Л.Ф. Кирильчик, Г.А. Науменко, Ю.С. Забазнов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. – 2009. – спец. выпуск. – С. 47–50.

12.Пимшин И.Ю. Проблема обеспечения монтажа и контроля геометрических параметров рельса полярного крана / И.Ю. Пимшин, Ю.С. Забазнов, А.В. Яковлев // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. – 2009. – спец. выпуск. – С. 113–117.

13. Пимшин И.Ю. Проблема обеспечения монтажа и контроля геометрических параметров рельса полярного крана / И.Ю. Пимшин, Ю.С. Забазнов, А.В. Яковлев // Бюл. Союза геодезистов.- Ростов н/д, 2008. -№1.-С. 25-31.