

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Волгодонский инженерно-технический институт –  
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(ВИТИ НИЯУ МИФИ)**

На правах рукописи

**ЗАБАЗНОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

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

**Специальность: 25.00.32 – Геодезия**

**Диссертация**

**на соискание ученой степени кандидата технических наук**

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

**Волгодонск 2017**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС В ПЕРИОД ИХ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ И ИСПЫТАНИЙ .....	12
1.1. Состояние и перспективы развития энергетического комплекса России .....	12
1.2. Место и роль атомной энергетики в энергетическом комплексе России .....	15
1.3. Принципиальные решения АЭС .....	18
1.4. Конструктивные решения защитных герметичных оболочек АЭС с реактором ВВЭР 1000 .....	22
1.5. Испытания защитной оболочки: назначение, задачи и программы.....	29
1.6. Системы мониторинга технического состояния защитных оболочек ..	31
1.7. Анализ существующих систем контроля технического состояния герметичных оболочек АЭС.....	43
1.8. Постановка цели и задачи исследования .....	44
2. РАЗРАБОТКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС .....	47
2.1. Анализ работы строительных элементов герметичной оболочки при её преднапряжении и испытании .....	47
2.2. Разработка методики оценки технического состояния ЗГО .....	57
2.3. Методика формирования структуры геодезической диагностической системы .....	66
2.4. Методика формирования планово-высотного обоснования .....	73
2.5. Методика обработки измерительной информации .....	85
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ .....	91
3.1. Построение измерительной системы при преднапряжении оболочки реакторного отделения третьего энергоблока РоАЭС .....	91
3.2. Построение геодезической диагностической системы при испытании оболочки реакторного отделения второго энергоблока РоАЭС .....	105
3.3. Построение измерительной системы при испытании оболочки реакторного отделения первого энергоблока РоАЭС .....	121
3.4. Анализ совместной обработки результатов испытаний защитных оболочек энергоблоков РоАЭС .....	124

3.5. Разработка рекомендаций по использованию измерительно-информационной системы при испытании защитной оболочки проекта АЭС-2006.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	120
ЛИТЕРАТУРА .....	120

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях позитивного развития хозяйства нашего государства предполагается опережающее развитие энергогенерирующих предприятий. При этом особая роль отводится строительству атомных электрических станций (АЭС), которые обладают несомненными преимуществами перед гидро- и теплостанциями. Однако развитие атомной энергетики, как ни какая другая энергетическая отрасль, связано с проблемой безопасной эксплуатации ее объектов. Данная проблема имеет как психологическую, так и физическую составляющие.

Психологическая составляющая базируется как на позитивном, так и негативном опыте эксплуатации объектов атомной энергетики. Здесь необходимо осуществлять просветительскую деятельность, а в информационном смысле необходима открытость и достоверность интерпретации событий, связанных с АЭС.

Физическая составляющая связана с:

- качественным проектированием, основанным на последних достижениях науки и техники;
- эффективным строительством, реализующим современные инновационные технологии возведения сложных объектов;
- ответственной эксплуатацией, основанной на многофакторном объективном анализе состояния элементов эксплуатируемых объектов и оценки их остаточного ресурса.

В настоящее время зарекомендовали себя как наиболее надежные и безопасные, успешно эксплуатируемые в России и за ее рубежом, АЭС с реактором ВВЭР-1000 или его модификациями. Их всестороннее исследование и совершенствование является необходимым условием дальнейшего повышения уровня безопасности и эффективности работы данных объектов.

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 расчетного события, гипотетически возможного в гермообъеме, с одной стороны, и обеспечение защиты работающего реактора от внешних воздействий, с другой стороны.

Жизненные циклы ЗГО связаны с ее проектированием, возведением, сдачей-приемкой, эксплуатацией и утилизацией. Все без исключения жизненные этапы ЗГО являются важными и требуют ответственного отношения к реализации соответствующего комплекса работ. Однако период сдачи-приемки занимает особенное место, так как на этом этапе осуществляется преднапряжение и испытание ЗГО, по результатам которых формируется заключение о возможности последующей ее эксплуатации. Процессы преднапряжения, испытания и дальнейшая эксплуатация ЗГО связаны с контролем физико-механических и геометрических параметров; на основе обработки данной измерительной информации делаются заключения о техническом состоянии и ее ресурсных характеристиках.

Используемая штатная встроенная система контроля, состоящая из струнных измерительных преобразователей и предназначенная для контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) ЗГО, зарекомендовала себя как ненадежная [46, 47]. Основными недостатками встроенной системы является то, что струнные преобразователи имеют ограниченный срок эксплуатации (10–20 лет), и в период эксплуатации невозможно провести их ремонт и тарировку. В то же время на сегодняшний день отсутствует научно обоснованная методика построения эффективной, дублирующей штатную, контрольно-измерительной системы, предназначенной для определения деформационных характеристик ЗГО. Решению этой актуальной научной задачи посвящена настоящая диссертационная работа.

Разработка средств диагностики технического состояния защитных оболочек АЭС в период их преднапряжения, испытания и эксплуатации явля-

ется сложной и многоплановой задачей, в развитие данного направления науки и производства внесли существенный вклад коллективы Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Института проблем безопасного развития атомной энергетики «ИБРАЭ», «Атом-энергопроект» (АЭП), Ростовского государственного строительного университета (РИСИ) и др. Наибольшее отражение описываемая тема нашла в трудах ученых В.Н. Медведева, В.И. Малявина, Ю.И. Пимшина, Е.Б. Ключина, И.Г. Гайрабекова.

**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 обжата, 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, по-

сле 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 обжатия, 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 России», 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 давления 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.

В первой главе рассмотрены вопросы состояния и перспектив развития энергетического комплекса России, место и роль атомной энергетики в энергетическом комплексе России. Рассмотрены принципиальные решения АЭС. Описаны существующие системы защиты, а также характеристики контуров защиты АЭС, место и роль защитной оболочки в комплексе защитных барьеров.

Во второй главе изложены принципы диагностики технического состояния объектов. Дана теоретическая основа формирования геодезической диагностической системы. Приведен принцип формирования структуры измери-

тельной системы. Разработана методика формирования планово-высотного обоснования геодезической диагностической системы и методика обработки измерительной информации.

В третьей главе дано построение геодезической диагностической системы при обжати оболочки реакторного отделения третьего энергоблока РoАЭС и описано построение измерительной системы при испытании оболочек реакторных отделений первого и второго энергоблоков РoАЭС. Также выполнен анализ совместной обработки результатов испытаний защитных оболочек первого и второго энергоблоков РoАЭС. Представлены рекомендации по использованию геодезической измерительной системы при испытании защитных оболочек проекта АЭС-2006.

# 1. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС В ПЕРИОД ИХ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ И ИСПЫТАНИЙ

## 1.1. Состояние и перспективы развития энергетического комплекса России

Сегодняшнее состояние энергетической отрасли России таково, что совокупная мощность генерирующих предприятий составляет 227 млн. кВт в месяц. При этом суммарная выработка электроэнергии составляет 1070 млрд. кВт/ч в год (рис. 1.1). Процентное соотношение выработки электроэнергии по видам генерирующих предприятий приведено на рис. 1.2.

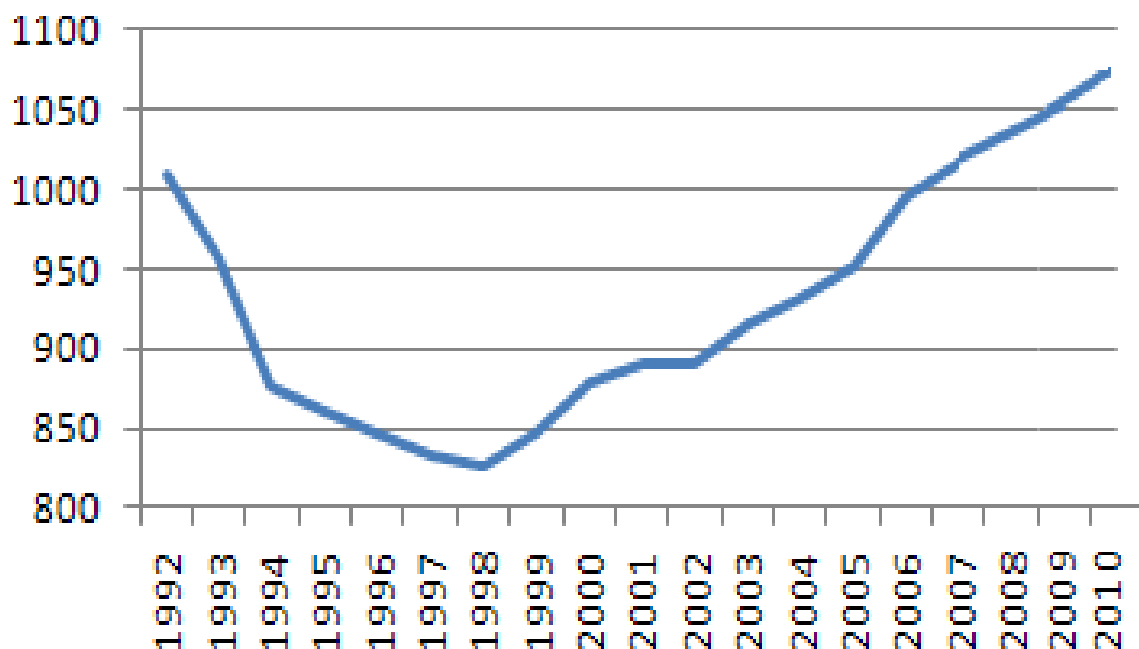


Рисунок 1.1. Производство электроэнергии в России, млрд. кВт/ч

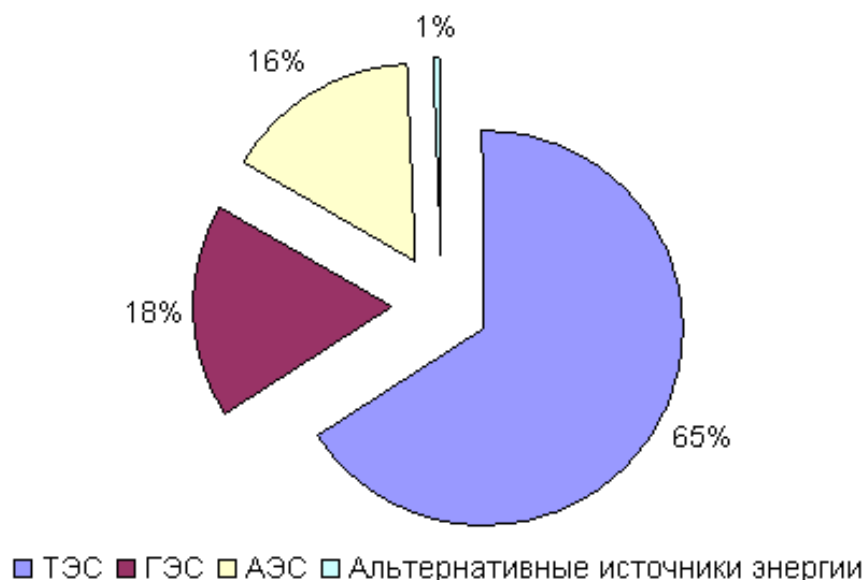


Рисунок 1.2. Процентное отношение генерирующих предприятий разных типов в энергобалансе страны

Современное состояние теплоэнергетического комплекса (ТЭК) характеризуется высокой, более 50 %, степенью износа основных фондов, ввод в действие новых производственных мощностей по всем типам предприятий ТЭК сократился за девяностые и нулевые года от двух до шести раз, при этом существующая практика продления ресурса оборудования закладывает будущее отставание в эффективности ТЭК. Кроме отмеченного, наблюдается высокая аварийность оборудования, обусловленная низкой производственной дисциплиной персонала и недостатками в управлении. При таком развитии ситуации через десять лет выработка электроэнергии составит 878 млрд. кВт/ч. При нынешнем темпе развития экономики дефицит электроэнергии будет возрастать и к 2020 г. составит 24%.

План развития топливно-энергетической отрасли России до 2020 г., утвержденный правительством Российской Федерации от 28 августа 2003 г. № 1234-р, подразумевает возведение новых и завершение строительства «энергетических долгостроев» ГЭС, АЭС, ТЭЦ, тем самым новые вводимые в эксплуатацию генерирующие мощности полностью перекроют дефицит и удовлетворят возрастающую потребность в электроэнергии для национальной экономики. При этом предполагается районировать расположение различных типов генерирующих предприятий в зависимости от условий той или

иной территории, т. е. в горной местности предполагается вводить ГЭС, в густонаселённых районах – АЭС, а в труднодоступных малонаселенных районах – АЭС малой мощности и ТЭЦ. В Южном и Приволжском федеральных округах, согласно данной программе, планируется строительство АЭС, а также реконструкция и модернизация уже эксплуатируемых с увеличением их генерирующих энергетических мощностей. Также будет развиваться направление, основанное на использовании возобновляемых источников энергии. Предполагается также осуществлять дальнейшее развитие тепло- и гидроэнергетики.

## **1.2. Место и роль атомной энергетики в энергетическом комплексе России**

На сегодняшний день в России эксплуатируются 30 ядерных энергоблоков на десяти атомных электростанциях с общей установленной мощностью 22,2 ГВт. В их числе 14 энергоблоков с реакторами типа ВВЭР, 11 энергоблоков с реакторами типа РБМК, 4 энергоблока с реакторами типа ЭГП и 1 энергоблок на быстрых нейтронах – БН-600. Выработка электроэнергии атомными электростанциями в 2012 г. составила 220 млрд. кВт·ч, коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) атомных электростанций – 72%.

Доля атомной энергетики в настоящее время составляет 3,5% потребления всех топливно-энергетических ресурсов, 11% установленной мощности и 16% производства электроэнергии России (21% в европейской части страны). Основные направления развития атомной энергетики определены одобренной Правительством Российской Федерации стратегией развития атомной энергетики России в первой половине XXI в.

В результате проведенной оптимизации топливно-энергетического баланса определено, что увеличение потребности экономики страны в электроэнергии необходимо покрывать за счёт роста выработки электроэнергии атомными электростанциями, которая должна возрасти при оптимистическом и благоприятном вариантах развития до 230 млрд. кВт·ч к 2020 г. Кроме того, предусмотрена возможность дополнительного увеличения производства электроэнергии на АЭС до 270 млрд. кВт·ч с увеличением объёмов производства тепловой энергии на основе модернизации действующих атомных электростанций. В результате производство электроэнергии на атомных станциях возрастет с 16% в 2000 г. до 23% в 2020 г. (в европейской части – до 32%). Для достижения указанных показателей необходимо увеличить мощность АЭС и производство энергии практически до 2 ГВт в год.

На действующих атомных электростанциях предусмотрено дальнейшее повышение их эксплуатационной безопасности за счет модернизации, осуществляемой в период текущих планово-предупредительных ремонтов

(ППР). Предусматривается также продление срока эксплуатации энергоблоков (на 10–20 лет) с последующим замещением новыми, возводимыми в основном на тех же территориях. В табл. 1.1 указаны названия АЭС, типы реакторов и планируемые сроки их вывода из эксплуатации.

Таблица 1.1. Атомные электростанции России

Название АЭС	№ блока	Тип реактора	Проектный срок окончания эксплуатации, год
Белоярская	3	БН-600	2010
Билибинская	1	ЭГП-6	2004
	2	ЭГП-6	2004
	3	ЭГП-6	2005
	4	ЭГП-6	2006
Балаковская	1	ВВЭР-1000	2015
	2	ВВЭР-1000	2017
	3	ВВЭР-1000	2018
	4	ВВЭР-1000	2023
Калининская	1	ВВЭР-1000	2014
	2	ВВЭР-1000	2016
	3	ВВЭР-1000	2036
Кольская	1	ВВЭР-440	2008
	2	ВВЭР-440	2009
	3	ВВЭР-440	2011
	4	ВВЭР-440	2014
Курская	1	РБМК-1000	2011
	2	РБМК-1000	2014
	3	РБМК-1000	2013
	4	РБМК-1000	2015
Ленинградская	1	РБМК-1000	2008
	2	РБМК-1000	2010
	3	РБМК-1000	2014
	4	РБМК-1000	2011
Нововоронежская	3	ВВЭР-440	2006
	4	ВВЭР-440	2007
	5	ВВЭР-1000	2010
Смоленская	1	РБМК-1000	2012
	2	РБМК-1000	2015
	3	РБМК-1000	2020
Ростовская	1	ВВЭР-1000	2031

Исходя из современных проблем нашего государства и учитывая всевозрастающую потребность в электроэнергии, проектирование и строительство АЭС, которые характеризуются малым влиянием на экологию (табл. 1.2) и большой мощностью, становится первоочередной задачей. Как отмечалось выше, в настоящее время доля выработки электроэнергии АЭС в России составля-

ет 16 % от всех энергогенерирующих предприятий, что, несомненно, недостаточно. В развитых странах доля атомной энергетики составляет в среднем 35%, наибольшей долей атомной энергетики в энергобалансе страны обладает Франция, у неё на выработку электроэнергии на АЭС приходится 75% (рис. 1.3).

Таблица 1.2. Сравнительные показатели экологического воздействия ТЭС и АЭС мощностью 1000 МВт

Показатели	ТЭС			АЭС
	на угле	на мазуте	на газе	
Потребление топлива, тыс.т/год	5 900	2 200	2 600 000	0,2 Природный уран
Потребление атмосферного кислорода	5 500 000	3 400 000	4 400 000	0
Газовые выбросы, тыс. т/год				0
Углекислый газ	10000	6000	2000	0
Оксиды серы	124,4	84	-	0
Оксиды азота	34,2	21,9	23,6	0
Твёрдые отходы, тыс. т/год	830	-	-	0,03
Индивидуальная доза облучения вблизи станции, мЗв/год	0,005			0,002

В ближайшей перспективе в России планируется вести строительство АЭС с реакторами типа ВВЭР 1000, ВВЭР 1200, ВВЭР 1500 и БН 600, БН 800. Сейчас в России ведется завершение строительства Ростовской АЭС (третьего и четвёртого энергоблоков), пятого блока Балаковской АЭС; строительство этих станций было начато в семидесятые–восемидесятые годы прошлого века. В последние годы начато строительство новых АЭС, в том числе: ЛАЭС 2, НВАЭС 2, Калининградская АЭС, Нижегородская АЭС.

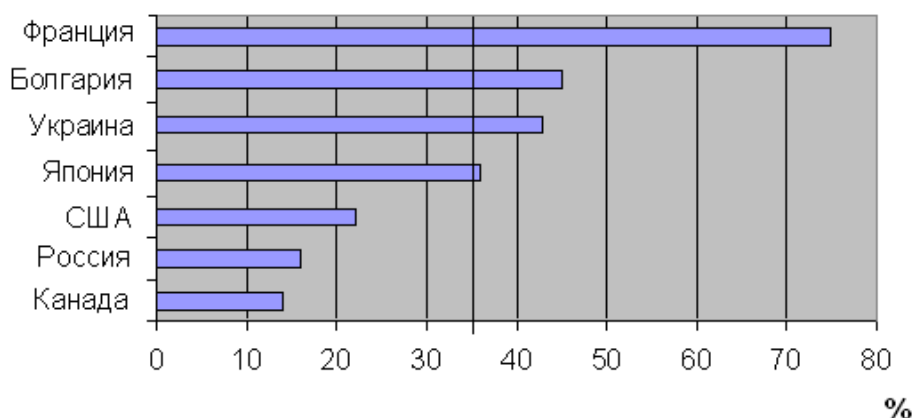


Рисунок 1.3. Доля атомной энергетики в энергобалансе стран мира

### 1.3. Принципиальные решения АЭС

Конструктивно атомная электростанция с реактором ВВЭР-1000 является двухконтурной, в которой первый контур расположен в герметичной защитной оболочке. Комплекс оборудования первого контура называется «реакторная установка В-320», которая служит для выработки сухого насыщенного пара для турбинной установки второго контура. Реакторная установка включает в себя:

- 1) главный циркуляционный контур (ГЦК), который состоит из:
  - реактора ВВЭР 1000;
  - четырех циркуляционных петель с парогенераторами ПГ-1000;
  - главных циркуляционных насосов ГЦН-195М;
  - главных циркуляционных трубопроводов Ду 850;
- 2) систему компенсации объёма, состоящей из:
  - парового компенсатора объёма;
  - барботера;
- 3) систему аварийного охлаждения зоны (САОЗ), включающую:
  - четыре гидроёмкости САОЗ;
  - трубопроводы ДУ 325.

Реактор является важнейшей частью АЭС. Водо-водяной реактор – гетерогенный аппарат на тепловых нейтронах, в котором вода используется в качестве теплоносителя и замедлителя. Такой тип реактора также называют корпусным с водой под давлением (PWR), так как активную зону, размещенную в стальном корпусе, охлаждает вода под высоким давлением. Сам реактор представляет собой цилиндрический сосуд с крышкой, состоит из активной зоны, корпуса, внутрикорпусных устройств и верхнего блока с приводами системы управления защиты.

Корпус реактора – один из важнейших элементов оборудования реакторной установки. Во время эксплуатации корпус подвергается различным воздействиям, в первую очередь, – это высокое давление теплоносителя, нейтронное и гамма-излучение, а также перепады

температуры; всё это приводит к изменению физико-механических свойств металла. Корпус имеет патрубки для входа и выхода теплоносителя, внутри размещена шахта для разделения входных и выходных потоков теплоносителя. Активная зона собрана из топливных кассет шестигранной формы, в каждой кассете установлена трубка для размещения датчиков энерговыделения. Внутри кассеты расположен пучок стержневых тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), которые отделяются друг от друга дистанционирующими устройствами, обеспечивающими необходимый зазор для циркуляции теплоносителя. Ядерным топливом для такого вида реактора служит двуокись урана, заключенная в циркониевую оболочку.

На атомных станциях с серийным реактором ВВЭР-1000 применяются горизонтальные парогенераторы насыщенного пара ПГВ-1000. Парогенератор представляет собой однокорпусный рекуперативный теплообменник горизонтального типа с погруженным трубным пучком. Теплоноситель из реактора поступает на входной коллектор, проходит по U-образным трубкам, отдавая тепло пароводяной смеси второго контура, которая находится в межтрубном пространстве, и поступает на коллектор пара второго контура.

Одним из важных и ответственных агрегатов АЭС с водным теплоносителем является главный циркуляционный насос. Главный циркуляционный насос ГЦН 195М предназначен для создания циркуляции теплоносителя в первом контуре АЭС. ГЦН 195М представляет собой вертикальный центробежный насос с осевым подводом воды и выносным асинхронным двигателем.

Система компенсации объёма предназначена для создания и поддержки давления в первом контуре. Система состоит из парового компенсатора объёма, импульсно-предохранительного устройства, барботера и трубопроводов. Регулировка давления осуществляется за счет сжатия или расширения паровой подушки, при избыточном давлении в контуре часть пара сбрасывается в барботер.

Система аварийного охлаждения является составной частью защитных устройств и предназначена для аварийного охлаждения активной зоны реак-

тора путём залива её холодной водой. Система состоит из двух подсистем, каждая из которых рассчитана на самостоятельную работу во время аварии.

Кроме оборудования реакторной установки, в защитной оболочке располагается транспортно-технологическое оборудование, вентиляционная система, система контроля и защиты. Транспортно-технологическое оборудование предназначено для проведения основных операций с топливными кассетами и обслуживания технологического оборудования при ППР. Перегрузка топлива в реакторе осуществляется при помощи напольной перегрузочной машины МП-1000. Для обслуживания оборудования предназначен кран кругового действия 320/160+2·70. Вентиляционная система предназначена для создания разряжения при штатной работы АЭС, удаления тепла и влаги, очистки воздуха.

Для предотвращения распространения радионуклидов в атмосферу на АЭС разработан комплекс независимых контуров защиты. Первым контуром защиты служит топливная матрица, которая задерживает осколки деления. Вторым контуром защиты является оболочка тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ), она препятствует распространению газообразных осколков деления. Третьим контуром защиты на пути распространения радиации служит корпус реактора и конструкции трубопроводов первого контура. Четвертый контур защиты – это защитная герметичная оболочка реакторного отделения.

Безопасность работы реакторной установки базируется на следующих принципах:

- высокое качество изготовления и монтажа оборудования;
- обеспечение локализации опасных последствий аварий.

Система обеспечения безопасности предусматривает три категории устройств: устройства, поддерживающие нормальный режим работы установки, защитные устройства и устройства локализации последствий аварий.

Устройства первого типа поддерживают нормальный режим работы реакторной установки, осуществляют контроль параметров, регулировку процессов, и с их помощью ведётся управление работой реактора и оборудования.

Как только происходит нарушение нормальной работы установки либо происходит авария, в работу включаются устройства двух последних типов. Эти устройства рассчитаны на случай максимальной проектной аварии, т. е. разрыв первого контура. Их главной задачей является предотвращение расплавления активной зоны реактора и распространения радиации за герметичную зону реакторного отделения. Эти системы включаются автоматически, частично или полностью используют свой потенциал в зависимости от степени аварии. В системе защиты используются гидроемкости, из которых вода поступает в первый контур.

Устройства ликвидации аварий проектируются с трехкратным запасом по сравнению с необходимым объемом для ликвидации аварии. Каждая из систем располагается в отдельном помещении и не имеет связи с двумя другими. Таким образом, для ликвидации аварии достаточно включения только одной системы.

Герметичной оболочке отведена важнейшая роль – не допустить выброса радиоактивного пара в атмосферу в результате максимальной проектной аварии, т. е. оболочка служит локализирующей системой защиты. Герметичная оболочка предназначена также для защиты реакторного отделения от внешних погодных и техногенных воздействий, которые могут привести к выходу из строя реакторной установки. К таким воздействиям можно отнести ураганы, смерчи, удар падающего самолета, ракетно-бомбовый удар либо взрыв. Кроме того, в отличие от оборудования АЭС, срок службы которого рассчитан на 35 лет, защитная оболочка должна находиться в пригодном для эксплуатации состоянии ещё долгие годы, это связано в первую очередь с тем, что в настоящее время не существует технологии вывода АЭС из эксплуатации и радиоактивное оборудование консервируют в защитной оболочке на большой срок либо используют её для хранения радиоактивных отходов и отработанного топлива.

#### 1.4. Конструктивные решения защитных герметичных оболочек АЭС с реактором ВВЭР 1000

Полувековой опыт проектирования, строительства и эксплуатации герметичных оболочек в России и за ее рубежом дал множество вариантов их исполнения. В настоящее время используются несколько типов оболочек (рис. 1.4). Выбор типа конструкции зависит от множества факторов, таких как мощность используемого реактора, доступность тех или иных строительных материалов и географическое расположение атомной станции.

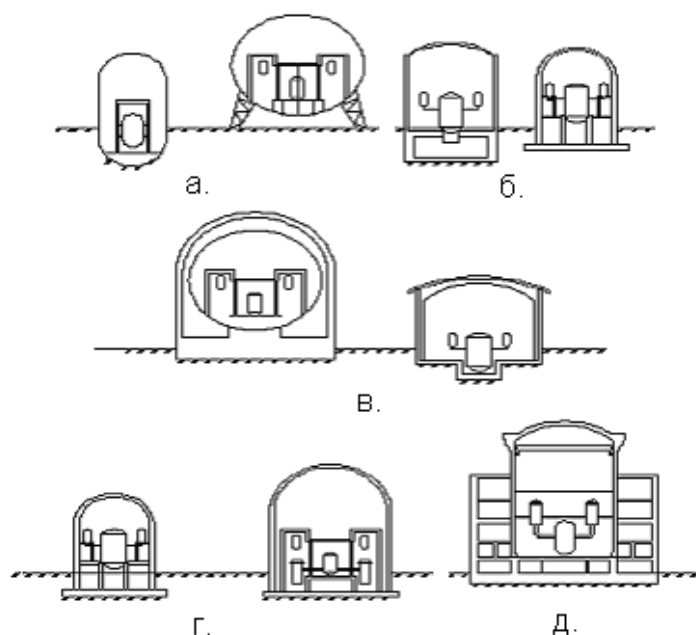


Рисунок 1.4. Виды конструкций герметичных оболочек:

*а – металлические; б– железобетонные; в– многослойные; г – предварительно напряженные (частично); д– предварительно напряженные*

Конструктивное решение ЗГО должно обеспечивать надежную герметизацию гермообъема. Утечка газа из гермозоны может происходить через дефекты конструкции стальной диафрагмы, систему шлюзов и проходок коммуникаций. Проектом устанавливается, что величина утечки не должна превышать предельно допустимых значений. Так, например, величина утечки при расчётном давлении не должна превышать 0,3 % от объёма среды в сутки в зоне локализации аварии. Кроме того, оболочка служит фундаментом технологического и вспомогательного оборудования, так как его опорные элементы крепятся к стенам оболочки.

До сегодняшнего дня строятся и эксплуатируются ЗГО первого типа (см. рис. 1.4, д), конструкция которых была разработана в 70-е годы XX в. и представляют собой предварительно напряженную железобетонную строительную конструкцию, внутренняя поверхность которой выполнена из листовой стали. Конструкция оболочки состоит из нескольких элементов: опорная плита, цилиндрическая часть, опорное кольцо, купол.

Плита представляет собой горизонтальную железобетонную конструкцию, являющуюся перекрытием ячеистой структуры обстройки реакторного отделения. В качестве элементов армирования используется ненапрягаемая арматура периодического профиля 20АIII и 12АI по ГОСТ 5781-82, верхняя часть плиты выполнена из листовой углеродистой стали ВСтЗсп5 по ГОСТ 380-71\*. Плита служит опорой цилиндрической части оболочки, а также всему комплексу технологического оборудования, расположенного в герметичной зоне (рис. 1.5).

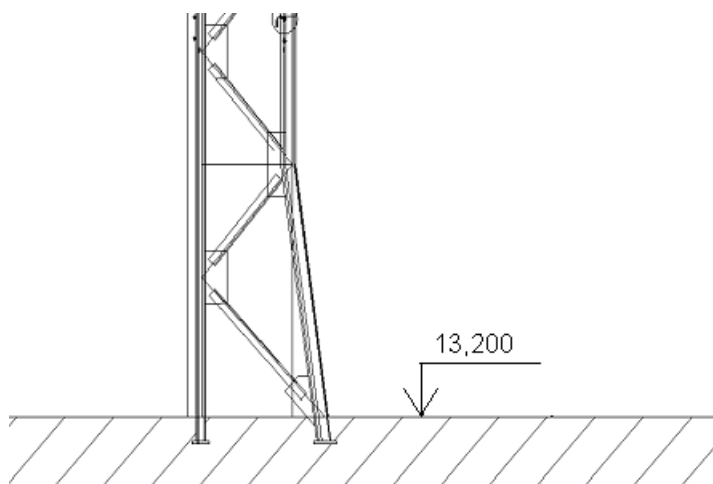


Рисунок 1.5. Узел сопряжения плиты и цилиндрической части оболочки

Цилиндрическая часть оболочки выполнена из железобетона. В этой конструкции применено два вида армирования. Первый вид выполнен из ненапрягаемой арматуры 20АIII и 12АI по ГОСТ 5781-82. Второй вид производится канатами системы предварительного напряжения оболочки (СПЗО), запасованными в каналы, выполненные из пластиковых труб, установленных в процессе строительства в теле оболочки. Внутренняя поверхность герме-

тичной части выполнена из листовой стали толщиной 8 мм. Кроме того, конструктивными элементами оболочки являются консоли, встроенные одним концом в ее тело, и предназначенные для установки в гермообъеме грузоподъемных машин и иного вида оборудования.

Конструктивное решение опорного кольца и купольной части аналогичны тем, что применяются в цилиндрической части (рис. 1.6). На опорном кольце монтируются элементы системы предварительного напряжения оболочки.

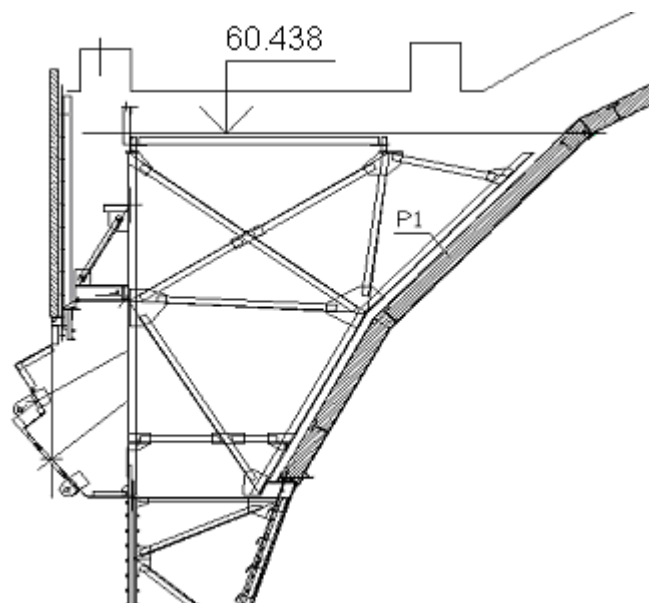


Рисунок 1.6. Узел сопряжения цилиндрической части оболочки и купола

При расчете оболочки на воздействие нагрузки от проектной аварии одновременно осуществляют учет влияния воздействия от проектного землетрясения. Установленный уровень сейсмической опасности максимального расчетного землетрясения – 7 баллов по MSK-64 и 6 баллов ПЗ-6. При предпусковых испытаниях моделируется данная экстремальная ситуация путем формирования избыточного давления в гермообъеме, равного 0,46 МПа. При этом в любом сечении оболочки при воздействии на строительные элементы расчетных нагрузок должно выполняться условие прочности.

Расчетный анализ оболочки выполняется в два этапа. На первом этапе определяется минимальный уровень усилий обжатия ЗГО, при этом стальной герметизирующий лист не входит в состав расчетного сечения и его заменяют нагрузкой, равной силе распора. Коэффициент трения каната о стенки кана-

лообразователя принимается  $m = 0,085$ , усадка бетона не рассматривается в качестве фактора, вызывающего потерю преднапряженности. На втором этапе проводится проверка необходимого уровня усилия обжатия ЗГО условием прочности. При выполнении прочностных расчетов используются программные комплексы Precont-Cobef, VERSEC, GRATHER2, а также рабочая станция HEWLETT PACCARD, предназначенная для определения внутренних усилий, преднапряжения, прогрева конструкций и сейсмических воздействий.

По результатам расчетов в армоканатах на любом участке безмоментной зоны цилиндрической части оболочки усилия должны быть не менее 6914 кН, на любом участке купольной части – 7911 кН. После учета потерь от трения по длине армоканатов определяются требуемые усилия на натяжных анкерах в любой момент эксплуатации защитной оболочки, они составляют:

- для армоканатов цилиндрической части – 8425 кН;
- для армоканатов купольной части – 8435 кН.

Рассматриваемая система преднапряжения была разработана в семидесятых годах XX в. для оболочек АЭС головной серии (пятый блок Нововоронежской АЭС, первые блоки Калининской и Южно-Украинской АЭС). В оболочках этого типа использовалось 256 арматурных канатов, в том числе 184 в цилиндрической части и 72 в купольной. При дальнейшем совершенствовании СПЗО, благодаря применению геликоидальнопетливой схемы расположения арматурных канатов в цилиндрической части и ортогонально-петлевой в купольной, удалось сократить число канатов до 132 штук, в том числе до 96 в цилиндрической части и 36 в купольной (рис. 1.7, 1.8).

Арматурный канат состоит из 456 параллельно уложенных высокопрочных стабилизированных проволок диаметром 5 мм из углеродистой стали 5В1400-Р1 гост 7348-81. На концах арматурный канат имеет две анкерные петли. С помощью лидера канат монтируется в канал защитной оболочки. После монтажа каната лидер заменяют вторым коушем и производят натяжение.

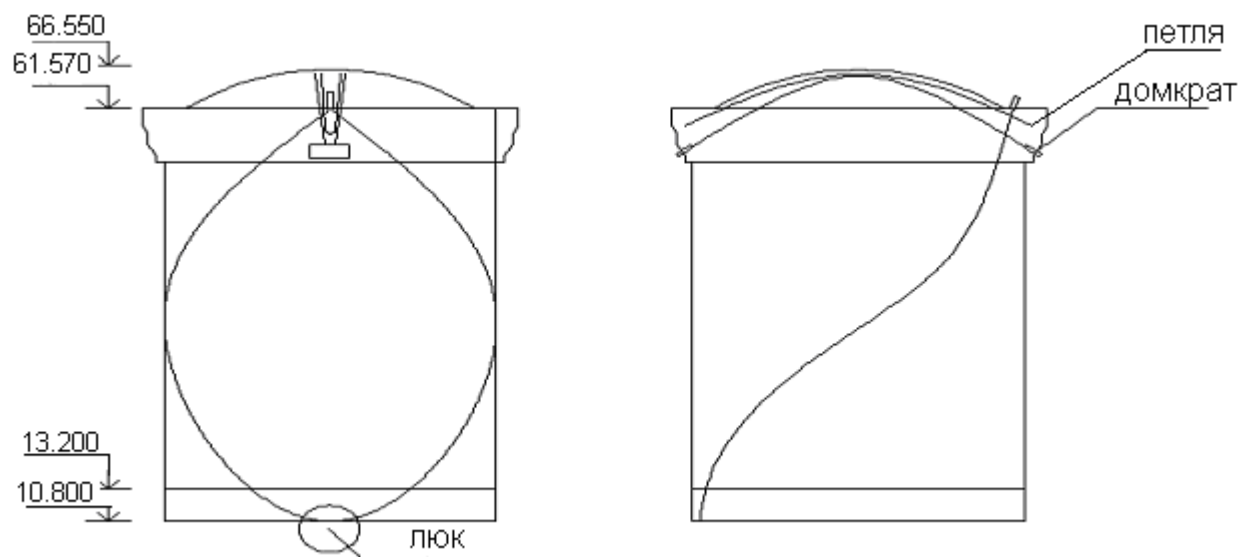


Рисунок 1.7. Схема расположения канатов в цилиндрической и купольной частях защитной оболочки

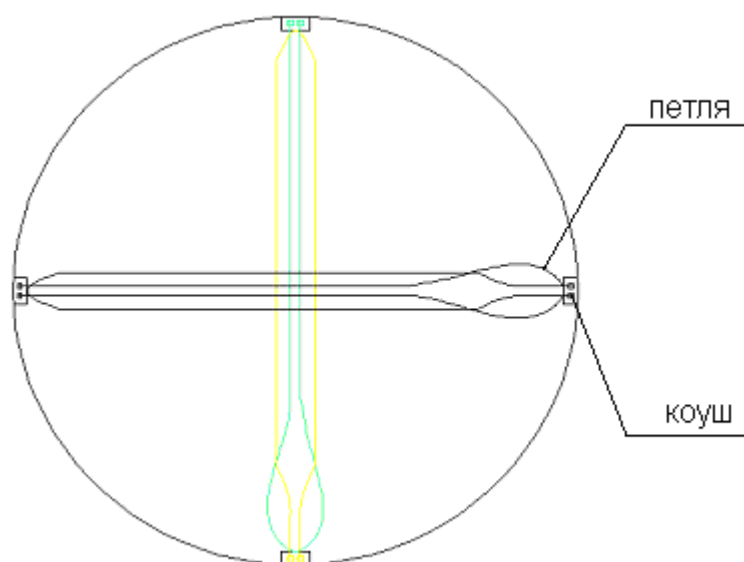


Рисунок 1.8. Схема взаимного расположения канатов в купольной части защитной оболочки

Начало работ по натяжению СПЗО начинают по истечению девяностодневного срока после достижения 100% проектной прочности бетона. В период подготовительных работ проводят тщательный контроль документации и оценку соответствия оборудования и материалов проекта. Особое внимание уделяют измерению длины канатов и проверке их поперечного сечения. Проверка сечения производится путём протаскивания шаблона (лидера) диаметром 190 мм и длиной 250 мм. Измерение

фактической длины выполняется при помощи мерной проволоки длиной 115 м и дублируется акустическим прибором «ЗВУК-3М». Оборудование и канаты располагаются на опорном кольце и обстройке реакторного отделения.

После проведения подготовительного этапа проводят работы по натяжению арматурных канатов, эти работы включают в себя протаскивание арматурных канатов в каналобразователи и процесс их натяжения. При работе используются домкраты ДГ-650/1200 (рис. 1.9).

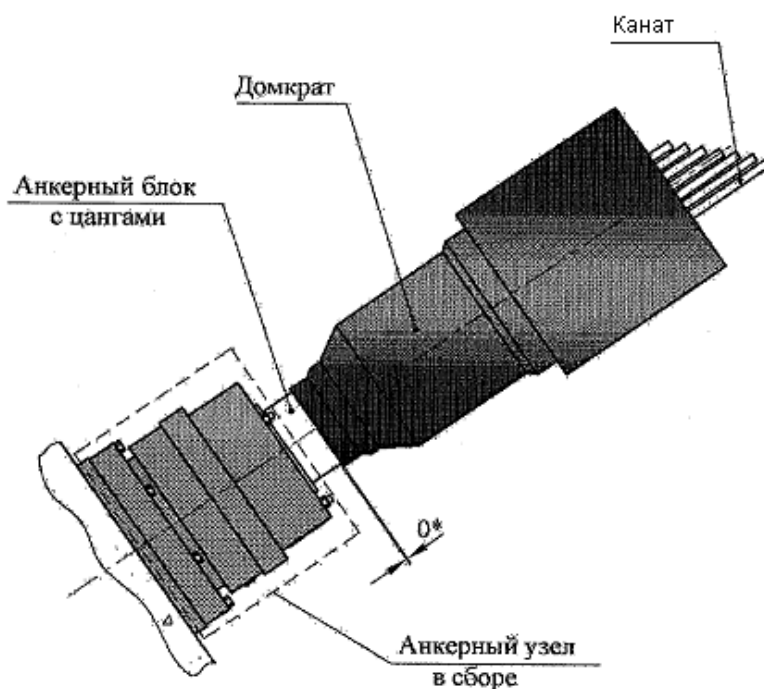


Рисунок 1.9. Общая схема домкратного узла

Ввиду сложности конструкции оболочки процесс натяжения разбивают на пять этапов:

- 1) производится натяжение всех канатов цилиндрической части и купола до усилия в 600 т. При этом придерживаются строгой последовательности натяжения канатов;
- 2) производится подтяжка канатов цилиндрической части до усилия в 800 т, соблюдая такую же последовательность;
- 3) производится подтяжка канатов купольной части до усилия в 800 т, соблюдая такую же последовательность;

4) выполняется натяжение цилиндрической части оболочки с усилием в 1000 тс в произвольном порядке, исключая последовательное. По завершению работ устанавливается перерыв в 1000 часов;

5) выполняется подтяжка всех канатов купола усилием 1000 тс и подтяжка всех канатов цилиндрической части с усилием 1000 тс.

После завершения напряжения оболочки проводят консервацию узлов крепления канатов к опорному кольцу, в дальнейшем при проведении планово-предупредительных ремонтных работ проверяют усилие натяжения канатов и при необходимости проводят подтяжку либо замену каната.

Во время эксплуатации АЭС ведется непрерывный мониторинг работы всех систем, в том числе и защитной оболочки. Эксплуатационная пригодность защитной оболочки определяется соответствием множества проектных требований, таких как соответствие геометрических параметров, качества материала, уровня преднапряжения и т.д. Контроль геометрических параметров осуществляется в период возведения оболочки, во время её сдачи в эксплуатацию, а также в период испытания на прочность. Качество материала изготовления подтверждается в процессе строительных работ, а также в период эксплуатации. Уровень преднапряжения защитной оболочки ВВЭР-1000 производят непрерывно, так как на уровень натяжения канатов может оказывать воздействие множество факторов, таких как температура, усадка бетона, релаксация строительных элементов ЗГО и растяжение самих канатов. Основные методы контроля уровня натяжения армоканатов приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Методы контроля уровня натяжения армоканатов

№	Метод	Период проведения измерений
1	Измерения усилия в арматурных канатах при помощи гидродомкрата ДГ 650/1200	Преднапряжение защитной оболочки и ППР
2	Измерение усилий на натяжных анкерах арматурных канатов с помощью датчиков НВ005	Постоянно
3	Измерение НДС герметичной оболочки с помощью датчиков контрольно-измерительной аппаратуры	Постоянно
4	Экспертная система оценки НДС защитной оболочки на базе программного комплекса CONT (разработана ИБРАЭ РАН, перспективная)	Постоянно. Применяется на первом энергоблоке РоАЭС и КАЛИНИНСКОЙ

## 1.5. Испытания защитной оболочки: назначение, задачи и программы

Одним из основных назначений защитной оболочки является исключение возможности попадания радиоактивного пара и веществ деления в атмосферу при расчетной аварии, в соответствии с этим для оценки соответствия расчетных параметров ЗГО и фактических перед сдачей в эксплуатацию проводят ее испытания на герметичность и прочность. Защитные оболочки реакторных отделений относятся к сооружениям 2 класса безопасности по ПНАЭ Г-1-011-89/97, к 1-й категории сейсмостойкости по ПНАЭ Г-5-005-87 и ответственности за радиационную и ядерную безопасность, обеспечение функционирования размещаемого в них оборудования и систем по ПиН АЭ-5.6. Согласно ОПБ-88/97, системы и элементы АС, важные для безопасности, должны проходить «...прямую и полную проверку на соответствие проектным характеристикам при вводе в эксплуатацию, после ремонта и периодически в течение всего срока службы АС. Проектом должна быть предусмотрена возможность диагностики состояния систем безопасности и элементов, важных для безопасности, отнесенных к классам 1 и 2, и возможность их испытания в условиях, максимально имитирующих аварийные».

Целью проведения испытания ГО являются:

- проверка соответствия выполненных работ требованию проекта;
- определение фактического значения утечки из герметичного ограждения;
- подтверждение соответствия герметичного ограждения требованиям прочности;
- подтверждение проектного уровня НДС защитной оболочки на всех ступенях испытательного давления.

Перед началом испытаний проводят осмотр проходок, шлюзов и внутренней поверхности оболочки на предмет обнаружения брака, затем приступают к их локальным испытаниям.

На подэтапе испытаний проводится проверка герметичной оболочки разряжением. С помощью ремонтно-аварийной вентиляционной системы со-

здаётся разряжение воздуха до величины 5000 Па (500 мм. вд. ст.) и проводится визуальный осмотр с применением средств обнаружения утечек. После завершения испытаний давление внутри оболочки повышается до атмосферного. Обнаруженные дефекты устраняются, и проводится повторное испытание до получения положительного результата.

Испытание ГО на герметичность и прочность избыточным давлением производится путём повышения давления в оболочке с помощью компрессора (рис. 1.10). Повышается избыточное давление до величины 0,07 МПа, проводится снятие показаний приборов контроля воздушной среды ГО и определяется величина утечки воздуха. При помощи струнных датчиков определяется НДС защитной оболочки, при отсутствии дефектов давление повышается до следующей ступени. При избыточном давлении, равном 0,47 МПа, регистрируются показания приборов, и давление в ЗГО снижают до следующей ступени. График изменения давления в герметичной оболочке изображен на рис. 1.11.

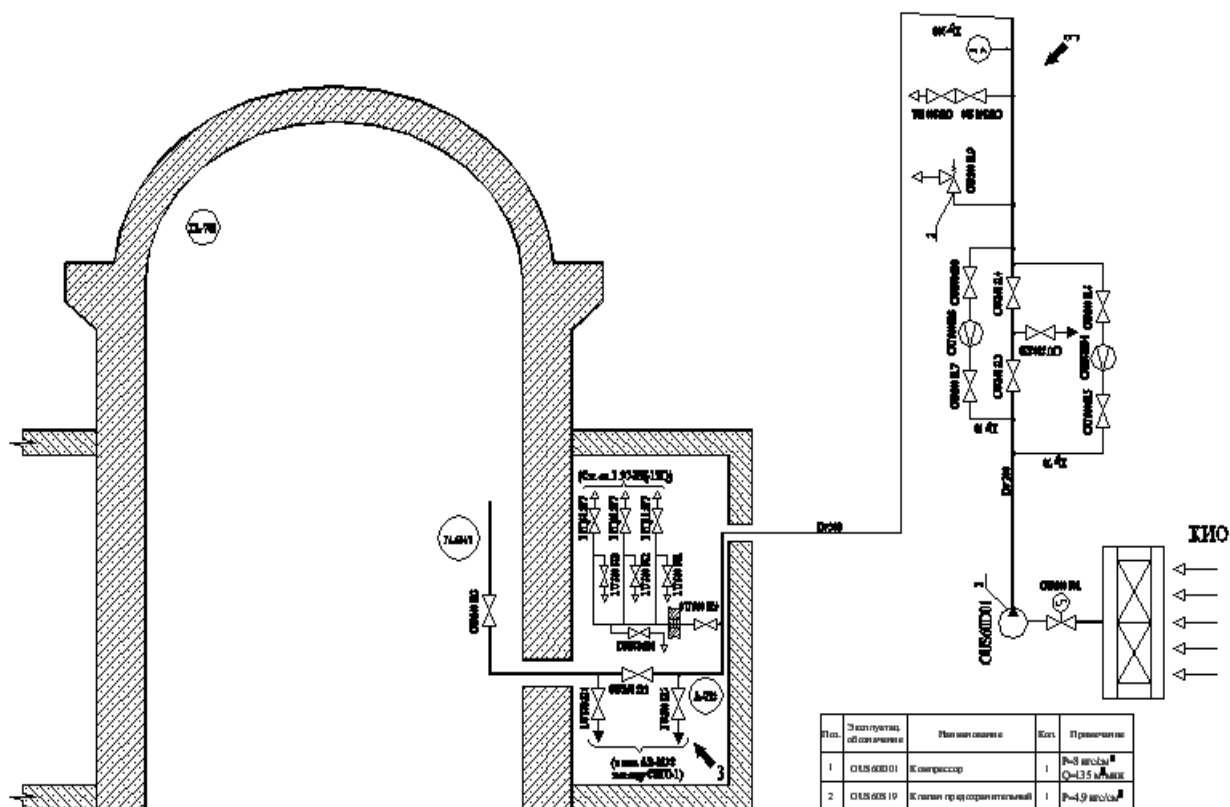


Рисунок 1.10. Схема оборудования для испытания защитной оболочки давлением



Рисунок 1.11. График изменения давления в ГО при ее испытаниях

Результатом испытаний ЗГО на герметичность и прочность являются ведомости выявленных дефектов, оформленный акт об устранении дефектов при необходимости, протокол регистрации параметров при испытаниях ЗГО на герметичность, протокол регистрации параметров при испытании ЗГО на прочность, протокол о результатах испытаний ГО на герметичность и прочность согласно правилам ЛСБ, в котором должен быть отражен ход пусконаладочных испытаний, указаны достигнутые результаты, сделаны выводы и предложения.

## 1.6. Системы мониторинга технического состояния защитных оболочек

Для контроля изменения параметров 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.

В качестве первичных средств измерений в системе используются струнные измерительные преобразователи (СИП), они делятся на несколько типов ПСАС (измерение усилий в стержневой арматуре), ПЛДС (измерение

деформации бетона), ПТС (температура бетона), ПЛПС (перемещение стенки конструкции). СИПы типа ПСАС, ПЛДС, ПТС закладываются в тело оболочки и используются в течение всего срока службы оболочки в неперевариваемом режиме, типа ПЛПС – устанавливаются на металлической облицовке и могут быть заменены. Места установки преобразователей указаны в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Места расположения преобразователей в защитной оболочке

Тип преобразователя	Место расположения.
ПСАС	Ввариваются в стержневую арматуру у наружной и внутренней поверхности; в середине сечения несущей стенки оболочки
ПЛДС	В усадочном конусе и середине стенки
ПТС	В трёх точках по толщине стенки
ПЛПС	На металлической облицовке в средней её части

Преобразователь ПЛПС-160 предназначен для телеизмерения раскрытий швов, трещин и деформаций массивов мягких и скальных грунтов и величин перемещений конструктивных элементов строительных конструкций (рис. 1.12). Преобразователь содержит струнный виброчастотный преобразовательный элемент, присоединенный с одной стороны к корпусу, а с другой – к масштабной пружине, свободный конец которой прикреплен к перемещаемому относительно корпуса штоку. Перемещение вызывает изменение растягивающего усилия в струне и частоты ее собственных колебаний.

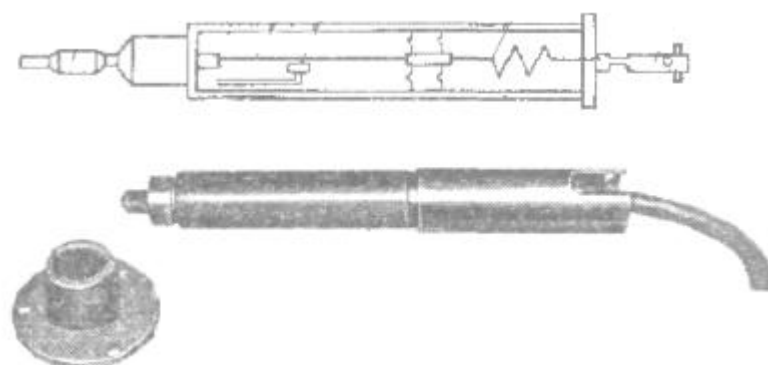


Рисунок 1.12. Преобразователь линейных перемещений типа ПЛПС-160

Преобразователи ПЛПС-160 используют в основном для измерения раскрытий швов и величин перемещений конструктивных элементов строи-

тельных конструкций. Измерители получают путем присоединения к преобразователям базообразующих элементов требуемой длины. Преобразователь ПЛПС-160 имеет следующие технические характеристики:

диапазон измерения, мм	0–160
пределы диапазона рабочих частот, Гц	700–2000
диапазон изменения частоты выходного сигнала, Гц	$1000 \pm 300$
диаметр, мм	48
длина, мм	400
масса, кг	2,7

Преобразователь линейных деформаций (ПЛДС) С-110 (рис. 1.13) спроектирован для закладки в мелкозернистый бетон с целью измерения напряжения, вызванного изменением нагрузки. Величина напряжения оценивается по известному модулю упругости материала. Наиболее широко струнные тензодатчики используются при мониторинге дамб, насыпей, объектов ядерной промышленности, мостов.



Рисунок 1.13. Преобразователь линейных деформаций С-110

Преобразователь состоит из тонкостенной трубки с двумя стальными головками, припаянными к концам датчика. Расстояние между бортами головок определяет длину датчика. В центральной части датчика в малом прямоугольном корпусе располагаются электромагнитное возбуждение и воспринимающая катушка. Электрическое сопротивление одного из электромагнит-

ных колец обеспечивает данные о температуре. Преобразователь С-110 имеет следующие технические характеристики:

диапазон, мкм	2900
разрешение, мкм	0,35
коэффициент тензочувствительности	0,3
сопротивление катушек, Ом	90
рабочая температура, °С	от -20 до +80
общая длина датчика, мм	144
длина измерительной части, мм	110

Струнный датчик деформации в арматуре (ПСАС) модели IRHP-2000 (рис. 1.14) состоит из полого арматурного стержня, в котором соосно установлен струнный тензодатчик. Сжатие или растяжение арматурного стержня измеряется напрямую тензодатчиком. Датчики напряжения арматуры проходят индивидуальную калибровку, соотносящую механическое напряжение и нагрузку. Датчики могут поставляться с необработанными (голыми) концами для непосредственного приваривания в арматурный каркас или с концами, имеющими резьбу, для ввинчивания в арматурный стержень. Также доступны адаптеры для существующих систем соединения арматуры.



Рисунок 1.14. Струнный датчик деформации в арматуре IRHP-2000

Датчики напряжения арматуры поставляются со встроенным датчиком температуры. Струнный датчик деформации в арматуре IRHP-2000 имеет следующие технические характеристики:

диапазон, мкм	3000
разрешение, мкм	0,4
рабочая температура, °С	от -20 до +80
термодатчик, кОм	3
длина арматуры, м	1

ПТС TermoTC датчик температуры (рис. 1.15) состоит из термопары и модуля ZET 7120, который осуществляет преобразование сигнала с датчика в значения температуры. Технические характеристики следующие:

диапазон, °С	от -50 до +100
частота выдачи данных, Гц	1,4
рабочая температура, °С	от -50 до +100



Рисунок 1.15. Датчик измерения температуры тела бетона TermoTC

Для определения усилия в армоканатах защитных оболочек реакторных отделений используется система контроля, разработанная Научно-исследовательским институтом физических измерений. Данная система работает в комплексе с тензорезисторными датчиками силы НВ 005 (рис. 1.16), установленными между опорной плитой и анкером каната. Датчик состоит из

шести измерительных модулей и имеет следующие технические характеристики:

диапазон измерений, тс	0–1200
погрешность в составе системы контроля, %	2
напряжение питания, В	3–6,3
рабочая температура, °С	–45...+60
масса, кг	120



Рисунок 1.16. Тензорезисторный датчик силы НВ 005

На рис. 1.17 показана схема размещения струнных измерительных преобразователей (СИП), на рис. 1.18 приводится фотография усадочного конуса с датчиком ПЛДС, вмонтированным в армокаркас купольной части герметичной оболочки, а на рис. 1.19 – фотография датчика ПСАС, вмонтированного в армокаркас купольной части герметичной оболочки.

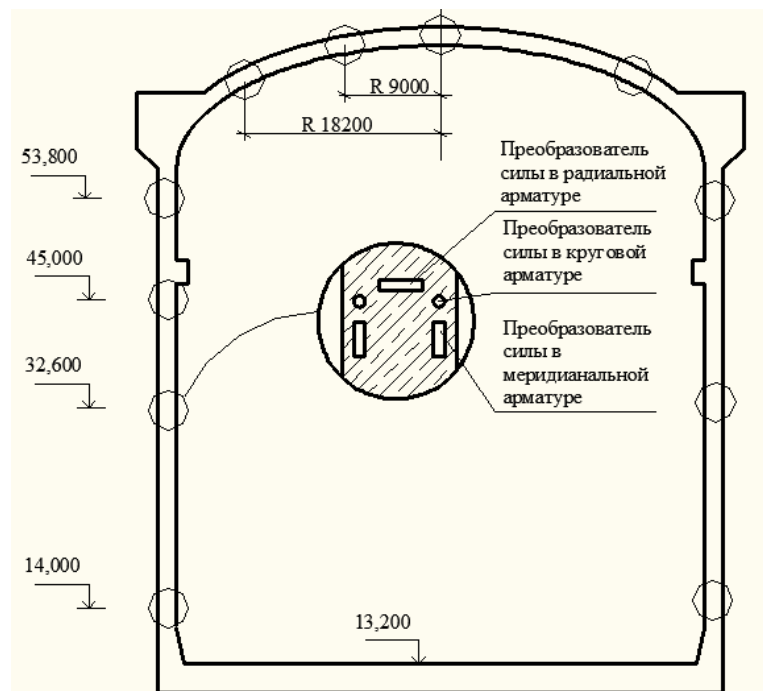


Рисунок 1.17. Схема размещения СИП по отметкам в герметичной оболочке



Рисунок 1.18. Усадочный конус с датчиком ПЛДС, вмонтированным в армокаркас купольной части герметичной оболочки

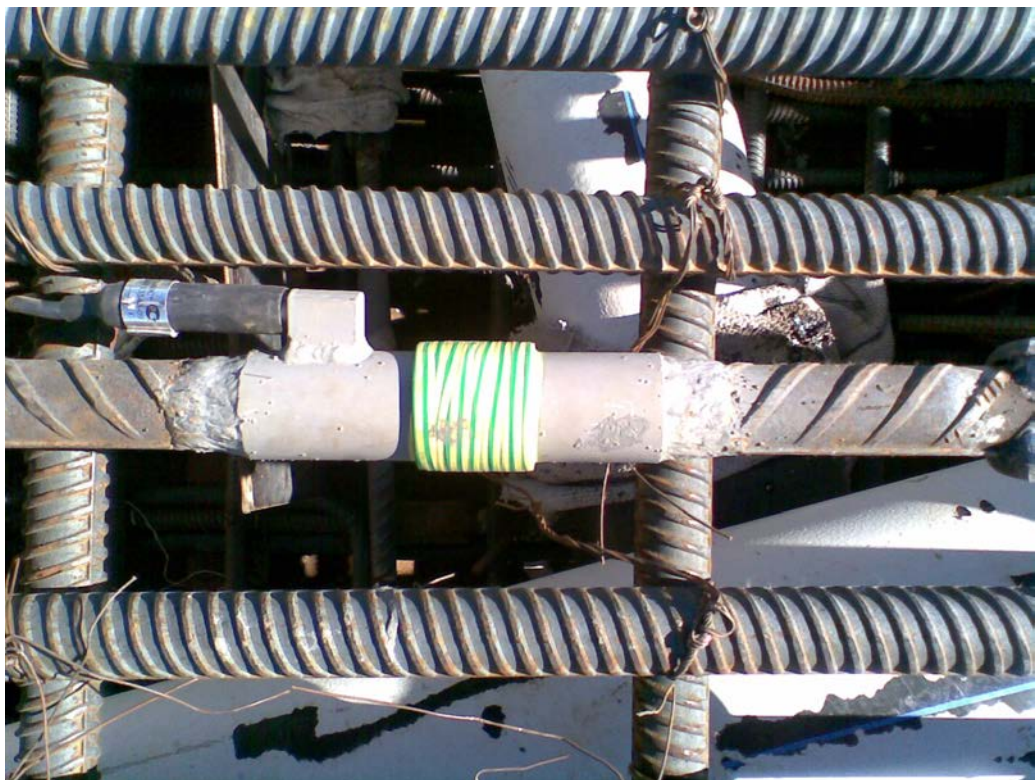


Рисунок 1.19. Датчик ПСАС, вмонтированный в армокаркас купольной части герметичной оболочки

Первичные средства измерения штатной системы установлены в наиболее характерных зонах защитной оболочки, в четырех горизонтальных сечениях цилиндра и трех сечениях купола по четырём вертикальным створам.

Наиболее полно преобразователями оснащен первый створ. Опыт эксплуатации первого энергоблока Ростовской АЭС показал, что при вводе в эксплуатацию было включено в работу около 50% СИП от их проектного числа. На втором блоке РоАЭС при его пуске удалось включить в работу 156 преобразователей, что составляет 56% [46, 47]. Отказ датчиков происходит по следующим причинам:

- повреждение их в процессе бетонирования;
- обрыв шины в теле бетона;
- изменение тарировочных характеристик датчиков в течение срока службы герметичной оболочки при отсутствии возможности поверки.

Устройства коммутации, управления и регистрации объединены в систему АМЦ 11815, производства ОАО «НИИ Контрольприбор». Структурная схема автоматизированной системы контроля НДС защитной оболочки показана на рис. 1.20.

Программа наблюдения НДС защитной оболочки делится на несколько периодов: при возведении, во время преднапряжения, в период приёмосдаточных испытаний, в течение эксплуатации.

При возведении оболочки измерения по СИП выполняются:

- перед установкой СИП;
- после установки СИП;
- в процессе бетонирования один раз в пять суток;
- в дальнейшем три раза в месяц.

В период преднапряжения измерения по СИП выполняются:

- перед началом и после завершения обжатия в течение трех дней;
- с момента начала обжатия один раз в два дня;
- после завершения испытаний один раз в десять дней.

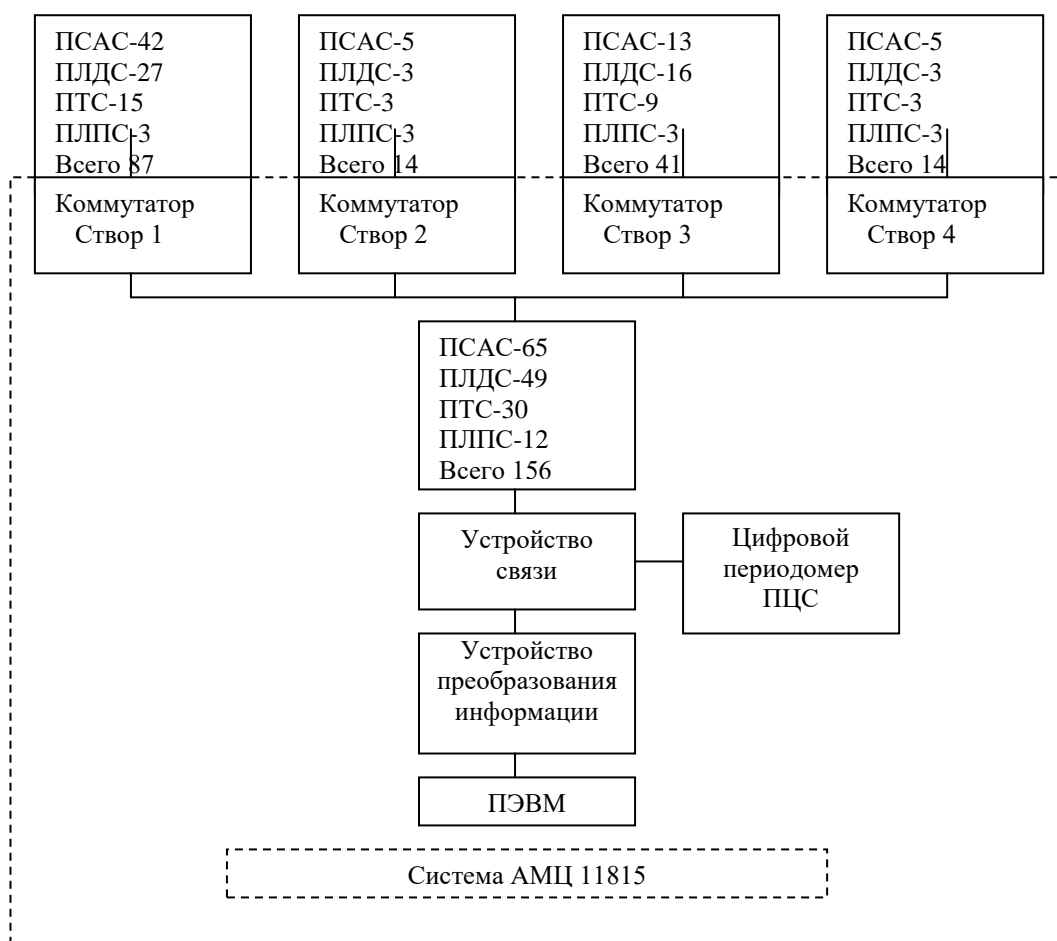


Рисунок 1.20. Блок-схема автоматизированной системы контроля НДС

В период приёмо-сдаточных испытаний:

- перед началом испытания не менее трех дней;
- на каждой ступени давления не менее трёх раз;
- после сброса давления не менее трех дней.

В период эксплуатации измерения производятся два раза в течение первого года и один раз в последующие. Оценка работоспособности аппаратуры выполняется на основе проверки пропорциональности приращений измеряемых контролируемых параметров величинам приращения испытательного давления.

Кроме встроенной штатной системы контроля НДС, институтом Безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук «ИБРАЭ

РАН» для оценки технической пригодности ЗГО разработана экспертная система. При этом были разработаны математические модели и программные модули для проведения исследований по анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек АЭС при воздействии эксплуатационных и аварийных нагрузок. Основными элементами экспертной системы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек АЭС являются:

- датчики НВ 005 измерения усилия армоканатов;
- модель железобетонной предварительно напряженной защитной оболочки в масштабе 1:4 (SANDIA);
- аттестованный программный комплекс CONT, предназначенный для численного моделирования НДС оболочек АЭС при статических эксплуатационных и аварийных нагрузках.

Основой методики расчета НДС защитной оболочки являются математические соотношения метода конечных элементов. С целью повышения эффективности вычислительного алгоритма и возможности его применения для расчета НДС сложных реальных конструкций традиционная конечно-элементная методика дополнена надстройкой в виде суперэлементного алгоритма, дающего возможность поэтапного расчета НДС конструкций и учета повторяемости геометрии отдельных фрагментов. Программный комплекс позволяет выполнять расчеты защитных оболочек следующих типов: железобетонных оболочек без предварительного напряжения; предварительно-напряженных железобетонных оболочек; оболочек из стали. При этом для каждого типа оболочек строится своя расчетная модель, которая учитывает особенности геометрических параметров оболочки, ее армирование, физико-механические характеристики используемых материалов, расположение напрягаемых арматурных канатов. Программный комплекс дает возможность проводить линейно-упругие, нелинейные упругопластические расчеты, а также расчеты с учетом растрескивания железобетона для различных статических эксплуатационных и аварийных нагрузок, в том числе и температур-

ных. Он включает подсистемы автоматического формирования конечно-элементных моделей, расчета температурных полей, расчета НДС, графической обработки результатов. С использованием ПК CONT проведены расчеты НДС и обоснована безопасность как реальных защитных оболочек (Калининской, Ростовской, Нововоронежской АЭС), так и моделей защитных оболочек, построенных в США. При выполнении расчетов моделей защитных оболочек учитывали следующие факторы:

- действие нагрузки от предварительного напряжения арматурных канатов, учитывающее основные факторы: нагрузка в расчетной модели моделировалась от каждого каната в отдельности; фактические траектории арматурных канатов задавались с учетом их расположения в однородной зоне и зоне крупной технологической проходки; нагрузка от преднапрягаемых арматурных канатов определялась с учетом факторов, вызывающих потери предварительного напряжения в них;

- действие нагрузки от собственного веса конструкции;

- действие на конструкцию внутреннего давления.

В расчетах первоначально определяется НДС оболочки от воздействия преднапряжения, затем прикладывается нагрузка от внутреннего давления. Результаты расчета позволили установить уровни давления, приводящие к появлению первой трещины в бетоне в зависимости от типа напряжений. Показано, что начало пластических деформаций кольцевой арматуры в цилиндре произойдет при давлении  $P = 1,22$  МПа. Первая трещина в бетоне купола (на полусфере) выше угла  $45^\circ$  произойдет при давлении  $P = 0,94-0,98$  МПа, а ниже данного угла – при давлении  $P = 0,9$  МПа. Установлено, что достижение кольцевыми канатами деформации от 1% до 3% произойдет при давлении от 1,15 до 1,26 МПа. Анализ работы элементов, установленных в защитных оболочках 1-го и 2-го энергоблоков Калининской АЭС и проработавших достаточно длительный период времени, позволяет рассчитывать возможность создания корректной системы оценки фактического состояния защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1000 на основе программы расчета напряженно-

деформированного состояния конструкции и данных датчиков КИА [47].

Для определения усилия в армоканатах защитных оболочек реакторных отделений используется система контроля, разработанная Научно-исследовательским институтом физических измерений. Данная система работает в комплексе с тензорезисторными датчиками силы НВ 005, установленными между опорной плитой и анкером каната.

Третьим комплексом работ, выполняемым с целью мониторинга зданий и сооружений АЭС, является геодезический мониторинг, осуществляемый на всех производственных объектах. В рамках данного комплекса работ осуществляется определение кренов и осадок сооружений. При этом в первые пять лет эксплуатации наблюдения производятся два раза в год, затем наблюдения совмещают с планово-предупредительными ремонтами, которые проводят один раз в год.

Согласно РД ЭО 0624-2005 «Типовая инструкция по эксплуатации производственных зданий и сооружений атомных станций» мониторинг строительных конструкций – это система наблюдений и контроля, производимых регулярно от начала строительства до снятия с эксплуатации по определенной программе для оценки состояния строительных конструкций и сооружений в целом, анализа происходящих в них процессов и своевременного выявления изменения функциональной способности.

Оценка состояния строительных конструкций на основе результатов измерений деформаций оснований и фундаментов зданий и сооружений проводится в целях:

- определения абсолютных и относительных величин осадок и сравнения их с расчетными;
- выявления причин возникновения и степени опасности осадок для нормальной эксплуатации зданий и сооружений, принятия своевременных мер по борьбе с возникающими деформациями или устранению их последствий;
- получения необходимых характеристик устойчивости оснований и

фундаментов;

– уточнения расчетных данных физико-механических характеристик грунтов;

– уточнения методов расчета и установления предельно допустимых величин деформаций для различных грунтов оснований и типов зданий и сооружений.

Измерение осадок фундаментов зданий и сооружений производится методом геометрического или гидростатического нивелирования. Определение осадок в период эксплуатации производится с точностью, характеризующейся средней квадратической ошибкой определения осадки марки, установленной в самом слабом месте, не более 1 мм, что обеспечивается нивелированием II класса точности.

### **1.7. Анализ существующих систем контроля технического состояния герметичных оболочек АЭС**

Опыт эксплуатации существующих энергетических блоков показал, что вышеописанные системы не обладают достаточной надежностью и достоверностью получения информации о техническом состоянии защитных оболочек НП 1000. Это становится особенно актуальным во время эксплуатации и на стадии продления срока службы ЗГО.

Штатная встроенная автоматизированная система, как правило, вводится в эксплуатацию с потерей датчиков, которые по тем или иным причинам неработоспособны. Особенно это важно при завершении строительства энергетических блоков, находящихся на консервации в течение 10–15 лет, например, это третий и четвертый блоки Калининской АЭС, второй блок Ростовской АЭС, пятый блок Балаковской АЭС, где до 40 % датчиков неработоспособны [46]. Кроме того, вводимые в эксплуатацию датчики встраиваются в армокаркас путем сварки их концевиков с арматурными стержнями (температурные деформации), затем осуществляется бетонирование с вибрированием бетона (вибрационные

нагрузки) и, наконец, каждый горизонт, на котором смонтированы датчики, воспринимает вышерасположенную собственную массу ЗГО и, естественно, он не одинаков на различных горизонтах. Тарировка датчиков на стадии эксплуатации ЗГО невозможна. Заводской гарантийный срок эксплуатации датчиков установлен на срок 15–20 лет. При этом, по данным ИБРАЭ РАН, за каждые пять лет эксплуатации выходит из строя 5–6% датчиков СИП. Таким образом, встроенная штатная система не обеспечивает надежного определения технического состояния ЗГО при ее эксплуатации и, тем более, при продлении срока службы энергетических блоков, которые проводятся через 30 лет.

Достоверность экспертной системы оценки технической пригодности ЗГО, разработанной ИБРАЭ РАН, во многом зависит от адекватности математической модели оболочки и ее фактических параметров. Исследования показали, что прочностные свойства бетона на отдельных захватках бетонирования не соответствуют по прочности проектным значениям. Часто толщина стенки оболочки отличается от проектных значений. На участках, где арматура подверглась воздействию высоких температур, ее реологические свойства не соответствуют требованиям проекта. Таким образом, фактическое состояние оболочки неадекватно параметрам математической модели, что не позволяет достоверно отразить состояние ЗГО.

Геодезический мониторинг гражданских и промышленных зданий и сооружений не предназначен для оценки технического состояния ЗГО. В связи с этим необходима специальная методика геодезических измерений для определения технического состояния ЗГО.

### **1.8. Постановка цели и задачи исследования**

В рамках программы развития энергетического комплекса Российской Федерации введение в эксплуатацию новых энерго-генерирующих мощностей является определяющим фактором решения поставленной задачи. При

этом строительство новых АЭС – это необходимое условие эффективной реализации данной программы. В настоящее время проектируются, строятся, вводятся в эксплуатацию АЭС с реактором ВВЭР-1000 или его модификациями. Их всестороннее исследование и совершенствование является необходимым условием дальнейшего повышения уровня безопасности и эффективности работы данных объектов.

Особое место во всестороннем изучении элементов АЭС занимают исследования контуров защиты, одним из которых является защитная герметичная оболочка. Она характеризуется 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. На всех жизненных циклах ЗГО осуществляют определение и оценку ее технического состояния. Для этих целей разработаны и используются штатная встроенная система контроля и экспертная система. Однако данные системы обладают рядом недостатков [34, 66], которые делают их малоэффективными и не обеспечивают надежного определения текущего технического состояния ЗГО и оценки их остаточного ресурса. В соответствии с этим необходима альтернативная, мобильная геодезическая измерительная система, которая способна обеспечить получение объективной и достоверной информации об уровне НДС герметичной оболочки в любой момент и на любом этапе ее существования.

*Целью работы* является разработка методики геодезического контроля технического состояния защитных оболочек АЭС в период их преднапряжения, испытания и эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить *следующие задачи*:

– исследовать особенности работы строительных элементов ЗГО при приложении к ним сил в процессе преднапряжения и испытания оболочки с

целью определения максимально нагруженных зон;

– разработать методику построения мобильной геодезической диагностической системы для определения геометрических параметров ЗГО в период их преднапряжения, испытания и эксплуатации;

– разработать методику обработки результатов измерений и оценки технического состояния защитной оболочки;

– провести производственные испытания геодезической измерительной системы при диагностике технического состояния защитных оболочек АЭС в период их преднапряжения, испытания и эксплуатации;

– разработать рекомендации по применению геодезической измерительной системы при диагностике технического состояния защитных оболочек проекта АЭС-2006.

## 2. РАЗРАБОТКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС

### 2.1. Анализ работы строительных элементов герметичной оболочки при её преднапряжении и испытании

В данной работе исследуемым объектом является защитная оболочка реакторного отделения АЭС. Данный объект обладает сложным строительным решением и предназначен для обеспечения радиационной безопасности в районе размещения станции. Рассмотрим его с точки зрения физико-механических характеристик, проанализируем их проявление и взаимовлияние внутренних связей.

Конструктивно защитная герметичная оболочка состоит из купольной и цилиндрической частей (рис. 2.1). Строительное решение цилиндрической части оболочки таково, что рабочая арматура ориентирована по трём направлениям: радиальном, кольцевом и 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.

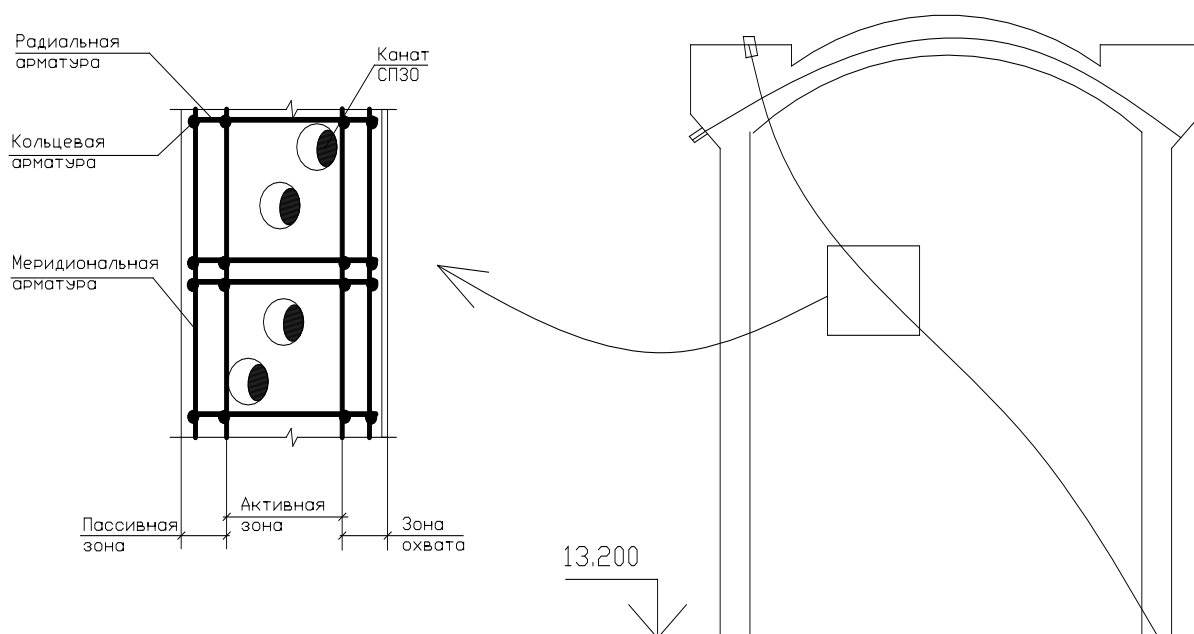


Рисунок 2.1. Схема защитной оболочки и расположения в ней рабочей арматуры и армоканатов

Рассматривая воздействие армоканатов при их натяжении на конструктивные элементы ЗГО, необходимо отметить, 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  $\overline{f_b}$  – вертикальную составляющие (рис 2.2). При этом воздействие  $\overline{f_p}$  определяет изменение формы оболочки, связанной с преобразованием ее из цилиндра в поверхность, имеющую вертикальное сечение стены гиперболической формы. Воздействие  $\overline{f_b}$  определяет вертикальное сжатие стенки оболочки.

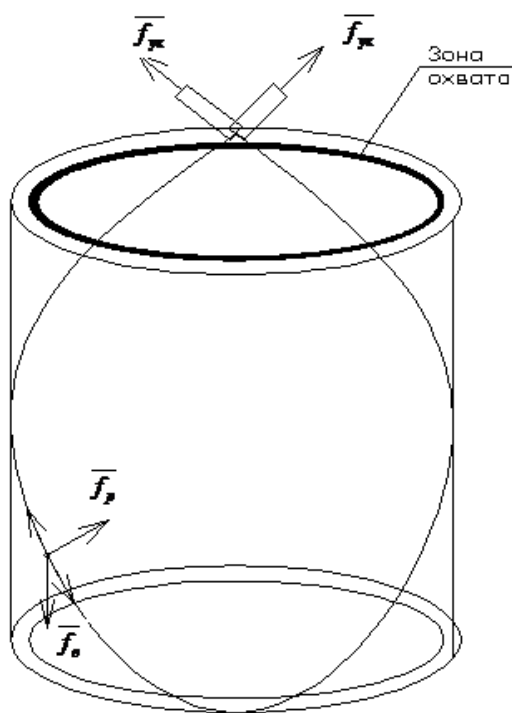


Рисунок 2.2. Схема цилиндрической части оболочки и воздействие на неё армоканата

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  $\overline{f_r}$  – горизонтальную составляющие (рис 2.3). При этом воздействие  $\overline{f_p}$  определяет изменение формы оболочки, связанной с из-

менением радиуса кривизны сферической поверхности, при этом ее воздействие направлено центростремительно и перпендикулярно касательной плоскости к деформационной поверхности. Горизонтальная составляющая  $\overline{f}_r$  компенсируется строительными элементами опорного кольца и фактически не оказывает никакого влияния на параметры купольной части ЗГО.

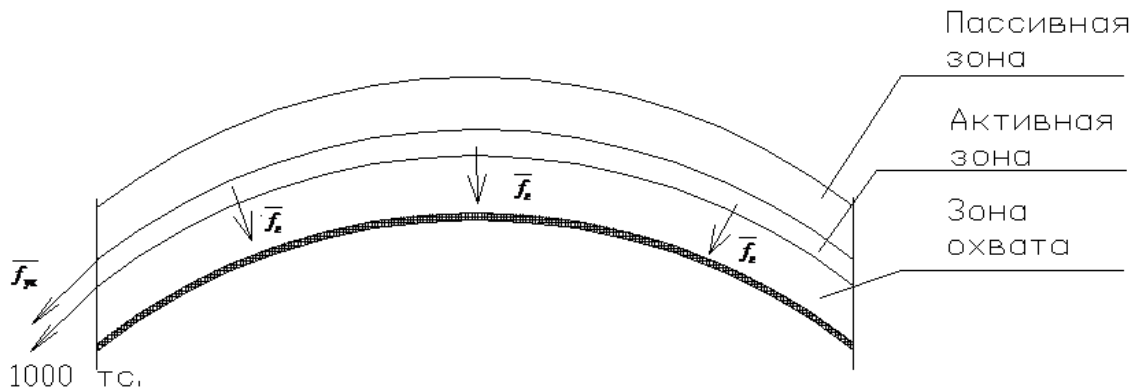


Рисунок 2.3. Схема купольной части герметичной оболочки и расположения в ней рабочей арматуры и армоканатов

Рассматривая фрагментарно воздействие радиальной составляющей  $\overline{f}_p$  на строительные элементы ЗГО, отметим, что каналобразователи расположены в средней части стены оболочки в три ряда. При этом воздействие канатов, расположенных в данных каналобразователях, на оболочку условно могут быть объединены и рассматриваться как единая активная зона конструкции. Общее усилие воздействия всех канатов, находящихся в данной зоне и в данном сечении, определится как

$$\overline{F}_{\text{п.сеч}} = \int_{h_i}^{h_{i+1}} \Omega(\overline{f}_p(h_0), h) dh, \quad (2.1)$$

где  $\overline{f}_p(h_0)$  – радиальная составляющая сила, полученная в результате разложения усилия натяжения  $\overline{f}_{ук}$  в начальной активной зоне;  $h$  – текущая отметка расположения активной зоны;  $\Omega(\overline{f}_p(h_0), h)$  – функция, определяющая изменение  $\overline{f}_p(h_0)$  от текущей  $h$ ;  $h_i, h_{i+1}$  – границы анализируемой активной зоны.

Кроме этого, в любом рассматриваемом сечении стены гермооболочки

могут быть выделены внутренняя и внешняя зоны, являющиеся таковыми по отношению к активной зоне (рис. 2.4).

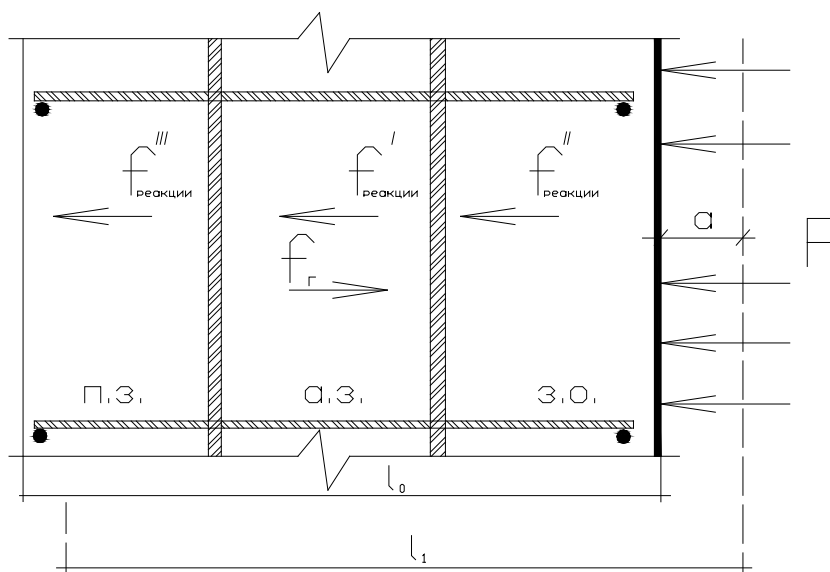


Рисунок 2.4. Схема стенки герметичной оболочки  
а.з. – активная зона; п.з. – внешняя зона; в.з. – внутренняя зона

Исследуя порядок работы сечения стены оболочки и считая при этом его выполненным из однородного и сплошного материала, отметим, что при воздействии  $\bar{F}_{p.сеч}$  на элементы данного сечения возникают силы реакции  $\bar{F}'_{Az.сеч}$ ,  $\bar{F}'_{Пз.сеч}$ ,  $\bar{F}'_{Зо.сеч}$  зон его составляющих. Данные силы определяются жесткостными параметрами данных зон и обеспечивают условие, направленное на сохранение формы данной зоны.

При условии  $\bar{F}_{p.сеч} - (\bar{F}'_{Az.сеч} + \bar{F}'_{Пз.сеч} + \bar{F}'_{Зо.сеч}) \leq 0$  герметичная оболочка сохраняет начальную форму соответствующей ее части. При невыполнении данного условия формируется процесс, следствием которого является преобразование формы оболочки из начального вида в деформированную. При этом распределение напряжений по поверхностям оболочки, связанных с изменением ее формы, в графическом виде изображено на рис. 2.5.

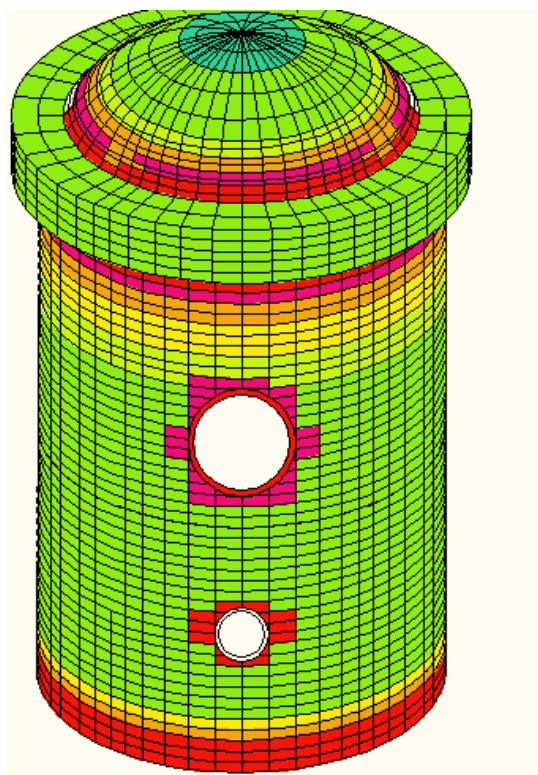


Рисунок 2.5. Схема распределения напряжений по поверхностям изотропной оболочки, связанных с изменением ее формы

Рассматривая распределение напряжений по продольному сечению оболочки, отметим, что в моментной зоне (зоне защемления стены) регистрируются максимальные по величине напряжения в пределах рассматриваемого сечения. В переходной зоне происходит закономерное уменьшение регистрируемых напряжений от значений максимальных величин до значений, соответствующих напряжениям, регистрируемым в безмоментной зоне, которые являются минимальными в пределах рассматриваемого сечения.

Данное распределение напряжений по поверхностям изотропной оболочки является следствием конструктивного решения оболочки и детерминировано деформациями, которые, в свою очередь, обусловлены перемещениями. Эпюры перемещений по продольным сечениям оболочки представлены в графическом виде на рис. 2.6.

Далее рассмотрим работу конструктивных элементов стен оболочки и, прежде всего, ее элементов армирования (арматуры) при обжатии. Как отмечалось выше, арматурные стержни оболочки расположены по трём направлениям: радиальному, кольцевому, меридиональному. Как было описано, при

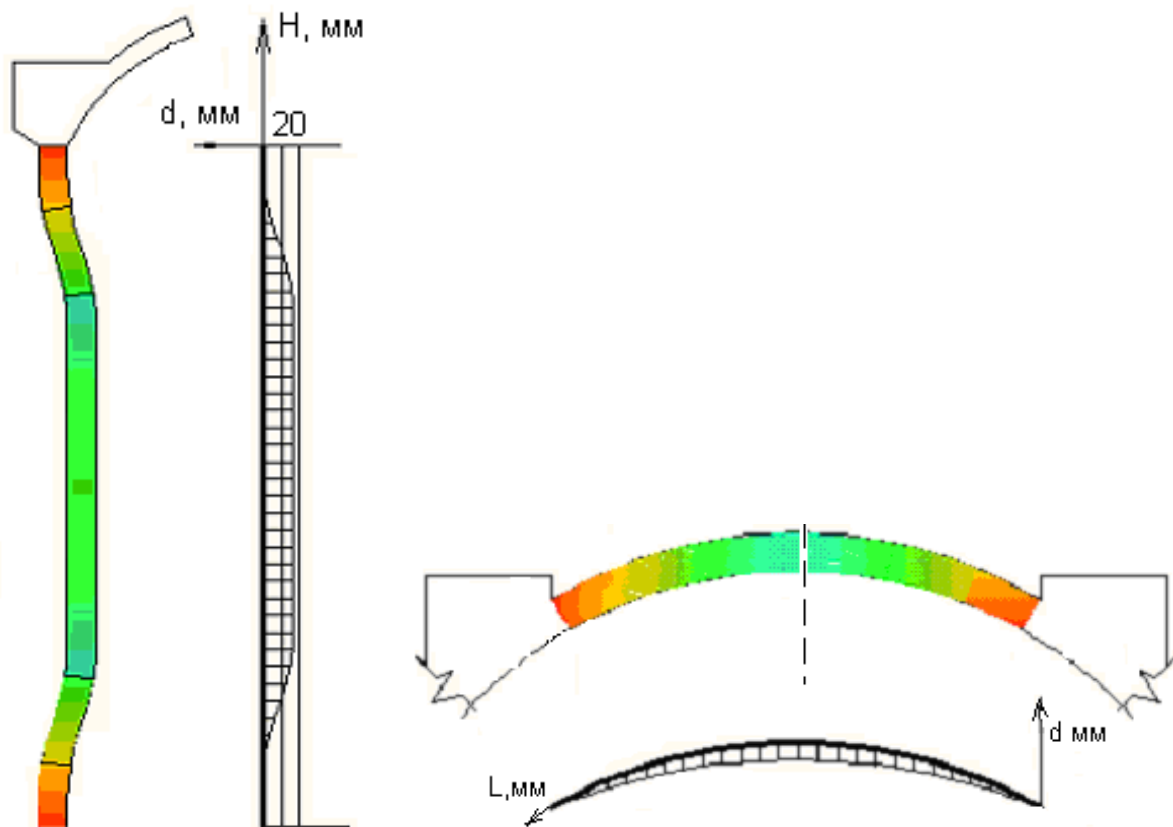


Рисунок 2.6. Эпюры перемещений

соответствующем воздействии  $\bar{F}_{p,сеч}$  на строительные элементы ЗГО происходит изменение их формы. При этом конструктивные компоненты элементов ЗГО включаются в работу, следствием чего является также их деформирование. В частности, кольцевая арматура работает на сжатие, стержневая радиальная – на растяжение, меридиональная арматура изменяет прямолинейную форму, приобретая изгиб (кривизну). Это является следствием того, что активная зона  $A_z$  непосредственно охватывает внутреннюю зону  $B_z$  и, воздействуя на нее, согласно работе частей (моментной, переходной, безмоментной) конструктивных элементов ЗГО, приводит к деформированию ее формы. Поэтому кольцевая арматура, расположенная в пределах внутренней зоны  $B_z$ , определяет, в том числе, ее жесткостные параметры и обеспечивает условие сохранения собственной формы и данной зоны в целом. Воспринимая нагрузку, кольцевая арматура внутренней зоны  $B_z$  работает на сжатие. Деформация кольцевой арматуры внутренней зоны  $B_z$  определится по формуле

$$\varepsilon_{B_3} = \frac{\Delta_{B_3}}{R_{B_3} - \Delta_{B_3}}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta_{B_3}$  – радиальное перемещение кольцевой арматуры внутренней зоны  $B_3$ ;  $R_{B_3}$  – начальный (исходный) радиус кольцевой арматуры внутренней зоны  $B_3$ .

Внешняя зона  $Пз$  охватывает активную зону  $Aз$  и непосредственного воздействия при обжати оболочки от нее не испытывает. Однако внешняя зона  $Пз$  непосредственно связана с активной  $Aз$  и внутренней  $Bз$  зонами стержневой радиальной арматурой, посредством которой увлекается в процесс обжати из-за деформирования формы последних. Воспринимая нагрузку, стержневая радиальная арматура работает на растяжение. Деформация стержневой радиальной арматуры определится формулой

$$\varepsilon_{B_3-Пз} = \frac{l_{T_i} - l_0}{l_{T_i}}, \quad (2.3)$$

где  $l_0$  – начальная (исходная) длина стержневой радиальной арматуры;  $l_{T_i}$  – длина стержневой радиальной арматуры в текущий момент времени  $T_i$ .

Кольцевая арматура, расположенная в пределах внешней зоны  $Пз$ , так же как аналогичная во внутренней зоне  $Bз$ , определяет, в том числе, ее жесткостные параметры и обеспечивает условие сохранения собственной формы и данной зоны в целом. Воспринимая нагрузку, кольцевая арматура внешней зоны  $Пз$  работает на сжатие

$$\varepsilon_{Пз} = \frac{\Delta_{Пз}}{R_{Пз} - \Delta_{Пз}}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta_{Пз}$  – радиальное перемещение кольцевой арматуры внутренней зоны  $Пз$ ;  $R_{Пз}$  – начальный (исходный) радиус кольцевой арматуры внутренней зоны  $Пз$ .

Усилия сжатия кольцевой арматуры внутренней  $Bз$  и внешней  $Пз$  зон при преднапряжении ЗГО неодинаковы. Причины отличия, прежде всего, связаны с тем, что геометрические размеры арматуры (длина) различны. Допуская, что в (2.2) и (2.4)  $\Delta_{B_3} = \Delta_{Пз}$ , при этом

$$R_{Пз} < R_{B_3},$$

тогда

$$\varepsilon_{Пз} < \varepsilon_{Вз}. \quad (2.5)$$

Кроме того, величины радиальных перемещений  $\Delta_{Вз}$  и  $\Delta_{Пз}$  стержневой радиальной арматуры не одинаковы. Учитывая деформацию стержневой радиальной арматуры, определим, что

$$\Delta_{Пз} = \Delta_{Вз} - (l_{T_i} - l_0). \quad (2.6)$$

Подставив (2.6) в (2.4), получим

$$\varepsilon_{Пз} = \frac{\Delta_{Вз} - (l_{T_i} - l_0)}{R_{Пз} - \Delta_{Вз} - (l_{T_i} - l_0)}. \quad (2.7)$$

Из этого следует, что неравенство (2.5) будет увеличиваться по сравнению с вышерассмотренным условием, когда  $\Delta_{Вз} = \Delta_{Пз}$ . При этом разность деформаций  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{Пз} - \varepsilon_{Вз}$  по любому продольному сечению оболочки будет максимальным при максимальных значениях  $\Delta_{Вз}$  и  $\Delta_{Пз}$ , что обуславливает формирование максимальной разности  $(l_{T_i} - l_0)$ . Эпюры напряжений кольцевой внутренней и внешней арматур, а также стержневой радиальной представлены в графическом виде на рис. 2.7.

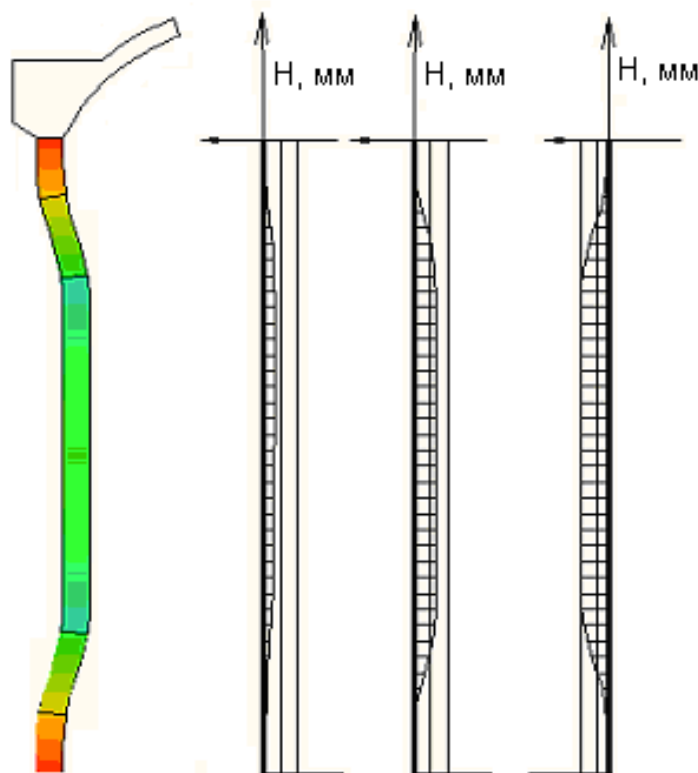


Рисунок 2.7. Эпюры напряжений кольцевой внешней, внутренней и стержневой радиальной арматур при обжатии оболочки

Из анализа эпюр, представленных на рис. 2.7, следует, что  $\Delta \varepsilon_{B_3-P_3} = \max$  регистрируется в безмоментной зоне как в цилиндрической, так и в купольной частях оболочки. Следовательно, в этих зонах  $(l_{T_i} - l_0) = \max$ . Данный вывод подтверждается математическим моделированием ЗГО, выполненным специализированной организацией, выводы которой приведены в материалах сборника [46]. При этом отмечается, что при  $\bar{F}_{p.cen} > 800$  т в стержневой радиальной арматуре возникают пластические деформации.

Рассматривая работу конструктивных элементов стен оболочки при ее испытаниях на прочность, отметим, что они осуществляются путем создания избыточного давления внутри гермообъема (рис. 2.8). При этом повышение давления производят несколькими этапами. Примерная схема программы повышения давления приведена в графическом виде ранее на рис. 1.11.

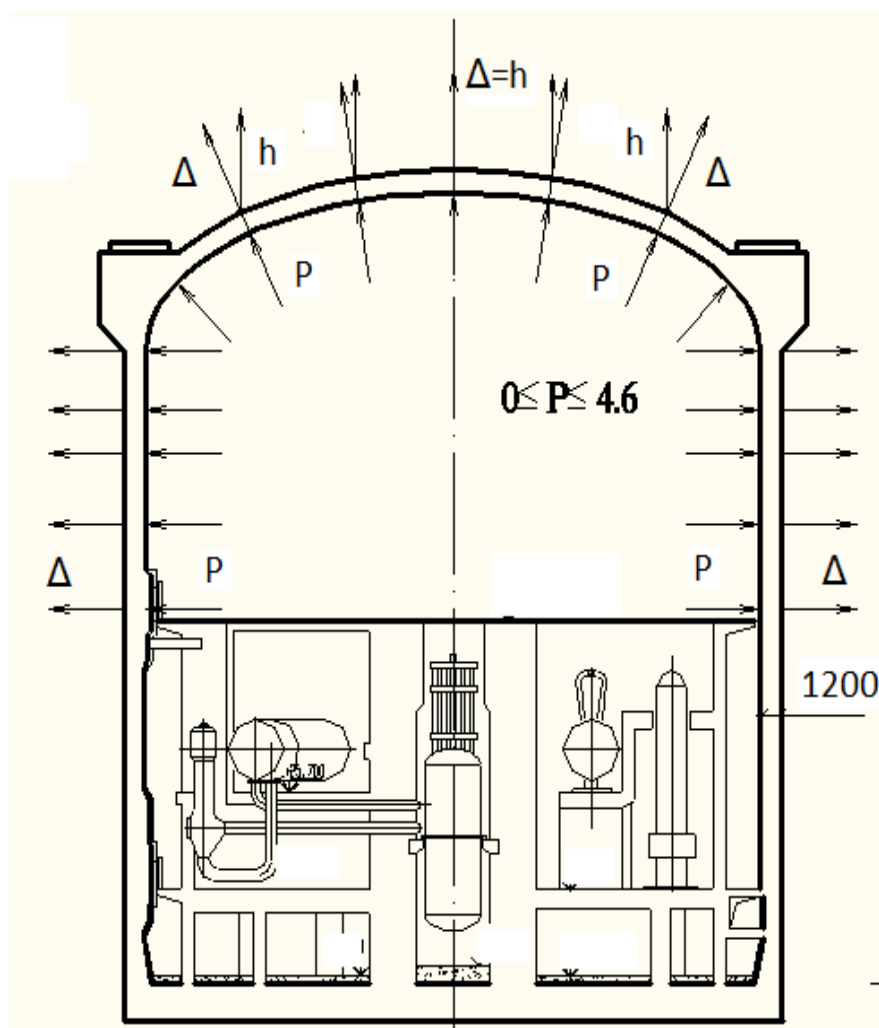


Рисунок 2.8. Схема создания избыточного давления внутри гермообъема

При увеличении давления в гермообъеме внутренняя поверхность зоны  $V_3$  испытывает воздействие от формируемого давления  $P_i$  (см. рис. 2.8). При соответствующих значениях  $P_i$  включаются в работу все строительные элементы внутренней зоны, далее через посредство  $V_3$  формируется воздействие на активную зону  $A_3$ , которая, в свою очередь, воздействует на внешнюю зону  $П_3$ . Таким образом, в процессе испытаний в период увеличения давления в гермообъеме происходит процесс, характеризующийся обратным перемещением частей оболочки в сравнении с процессом обжаривания. Данному процессу характерна разгрузка арматуры оболочки и, в частности, кольцевой и стержневой радиальной (рис. 2.9).

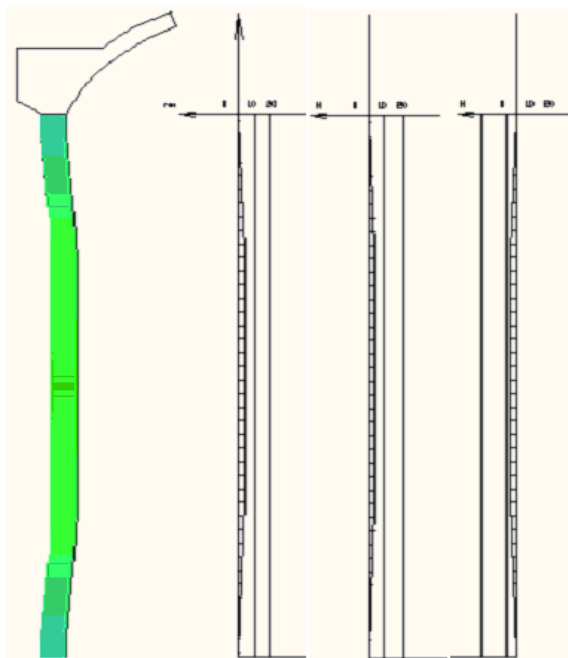


Рисунок 2.9. Эпюры напряжений кольцевой внутренней и внешней и стержневой радиальной арматуры при формировании избыточного давления в процессе испытаний оболочки

Согласно программе испытаний внутреннее избыточное давление  $P_i$  возрастает в пределах расчетных допустимых значений

$$0 < P_i \leq P_{\text{расч.доп.}}$$

При этом предельно допустимое значение определяет условие расчетной аварии  $P_{\text{расч.доп}}$ , при которой защитная оболочка обеспечивает выполнение своего функционального назначения в полном объеме. Для рассматриваемого типа оболочек  $P_{\text{расч.доп}} = 4,6$  атм.

В процессе испытаний оболочки на прочность путем создания избыточного давления в гермообъеме усилия, формируемые в ее конструктивных элементах, соответствуют выражению

$$\left[ \bar{F}_{\text{р.сеч}} - (\bar{F}'_{\text{Аз.сеч}} + \bar{F}'_{\text{Пз.сеч}} + \bar{F}'_{\text{Зо.сеч}}) \right] - \bar{F}(P_i) = \Delta F_i, \quad (2.8)$$

где  $\bar{F}(P_i)$  – усилие воздействия на оболочку, определяемое  $P_i$ .

В случае, когда  $\Delta F_i = 0$ , защитная оболочка восстанавливает геометрические параметры, соответствующие параметрам до ее обжатия. При условии  $\Delta F_i > 0$ , форма цилиндрической части оболочки преобразуется в бочкообразную, а купольная часть трансформируется в форму, связанную с изменением радиуса кривизны ее сферической поверхности.

Выполненный анализ позволяет определить информативные зоны, в которых происходят максимальные деформации строительных элементов ЗГО, в период её преднапряжения и испытания. При построении измерительной геодезической системы для решения задач контроля необходимо обеспечить учет особенностей работы строительных элементов защитной оболочки.

## 2.2. Разработка методики оценки технического состояния ЗГО

В результате приложения внешних сил к любому материальному объекту происходит взаимное перемещение его частей, т.е. происходит изменение его формы или деформирование. Если после снятия нагрузки материальный объект восстанавливает первоначальную форму, то такие деформации называются (являются) упругими. Если после снятия нагрузки первоначальная форма объекта не восстанавливается, то такие деформации называются пластическими. В общем виде зависимость величины приложенной силы и деформаций исследуемого объекта показана в графическом виде на рис. 2.10.

По характеру приложенной к объекту нагрузки все известные виды деформаций подразделяют на растяжения, сжатия, сдвиг (срез), скручивание, изгиб (прогиб, выгиб) (рис. 2.11).

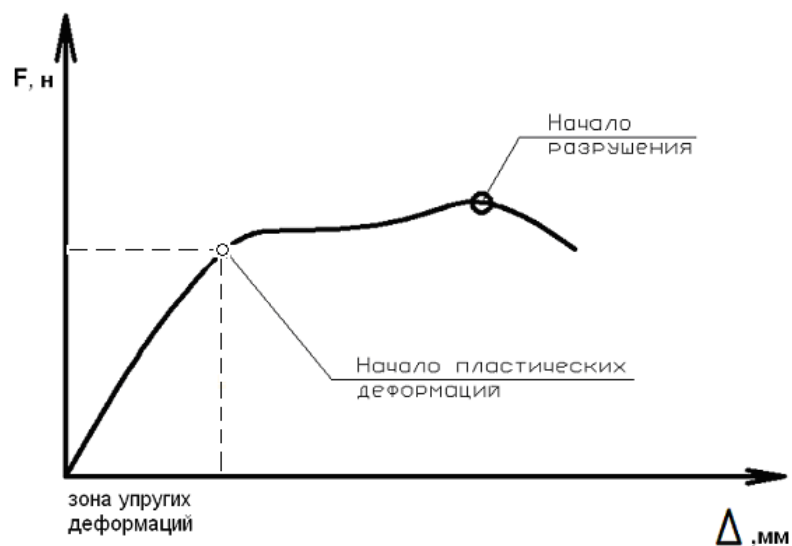


Рисунок 2.10. График зависимости величины приложенной силы и деформаций исследуемого объекта

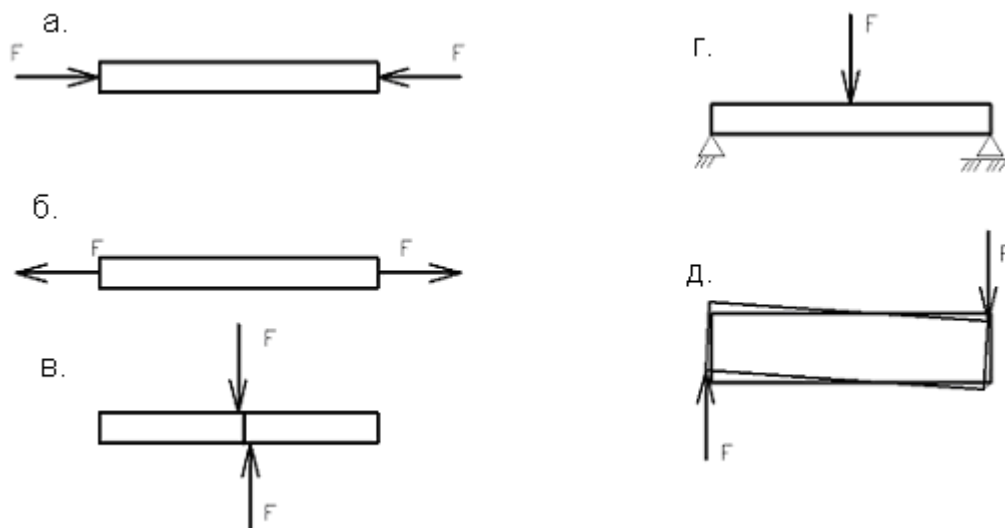


Рисунок 2.11. Воздействие силы на объект при различных видах деформаций

Основной характеристикой деформации является параметр, который в простейшем виде (например, для деформации сжатия) определяется по формуле:

$$\delta_i = \frac{(l_i - l_0)}{l_0}, \quad (2.9)$$

где:  $l_0$  – начальная длина;  $l_i$  – длина после приложения силы.

По сути, данный параметр есть относительная деформация. Если обозначить

$$(l_i - l_0) = \Delta_i,$$

тогда формула (2.9) примет вид

$$\delta_i = \frac{\Delta_i}{l_0}, \quad (2.10)$$

где  $\Delta_i$  – абсолютная деформация объекта.

Известно, что напряжение  $\sigma_i$ , возникающее в объекте после приложения сил, будет соответствовать значению, вычисленному по формуле (закон Гука)

$$\sigma_i = E\delta_i, \quad (2.11)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\delta_i$  – относительная деформация.

Из курса строительной механики известно, что работа объекта в соответствии с формулой (2.11) выполняется в зоне действия упругих деформаций (см. рис. 2.11) [77]. То есть, в этой зоне имеет место прямая пропорциональность напряжений и относительных деформаций. Следовательно, с точки зрения оценки напряженно деформированного состояния (НДС) объекта достаточно определить фактические относительные деформации его конструктивных элементов и оценить их распределение по объекту таким образом, чтобы без выполнения перевычислений напряжений можно было бы судить об НДС объекта.

Рассмотрим возможные варианты определения относительных деформаций конструктивных элементов объекта.

*Растяжение, сжатие.* В этом случае внешняя нагрузка приложена к исследуемому элементу вдоль его оси, и относительная деформация  $\delta_i$  будет определена по результатам измерения линейного размера, совпадающего по направлению приложения силы до момента приложения и после приложения и действия силы, т.е.  $l_i - l_0$ .

Затем, относя данную разность к начальному значению данного параметра (т.е. измеренного до приложения силы), получим искомую относительную деформацию, формула (2.9).

В случае изгиба внешняя нагрузка приложена к исследуемому элементу перпендикулярно к его оси. Из курса строительной механики известно, что если исследуемый элемент имеет однородную структуру (анизотропен), то в

случае изгиба зона нулевых деформаций совпадает с осью его симметрии. При этом со стороны прогиба регистрируются относительные деформации сжатия, со стороны выгиба – относительные деформации растяжения.

По результатам измерений определяют стрелу прогиба  $A_i$  (амплитуду) исследуемого элемента. Затем вычисляют радиус  $R_i$  изгибаемого участка элемента. Из рис. 2.12 имеем

$$R^2 = (R - A) + \left(\frac{l_0}{2}\right)^2. \quad (2.12)$$

Решая уравнение (2.12) относительно  $R_i$ , получим

$$R_i = \frac{A_i^2 + \left(\frac{l_0}{2}\right)^2}{2A}. \quad (2.13)$$

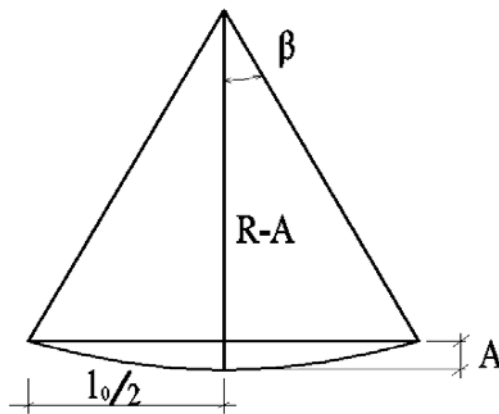


Рисунок 2.12. Расчетная схема определения радиуса

Далее вычисляют угол изгиба  $\beta$  участка элемента

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{\frac{l_0}{2}}{R_i} = \frac{l_0 A}{A^2 + \left(\frac{l_0}{2}\right)^2}; \quad (2.14)$$

$$\beta = 2 \arcsin \frac{l_0 A_i}{l_0^2 + A_i^2}. \quad (2.15)$$

Затем вычисляют длины дуг  $l^{(-)}$ ,  $l^{(+)}$  на преобразованных поверхностях исследуемого элемента, расположенных на изгибаемом участке со стороны прогиба и выгиба

$$l^{(-)} = \beta(R_i - b) \frac{\pi}{180};$$

$$l^{(+)} = \beta(R_i + b) \frac{\pi}{180}.$$
(2.16)

Далее вычисляют относительные деформации

$$\delta_i^{(-)} = \frac{l_i^{(-)} - l_0}{l_0};$$

$$\delta_i^{(+)} = \frac{l_i^{(+)} - l_0}{l_0},$$
(2.17)

где  $\delta_i^{(-)}$  – относительная деформация сжатия, регистрируемая на контролируемом элементе со стороны прогиба;  $\delta_i^{(+)}$  – относительная деформация растяжения, регистрируемая на контролируемом элементе со стороны выгиба.

В случае скручивания вращающая внешняя сила приложена к торцам исследуемого элемента, скручивающая данный элемент вдоль его оси. При этом если исследуемый элемент имеет конструктивное решение такое, что у него два линейных размера значительно превышают третий, то, прилагая к торцам скручивающее усилие, первоначальная поверхность, например, плоскость (образованная большими размерами) элемента, преобразуется в винтовую поверхность (рис. 2.13).

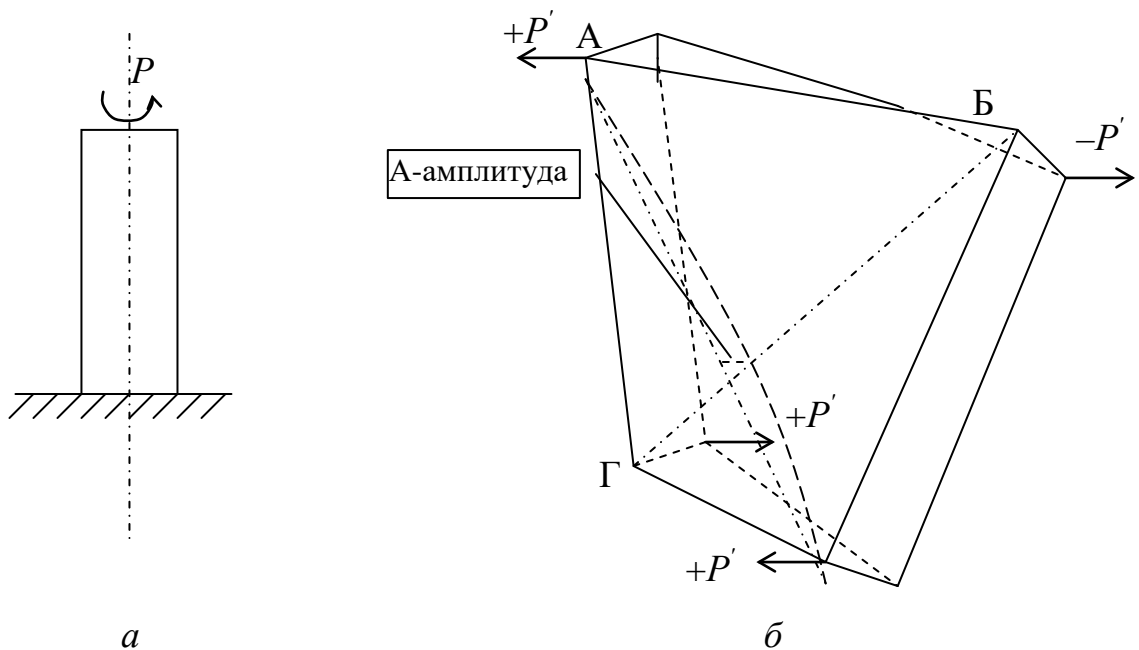


Рисунок 2.13. Схема контроля скручивания

При этом вдоль одной из диагоналей изменение геометрических характеристик элемента не происходит, а вдоль другого формируется изгиб (прогиб, выгиб), соответствующий прилагаемой силе и направлению вращения. Таким образом, относительную деформацию скручивания можно определить параметром изгиба ( $A$ -амплитудой), определенным по соответствующей диагонали.

В геодезической практике использование амплитуд известно и приурочено к оценке качества параметров формы (прямолинейности, плоскостности и т.д.) (рис. 2.14). Нами предлагается использовать данный геометрический параметр для оценки деформаций объектов, поскольку в подавляющем большинстве случаев деформации инженерных сооружений относятся к видам изгиба (прогиб, выгиб) или скручивания. Деформации сжатия, растяжения, сдвига (среза), встречаются гораздо реже. При этом для защитных герметичных оболочек, применительно к этапам преднапряжения и испытания, такие деформации минимальны и их влиянием на изменение НДС можно пренебречь, т.е. допустимо их не рассматривать. В соответствии с этим предложено оценку деформаций ЗГО выполнять по их поверхностям с определением на заданных участках амплитуд с последующим переходом к относительным деформациям.

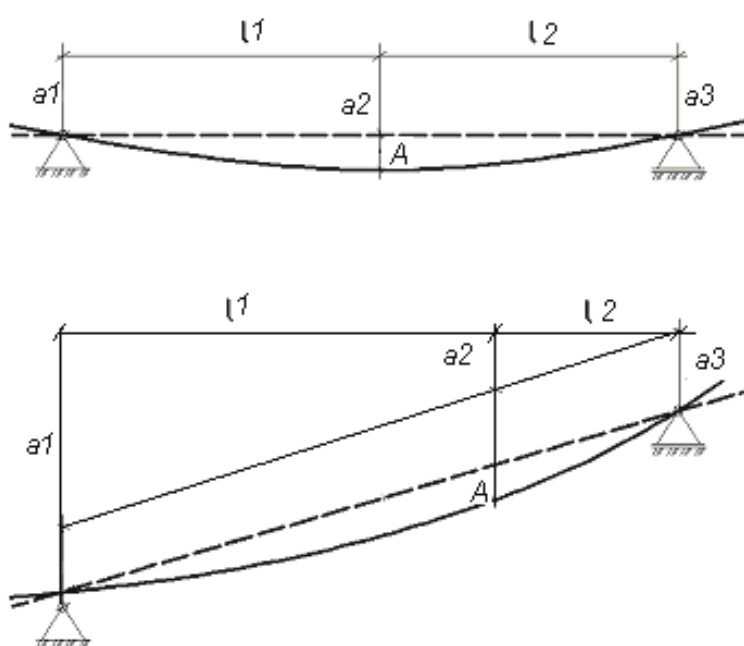


Рисунок 2.14. Схема формирования амплитуд

Порядок определения амплитуд таков, что первоначально распределяют по поверхностям исследуемого объекта контролируемые точки (по узлам регулярной или нерегулярной сетки). Затем выполняют их координирование и далее вычисляют их значения. Так, в случае симметричной амплитуды, т.е. когда  $l_1 = l_2$ , ее значение будет определено по формуле

$$A = \frac{a_1 + a_3}{2} - a_2. \quad (2.18)$$

В случае несимметричной амплитуды, т.е. когда  $l_1 \neq l_2$ , ее значение будет определено по формуле:

$$A = \frac{A'(l_2 + l_1)}{\sqrt{(l_2 + l_1)^2 + (a_1 - a_3)^2}}, \quad (2.19)$$

где  $A' = \frac{l_2 a_1 + l_1 a_3}{(l_2 + l_1) - a_2}$ .

В случае симметричной амплитуды, т.е. когда  $l_1 = l_2$ , и контролируемый участок расположен на круговой кривой, ее значение будет определено, исходя из рис. 2.15:

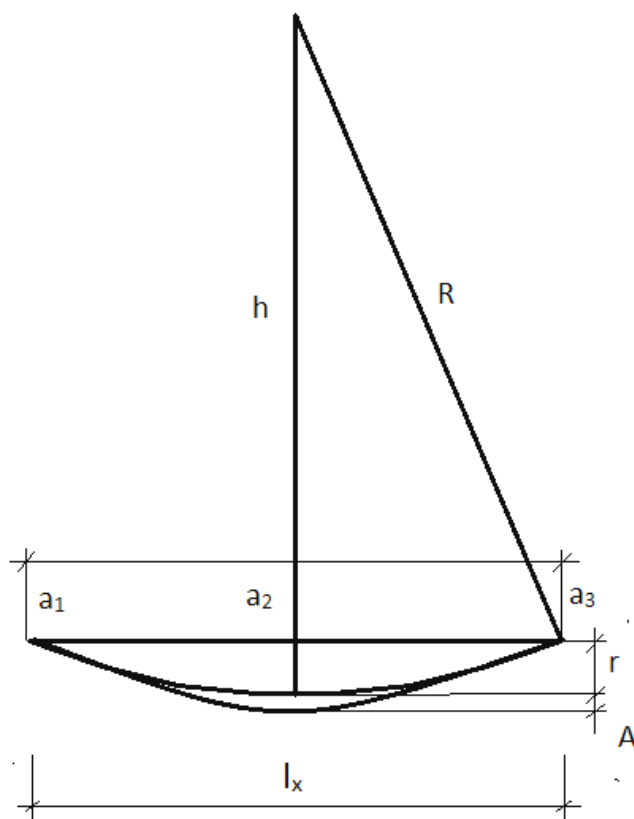


Рисунок 2.15. Расчетная схема определения радиуса оболочки

$$h = \sqrt{R^2 - \left(\frac{l_x}{2}\right)^2}, \quad (2.20)$$

где  $R$  – радиус круговой кривой;  $l_x$  – хорда исследуемого участка.

Тогда

$$R = R - h. \quad (2.21)$$

Подставив в (2.20) выражение (2.21), получим

$$r = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{l_x}{2}\right)^2}.$$

В итоге амплитуда  $A$  будет определена по формуле

$$A = \frac{a_1 + a_3}{2} - a_2 - r \quad (2.22)$$

или

$$A = \left( \frac{a_1 + a_3}{2} - a_2 - r \right) - \left( R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{l_x}{2}\right)^2} \right).$$

Таким образом, при оценке НДС ЗГО в период ее преднапряжения и испытания, определив сплошное распределение амплитуд по поверхностям оболочки, можно характеризовать напряженно-деформированное состояние, не прибегая к аналитическому решению этой задачи. Однако при этом сплошное распределение амплитуд не дает исчерпывающего понимания о техническом состоянии исследуемого объекта, соответствии его нормативным требованиям и об остаточном ресурсе объекта.

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

$$K = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{доп}}}, \quad (2.23)$$

где  $\sigma_{\text{пред}}$  – предельное напряжение;  $\sigma_{\text{доп}}$  – допустимое напряжение;

Рассматривая формулу (2.11) для одноосного сжатия с учетом (2.10), получим

$$\sigma_{\text{пред}} = E \frac{\Delta_{\text{пред}}}{l_0}; \quad (2.24)$$

$$\sigma_{\text{доп}} = E \frac{\Delta_{\text{доп}}}{l_0}. \quad (2.25)$$

Подставив (2.24) и (2.25) в (2.23), получим

$$K_0 = \frac{\Delta_{\text{пред}}}{\Delta_{\text{доп}}}. \quad (2.26)$$

Применительно к ЗГО в качестве  $\Delta_{\text{пред}}$  принимают перемещения конструктивных точек, размещенных на элементах (стенках) ЗГО при ее преднапряжении. В качестве  $\Delta_{\text{доп}}$  принимают перемещения тех же точек на этапе испытаний при наборе внутреннего давления, равного 4,6 атм.

$K_0$  принимается таким, что  $\Delta F_i$  (2.8) должно быть всегда  $\Delta F_i > 0$  с некоторым нормируемым запасом. Согласно требованиям СП-52-102-2004 к предварительно напряженным железобетонным конструкциям  $K_0 \geq 1,5$  на всех этапах эксплуатации, начиная с преднапряжения. При этом после испытаний коэффициент  $K_0$ , определенный по результатам, принимается начальным. Далее ежегодно определяются величины годовых перемещений  $\delta_i$ . Тогда текущий коэффициент на любом этапе ЗГО определяется следующим образом

$$K_i = \frac{\Delta_{\text{пред}} + \sum_{i=1}^n \delta_i}{\Delta_{\text{исп}}}. \quad (2.27)$$

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

$$d_i = \frac{K_i}{K_0}, \quad (2.28)$$

где  $d_i$  – параметр, который 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.

### **2.3. Методика формирования структуры геодезической диагностической системы**

При оценке технического состояния защитных герметичных оболочек в процессе их преднапряжения, испытаний и в дальнейшем на стадии эксплуатации осуществляют контроль их возможных деформаций. Для контроля и оценки физико-механических характеристик оболочки используют штатную встроенную автоматизированную систему. Однако опыт эксплуатации таких систем показал, что их использование связано с определенными недостатками, например, выходом из строя датчиков, изменением или несоответствием их параметров тарировочным характеристикам и т.д. Вследствие чего не обеспечивается получение достоверной информации о состоянии исследуемого объекта. В силу этого оправданным является создание дублирующей контрольно-измерительной системы, предназначенной для контроля геометрических параметров ЗГО и обеспечивающей повышение объективности получения информации о физико-механических характеристик оболочки, как итог этого – повышение надежности оценки технического состояния и, в конечном счете, повышение безопасности эксплуатации ЗГО.

Проведенный в п. 2.1 анализ работы строительных элементов герметичной оболочки при её преднапряжении и испытании показал, что на данных этапах работа конструктивных частей ЗГО различна. Следовательно, во-первых, при проектировании измерительной системы необходимо учитывать данные особенности. Во-вторых, необходимо учесть особенности работы каждой конструктивной части в отдельности и специфику зон их расположения. В-третьих, необходимо учесть специфическую форму частей ЗГО.

Исходя из перечисленных условий, определим необходимые требования к построению геодезической измерительной системы.

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

2. Контроль положения точек осуществляют с предельной ошибкой  $\pm 5$  мм, обеспечивающей достоверное определение результата.

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

4. Контролируемые точки определяют в единой системе координат.

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

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

1. Создание геодезического обоснования в условной системе координат объекта, 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.

Исследуемыми элементами оболочки являются купольная и цилиндрическая части, при этом контролируемые точки располагаются на их внутренних и внешних поверхностях. При воздействии сил СПЗО на строительные элементы оболочки опорная плита и опорное кольцо являются практически недеформируемыми. В то же время указанные воздействия СПЗО направлены на преднапряжение цилиндрической и купольной частей, именно они, вос-

принимая 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 и являются моментными зонами. Зоны, расположенные между минимально перемещаемыми и перемещаемыми максимально, являются переходными, а зоны с устоявшимися максимальными перемещениями являются безмоментными. Распределение деформационных зон по строительным элементам ЗГО в графическом виде приведено на рис. 2.16.

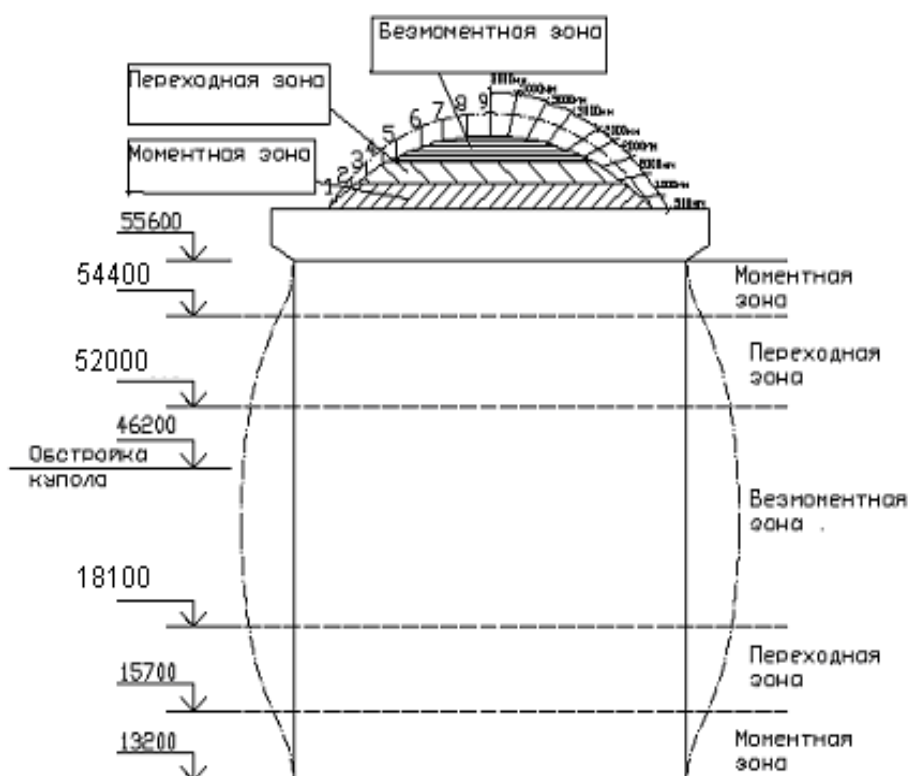


Рисунок 2.16. Распределение деформационных зон на строительных элементах ЗГО

При обжатии оболочки системой СПЗО наибольшие перемещения получают безмоментные зоны, которые в данном случае являются наиболее информативными. Как было описано в п. 2.1, в этих зонах радиальная стержневая арматура претерпевает деформации растяжения, что может приводить к расслоению стенки оболочки. Следовательно, выполнение измерений перемещений должно осуществляться по исследуемым точкам, расположенным на внутренней и внешней поверхностях и находящимся диаметрально проти-

воположно друг относительно друга (рис. 2.17, 2.18). Начальный цикл измерений выполняется до начала процесса обжата, последний цикл измерений – по окончании периода выдержки (релаксации) оболочки перед ее испытаниями.

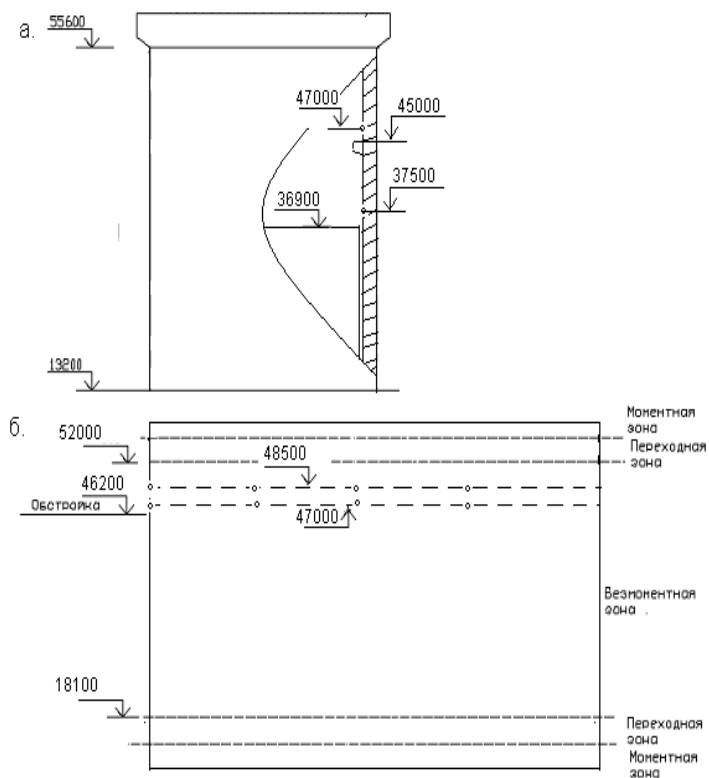


Рисунок 2.17. Размещение контролируемых точек на цилиндрической части ЗГО

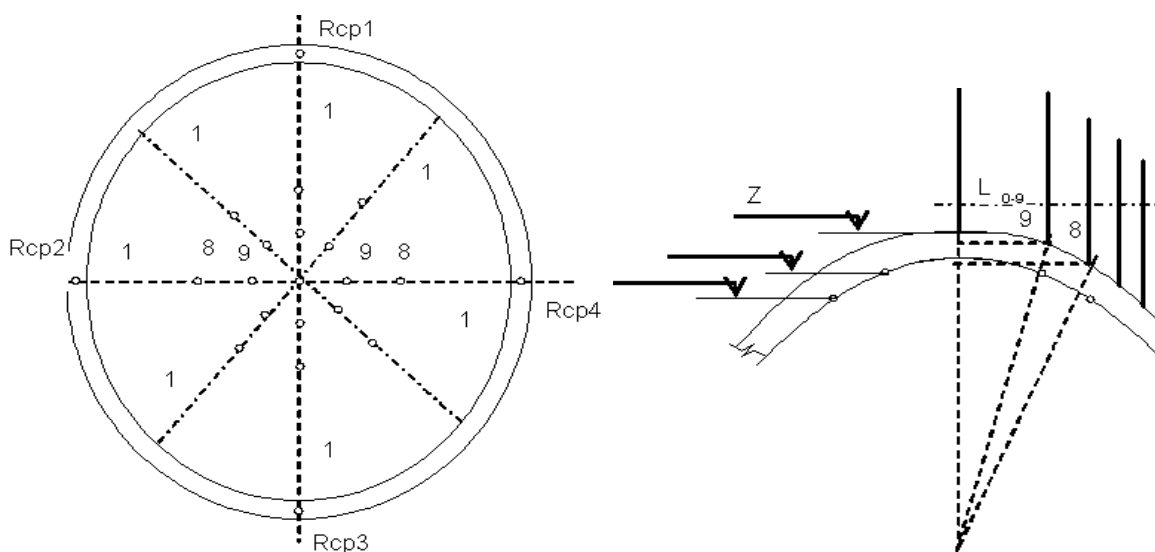


Рисунок 2.18. Размещение контролируемых точек на купольной части ЗГО

При испытании оболочки по техническим условиям проведения работ контролируются точки, расположенные исключительно на внешней поверхности строительных элементов ЗГО. Маркирование контролируемых точек на заданных сечениях сооружения осуществляют таким образом, чтобы на куполе защитной оболочки точки были размещены и замаркированы на осевых и получетвертных направлениях, причем размещают их в моментной зоне, зоне непосредственного примыкания к опорному кольцу с шагом, примерно равным половине толщины данной строительной конструкции; в нашем случае половина толщины защитной оболочки составляет 600 мм; таких интервалов, закрепленных точками по каждому из направлений, маркируют два.

В переходной зоне размещают точки с шагом, равным примерно толщине строительной конструкции, в нашем случае – 1200 мм.

В безмоментной зоне размещают точки с шагом, равным двум и более толщинам строительной конструкции, в нашем случае – 2500–3000 мм; таким образом разбивают все оставшиеся части контролируемых направлений.

На внешней цилиндрической части защитной оболочки контролируемые точки размещают в вертикальных сечениях, совпадающих с осевыми сечениями, с шагом их распределения, аналогичным купольной части, также отсчитывая от опорного кольца.

При этом первым циклом измерений является цикл, выполненный после релаксации оболочки после её обжаривания. Последний цикл измерений выполняется после окончания испытаний и в завершении расчетного периода релаксации оболочки.

Вид метода контроля положения исследуемых точек детерминируется условиями выполнения измерений и, в частности, формой и расположением строительных частей защитной оболочки. Так, для контроля внутренней формы ЗГО, выполняемой в помещении реакторного зала, в качестве основного используется метод пространственной тахеометрии. Для контроля формы внешних поверхностей ЗГО используются:

- для цилиндрической части – метод пространственной тахеометрии;

– для купольной части и опорного кольца – метод геометрического нивелирования.

Для реализации метода пространственной тахеометрии в качестве средства измерений используют высокоточные электронные тахеометры или лазерные трекеры. Данные средства измерений обеспечивают на каждом этапе контроля формирование математической модели исследуемого объекта в виде пространственных координат  $X_i, Y_i, Z_i$  точек, дискретно распределенных на поверхностях исследуемого объекта. При реализации данного метода на предварительном этапе формируется стационарная геодезическая основа в виде специальных пунктов с возможностью жесткой установки на них отражателей. Пункты геодезической основы определяются в системе строительных осей ЗГО. В каждом последующем цикле выполняют координирование исследуемых точек и пунктов геодезической основы и перевычисляют координаты точек текущего цикла в систему строительных осей защитной оболочки.

Для реализации метода геометрического нивелирования в качестве средства измерений используют высокоточные цифровые нивелиры. Данные средства измерений обеспечивают на каждом этапе контроля получение информации о высотном положении  $Z_i$  исследуемых точек, дискретно распределенных на поверхностях исследуемого объекта (рис. 2.19, а).

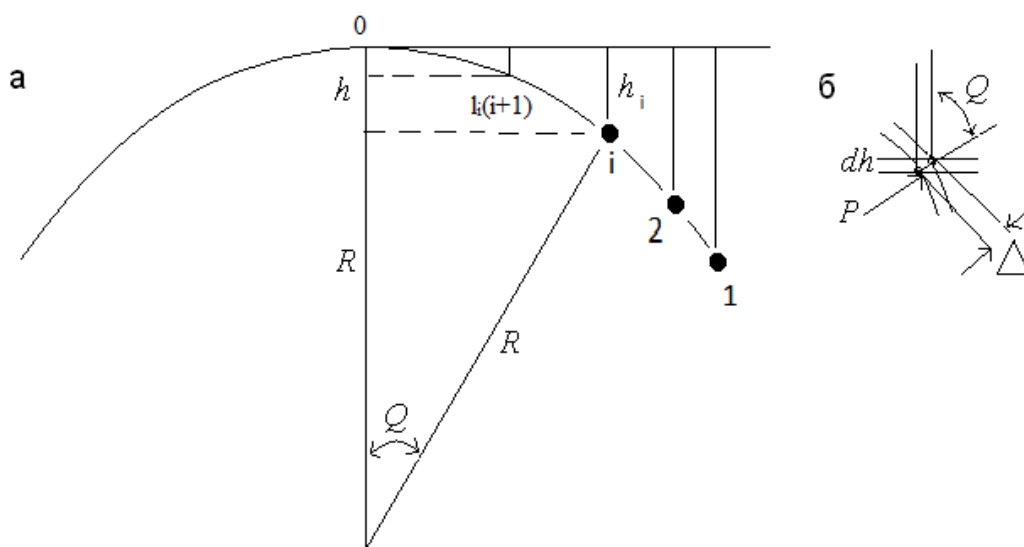


Рисунок 2.19. Схема определения перемещений контролируемых точек купольной части оболочки

Радиус купольной части ЗГО определяется, исходя из рис. 2.19, *a*:

$$R^2 = (R - h)^2 + l_1^2. \quad (2.29)$$

Раскрывая скобки и решая уравнение относительно *R*, получим:

$$R = \frac{h_1^2 + l_1^2}{2h_1}. \quad (2.30)$$

При этом

$$\sin Q = \frac{l_i}{R}$$

или

$$\sin Q = \frac{2h_i l_i}{h_i^2 + l_i^2}. \quad (2.31)$$

При этом в первом цикле измерений выполняют определение горизонтальных проложений между контролируемыми точками  $l_{i-(i-1)}$ . По результатам нивелирования купола определяют превышения между исследуемыми точками  $h_{0-1}$ , и по данным величинам вычисляют центральные углы. Исходя из (2.25), имеем

$$Q = \arcsin \frac{2h_i l_i}{h_i^2 + l_i^2}. \quad (2.32)$$

При последующей обработке циклов измерений общее перемещение исследуемых точек, находящихся на куполе в безмоментной зоне, определяют следующим образом

$$\Delta = \frac{\Delta h}{\cos Q}, \quad (2.33)$$

где  $\Delta h$  – перемещение исследуемой точке по вертикали.

В переходной и моментной зонах в качестве величины перемещений последующих точек сохраняют значения  $\Delta h$ .

## 2.4. Методика формирования плано-высотного обоснования

Как отмечалось в п. 2.3, одним из основных требований к построению МГИС является создание геодезического обоснования предназначенного для обеспечения исходными данными все контролируемые зоны ЗГО.

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.

Геодезическая плано-высотная сеть развивается многоярусной, в том числе на исходном горизонте (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  $x_{(5)i}, y_{(5)i}, z_{(5)i}$ ). Развитие опорной сети может быть выполнено двумя путями.

Первый вариант построения опорной сети предполагает ее развитие в следующем порядке. В системе закрепленных (или восстановленных) осей реактора в ГА-701 определяют положение пунктов  $x_{(5)i}, y_{(5)i}, z_{(5)i}$  (как минимум двух) закрепленных в данном помещении. Выбор местоположения и закрепление данных пунктов осуществляют таким образом, чтобы была обеспечена возможность контроля всей внутренней поверхности оболочки, и чтобы была обеспечена неизменность их положения и сохранность на все этапы выполнения работ. Далее к данным пунктам, через транспортный коридор привязывают пункты, расположенные на исходном горизонте  $x_{(1)i}, y_{(1)i}, z_{(1)i}$ . Затем от пунктов находящихся на исходном горизонте развивают обоснование на перекрытии обстройки реакторного отделения  $x_{(2)i}, y_{(2)i}, z_{(2)i}$ , на опорном кольце защитной оболочки  $x_{(3)i}, y_{(3)i}, z_{(3)i}$  и на ее куполе  $x_{(4)i}, y_{(4)i}, z_{(4)i}$ .

Второй вариант построения опорной сети предполагает ее развитие в следующем порядке. Последовательно развивают геодезическую опорную сеть на исходном горизонте  $x'_{(1)i}, y'_{(1)i}, z'_{(1)i}$ , на перекрытии обстройки реактор-

ного отделения  $x'_{(2)i}, y'_{(2)i}, z'_{(2)i}$ , на опорном кольце защитной оболочки  $x'_{(3)i}, y'_{(3)i}, z'_{(3)i}$ , на ее куполе  $x'_{(4)i}, y'_{(4)i}, z'_{(4)i}$  и в помещении ГА-701 реакторного отделения  $x'_{(5)i}, y'_{(5)i}, z'_{(5)i}$ . Определяют координаты всех пунктов в заданной условной системе координат. Затем положение пунктов находящихся в ГА-701 определяют в системе координат осей реактора  $x_{(5)i}, y_{(5)i}, z_{(5)i}$ . Используя полученные координаты, трансформируют (преобразуют) координаты всех пунктов геодезической основы из условной системы координат в систему координат исследуемого объекта.

Опорные геодезические пункты, закрепленные на перекрытии обстройки реакторного отделения  $x'_{(2)i}, y'_{(2)i}, z'_{(2)i}$ , на опорном кольце защитной оболочки  $x'_{(3)i}, y'_{(3)i}, z'_{(3)i}$ , и на ее куполе  $x'_{(4)i}, y'_{(4)i}, z'_{(4)i}$  предназначены для определения геометрических характеристик ЗГО, с ее внешней стороны. В том числе, пункты, закрепленные на перекрытии обстройки реакторного отделения  $x'_{(2)i}, y'_{(2)i}, z'_{(2)i}$  являются исходной основой для контроля геометрических параметров цилиндрической части защитной оболочки. Пункты, расположенные на опорном кольце защитной оболочки  $x'_{(3)i}, y'_{(3)i}, z'_{(3)i}$  обеспечивают контроль его пространственных геометрических характеристик. Пункты, расположенные на куполе  $x'_{(4)i}, y'_{(4)i}, z'_{(4)i}$  обеспечивают контроль его формы.

Пункты, находящиеся в ГА-701  $x_{(5)i}, y_{(5)i}, z_{(5)i}$  являются исходной основой для контроля геометрических параметров цилиндрической и купольной частей защитной оболочки с внутренней ее стороны.

Пункты геодезического обоснования, закрепленные на перекрытии обстройки  $x'_{(2)i}, y'_{(2)i}, z'_{(2)i}$  формируется в виде замкнутого многоугольника с закрепленными вершинами. Нами разработана методика построения данного геодезического обоснования заключающегося в том, что выполняют снесение образующей стены обстройки (поверхности стен, плоскости стен) путем отложения одинакового расстояния ( $L_0$ ) двух взаимно противоположных точках I, II. В последующем данные точки маркируются несмываемой краской.

На одну из точек, например,  $T$  устанавливают тахеометр, центрируют и ориентируют на противоположащую точку  $\Pi$ . Данное направление принимают как нормальное по отношению к оси  $OO'$  ЗГО.

От этого направления измеряют два угла, соответственно на правую и левую образующие цилиндрической части защитной герметичной оболочки (тп, тл) (Рис.2.22).

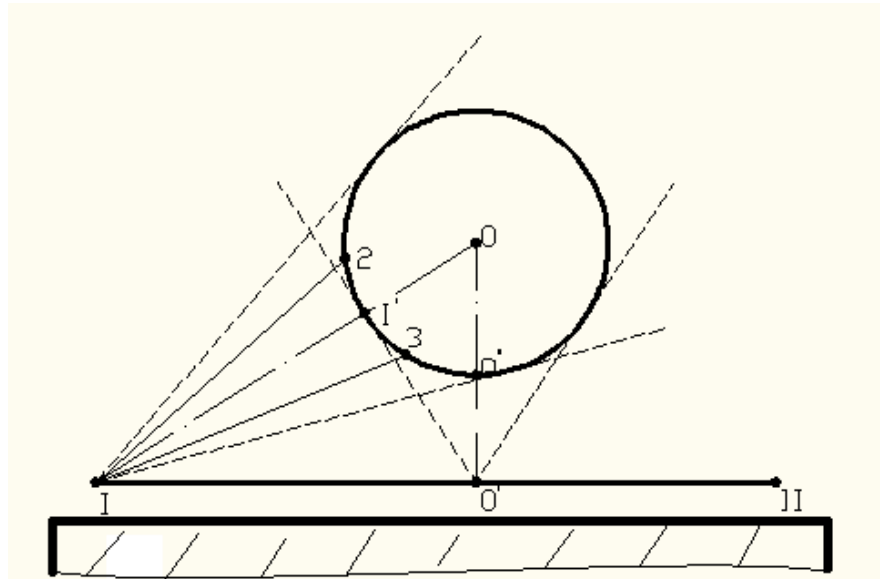


Рисунок 2.22. Схема измерения углов на обстройке купола.

Вычисляют среднее значение из двух измеренных углов

$$\beta_{cp} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (2.34)$$

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

По результатам выполненных измерений определяют радиус  $R_{30}$  герметичной оболочки, из схемы приведенной на рис. 2.22 получим

$$\frac{R_{30}}{l + R_{30}} = \sin\left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{2}\right) \quad (2.35)$$

После элементарных преобразований получим:

$$R_{30} \left( 1 - \sin \left( \frac{\beta_{21}}{2} \right) \right) = l_{I-I'} \cdot \sin \left( \frac{\beta_{21}}{2} \right) \quad (2.36)$$

И окончательное решение относительно  $R_{30}$  имеет вид

$$R_{30} = \frac{l_{I-I'} \cdot \sin \left( \frac{\beta_{21}}{2} \right)}{1 - \sin \left( \frac{\beta_{21}}{2} \right)} \quad (2.37)$$

Для вычисления средней квадратической ошибки определения  $R_{30}$ , выполнили дифференцирование (2.37) и перейдя к среднеквадратическим ошибкам, получим

$$m_{R_{30}}^2 = \left( \frac{\sin \frac{\beta_{12}}{2}}{1 - \sin \frac{\beta_{21}}{2}} \right)^2 \cdot m_{l_{I-I'}}^2 + \frac{1}{4} \cdot l_{I-I'}^2 \cdot \left[ \frac{\cos \left( \frac{\beta_{12}}{2} \right)}{(1 - \sin \left( \frac{\beta_{21}}{2} \right))^2} \right]^2 \cdot \frac{m_{\beta_{12}}^2}{\rho^2} \quad (2.38)$$

Далее вычисляют значения, катетов в треугольнике  $IOO^I$ , смотри рис. 2.22, получим

$$l_{OO'} = ((l_{I-I'}) + R_{30}) \cdot \sin \beta_{cp} \quad (2.39)$$

$$l_{IO^I} = ((l_{I-I'}) + R_{30}) \cdot \cos \beta_{cp} \quad (2.40)$$

Вычисление средних квадратических ошибок выполняют согласно ниже приведенных формул

$$m_{l_{OO'}}^2 = \left[ (l_{I-I'} + R_{30}) \cdot \cos(\beta_{cp}) \right]^2 \cdot \frac{m_{\beta_{cp}}^2}{\rho} + (\sin \beta_{cp})^2 \cdot (m_{l_{I-I'}}^2 + m_{R_{30}}^2)$$

$$m_{l_{IO^I}}^2 = \left[ (l_{I-I'} + R_{30}) \cdot \sin(\beta_{cp}) \right]^2 \cdot \frac{m_{\beta_{cp}}^2}{\rho} + (\cos \beta_{cp})^2 \cdot (m_{l_{I-I'}}^2 + m_{R_{30}}^2) \quad (2.41)$$

Далее в створах начального направления I-II от точки I откладывают отрезок  $L_{I-O'}$  и закрепляют точку  $O'$  маркированием несмываемой краской.

Тахеометр переносят и устанавливают на точке  $O'$ , центрируют и проверяют нахождение (расположения ее) в створе I – II, для чего последовательно наводят зрительную трубу тахеометра на точку I и переводят её через зенит на точку II при круге вправо и круге лево. Если две проекции точки I совпа-

дают с точкой II или расположены диаметрально противоположно и симметрично относительно её то считают что точка  $O'$  лежит в створе I – II, если симметрия не соблюдается или совпавшие точки проекции не попадали в точку II то корректируют положение точки  $O'$ .

На точке  $O'$  строят перпендикуляр к створу I – II. В створе перпендикуляра  $O'$  измеряют расстояние  $L_{OO'}$ . Затем контролируют правильность всех выполненных работ путем сравнения величины:

$$\Delta l = (l_{o'o''} + R_{3o}) - l_{o'o'} \quad (2.42)$$

Если  $\Delta l \leq \varepsilon$  считают что измерения и построения выполнены качественно. Если нет, то выполняют вышеописанные работы заново, с изменением способа определения  $R_{3o}$ . В этом случае например  $R_{3o}$  определяют по координатам трех точек расположенных в одном горизонтальном сечении ЗГО предпочтительнее расположенного на горизонте инструмента.

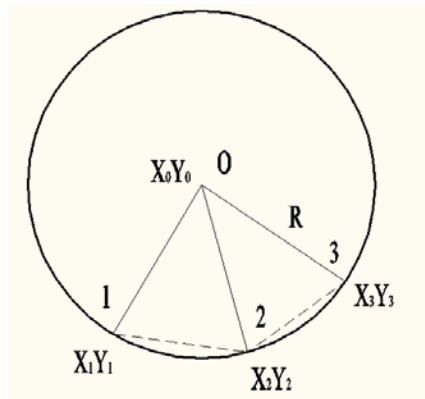


Рисунок 2.23. Схема определения центра герметичной оболочки.

$$\begin{cases} R_{3o}^2 = (X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 \\ R_{3o}^2 = (X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 \\ R_{3o}^2 = (X_3 - X_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2 \end{cases} \quad (2.43)$$

Приравнивая правые части уравнений получим

$$\begin{cases} (X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 = (X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 \\ (X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 = (X_3 - X_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2 \end{cases}$$

Затем раскрываем скобки и имеем

$$\begin{cases} X_1^2 - 2X_1X_0 + X_0^2 + Y_1^2 - 2Y_1Y_0 + X_2^2 - 2X_2X_0 + X_0^2 + Y_2^2 - 2Y_2Y_0 + Y_0^2 \\ \end{cases}$$

$$X^2 - 2X_1X_0 + X_0^2 + Y_1^2 - 2Y_2Y_0 = X_3^2 - 2X_3X_0 + X_0^2 + Y_3^2 - 2Y_3Y_0 + Y_0^2$$

сокращая подобные  $Y_0^2$  и решая относительно  $X_0$  получим

$$\begin{cases} X_0 = (X_2^2 - X_1^2 + Y_2^2 - Y_1^2 - 2Y_0(Y_2 - Y_1)) / (2(X_2 - X_1)) \\ X_0 = (X_3^2 - X_1^2 + Y_2^2 - Y_1^2 - 2Y_0(Y_3 - Y_1)) / (2(X_3 - X_1)) \end{cases} \quad (2.44)$$

Приравнивая правые части уравнений имея ввиду, что  $X_{cp(21)} = (X_2 + X_1)/2$ ;  $Y_{cp(2-1)} = (Y_2 + Y_1)/2$ ;  $tg\alpha_{21} = \Delta y_{21} / \Delta x_{21}$ ;  $X_{cp(31)} = (X_3 + X_1)/2$ ;  $Y_{cp(3-1)} = (Y_3 + Y_1)/2$ ;  $tg\alpha_{31} = \Delta y_{31} / \Delta x_{31}$  получим:

$$X_{cp(21)} + Y_{cp(21)} tg\alpha_{21} - Y_0 tg\alpha_{21} = X_{cp(31)} + Y_{cp(31)} tg\alpha_{31} - Y_0 tg\alpha_{31} \quad (2.45)$$

Решая (2.45) относительно  $Y_0$  имеем

$$Y_0 = (X_{cp(31)} - X_{cp(21)} + Y_{cp(31)} tg\alpha_{31} - Y_{cp(21)} tg\alpha_{21}) / (tg\alpha_{31} - tg\alpha_{21}). \quad (2.46)$$

Точки 2 и 3 располагают с лева и права соответственно от точки I<sup>//</sup>. Их располагают в принятом сечении произвольно, ограничением здесь является лишь удобство измерений и их доступность.  $R_{30}$  вычисляют по формулам (2.43).

Определив  $R_{30}$  последующие операции идентичны ранее описанным. На точке O' могут быть произведены работы по определению  $R_{30}$  любым из вышеописанных способов. Его величина должна быть равной ранее полученному значению с учетом технического допуска  $\pm \delta R$  который принимают равным допустимой величине уклонения радиуса от проектного положения (проектного радиуса)  $\pm 20$ мм. Выполнив описанные работы на четырех сторонах оболочки получают центральную фигуру, у которой центр O совпадают центр оболочки а, O<sub>i</sub>' закреплены вне оболочки на перекрытии обстройки.

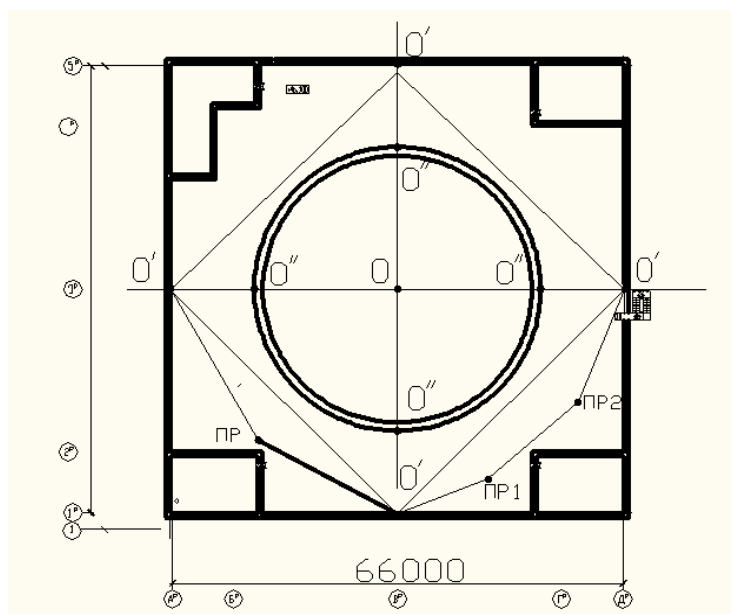


Рисунок 2.24. Расположение точек обоснования на обстройке оболочки.

Затем выполняют измерение расстояний  $O'_i - O'_{(i+1)}$ . Здесь могут возникнуть два случая :

- 1) Между точками нет прямой видимости, однако имеется видимость на обе точки с одной промежуточной (ПР). В этом случае с промежуточной точки выполняют измерение расстояний (ПР)-  $O'$  и угла при вершине совпадающей с точкой (пр). Вычисление расстояния  $L_{(O' - O'_{i+1})}$  выполняют по теореме косинусов.
- 2) Между точками нет прямой видимости, имеется видимость на точки с двух промежуточных точек между которыми также имеется прямая видимость (ПР1, ПР2) см.рис.2.24. В этом случае с промежуточных точек выполняют измерения расстояний до соответствующих точек  $O'_i$  и между промежуточными точками (ПР1, ПР2) и измеряют углы на вершине совпадающих с промежуточными точками.

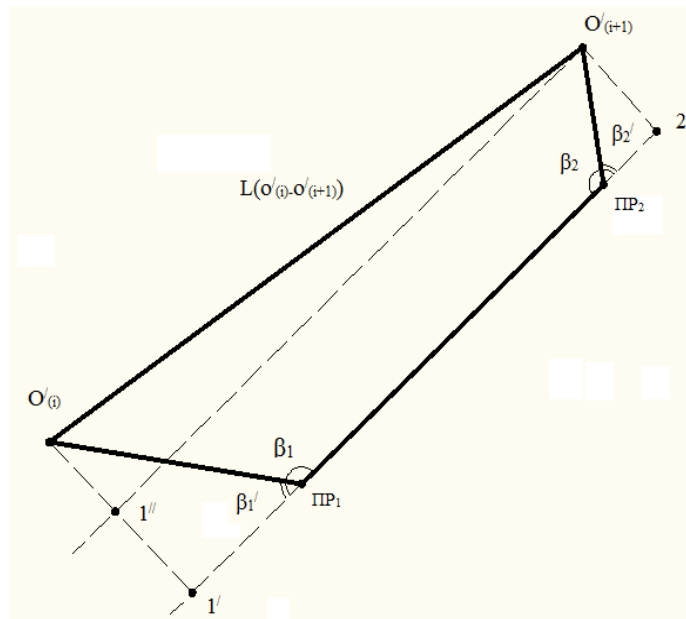


Рисунок 2.25 Схема определения расстояния  $L(O'_{(i)}, O'_{(i+1)})$

Из рисунка 2.25 имеем

$$l_{(1'-np1)} = l_{(O_{i-np1})} \cdot \cos(\beta_1')$$

$$l_{(2'-np2)} = l_{(O_{i-np2})} \cdot \cos(\beta_2')$$

$$l_{(1'-O'_i)} = l_{(O_{i-np1})} \cdot \sin(\beta_1')$$

$$l_{(2'-O'_i)} = l_{(O_{i-np2})} \cdot \sin(\beta_2')$$

Учитывая, что  $L^2_{(O'_{(i)}, O'_{(i+1)})} = l^2_{(O_{i-1}''')} + l^2_{(O_{i+1}-1'//)}$ .

Окончательно получим

$$L^2_{(O'_{(i)}, O'_{(i+1)})} = (l_{(O_{i-np1})} \cdot \sin(\beta_1') - (l_{(O_{i+1-np1})} \cdot \sin(\beta_2')))^2 + (l_{(np1-np2)} + l_{(O_{i-np1})} \cdot \cos(\beta_1') + (l_{(O_{i+1-np2})} \cdot \cos(\beta_2')))^2. \quad (2.47)$$

Далее точки  $O'_{(i)}$  переносят на стены обстройки, путем построения перпендикуляров от направления I – II или по направлению  $O'_{(i)} O'_{(i)}''$  (путем его продолжения за точку  $O'_{(i)}$ ) закрепляют точку  $O_k$  на стене обстройки несмываемой краской. Затем выполняют измерение  $L_{(O'_{(i)}// - O_k(i))}$ . Измерение данного расстояния выполняют многократно. За окончательный вариант принимают среднее из полученных результатов. Рекомендуется в створе  $O'_{(i)}$  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.

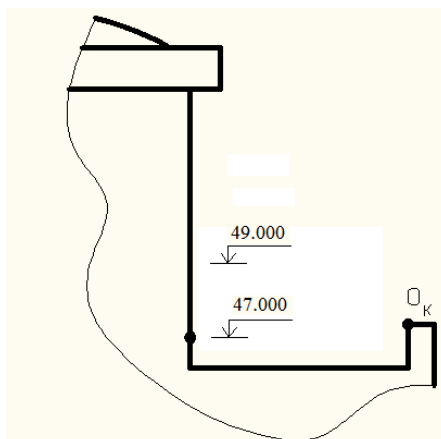


Рисунок 2.26. Закрепление точек на цилиндрической части оболочки.

Рекомендуется на бетонной опоре нащельника закрепить точку  $O_H$  так же расположенного в створе  $O_K - O'_{(i)}$ . Выполнить измерения расстояния  $O_H - O_K$ . Данная линейная величина в дальнейшем используется для определения поправок за температуру.

Далее точки  $O''_{(i)}$  переносятся на опорное кольцо.

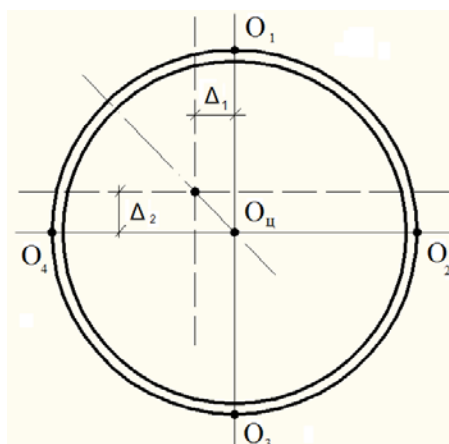


Рисунок 2.27. Определение центра купола.

Затем тахеометр устанавливают на куполе в центральной его части. Выполняют измерения отрезков вдоль хорд, расположенных взаимно перпендикулярно друг другу. Измеряют отрезки заключенные между станцией стояния тахеометра и краем опорного кольца. Далее вычисляют значения редукции  $\Delta_1, \Delta_2$  места положения станции.

$$\Delta_1 = L_2 - \frac{L_1 + L_2}{2},$$

$$\Delta_2 = L_3 - \frac{L_3 + L_4}{2}, \quad (2.48)$$

где  $L_2$  и  $L_3$  соответственно большие отрезки в парах;

$L_1$  и  $L_4$  меньшие отрезки в парах.

Выполнив редукцию на величины  $\Delta_1, \Delta_2$  в соответствующих направлениях места положения станции получают центр купола оболочки.

Установив тахеометр на отредуцированный центр купола  $O_{ц}$  выполняют измерения, в частности, измеряют длину отрезков заключенных между  $O_{ц}$  и точками  $O_1, O_2, O_3, O_4$  вынесенными на опорное кольцо с перекрытия. Если работы были произведены качественно то получим  $L_1=L_2=L_3=L_4$  и  $\beta_1=\beta_2=\beta_3=\beta_4$  в пределах точности измерений, см. рис. 2.28.

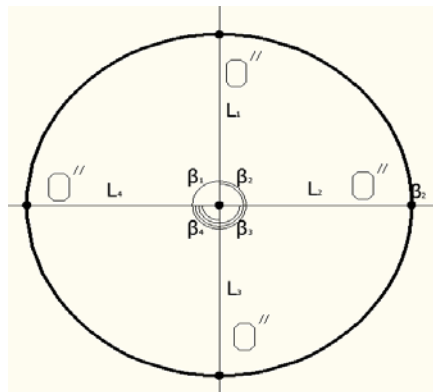


Рисунок 2.28. Измеряемые углы и отрезки на купольной части герметичной оболочки при проверке положения центра купола.

Если равенство не будет получено, то описанные работы повторяют уточняя положение центра  $O_{ц}$ . 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. 2.29). Эта операция осуществляется следующим образом.

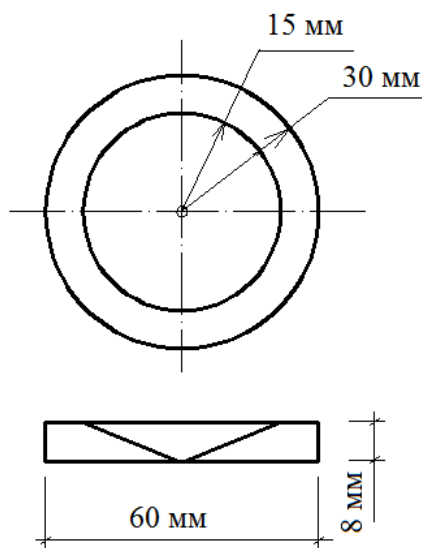


Рисунок 2.29. Схема марки

В начале выполняют рекогносцировку мест установки шайб их положение должно удовлетворять требованиям обеспечения прямой видимости из центральной части помещения ГА 701 на данную шайбу. Совместно с нахождением мест установки шайбы на металлическом элементе данной конструкции производят очистку поверхности зоны установки марки. Далее в данном месте необходимо приклеить марку рис. 2.29. Места положения марок должны быть равномерно рассредоточены по помещению ГА- 701.

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 расположенных на одном из рельсов машины перегрузки топлива МП 1000. По ко-

ординатам этих точек вычисляют дирекционный угол прямой 1-2 в системе координат прибора.

$$\alpha_{1-2} = \operatorname{arctg} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.49)$$

Имея ввиду, что рельсовый путь МП1000 параллелен оси II-IV реактора. Также известно то, что оси реактора развернуты относительно строительных осей на угол  $12^\circ$ . Исходя из этого вычисляют угол разворота тахеометра.

$$\gamma = \alpha_{1-2} + \beta \quad (2.50)$$

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 .

$$\alpha_{1-2} = -\beta \quad (2.51)$$

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.

$L_{x1}$  ,  $L_{x2}$  ,  $L_{y1}$  ,  $L_{y2}$  (см.рис 2.27). Затем вычисляют параметры параллельных смещений систем координат:

$$X_T = (-1) \left[ \left( \frac{l_{x1} + l_{x2}}{2} \right) - l_{x2} \right] \quad (2.52)$$

$$Y_T = (-1) \left[ \left( \frac{l_{y1} + l_{y2}}{2} \right) - l_{y2} \right] \quad (2.53)$$

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

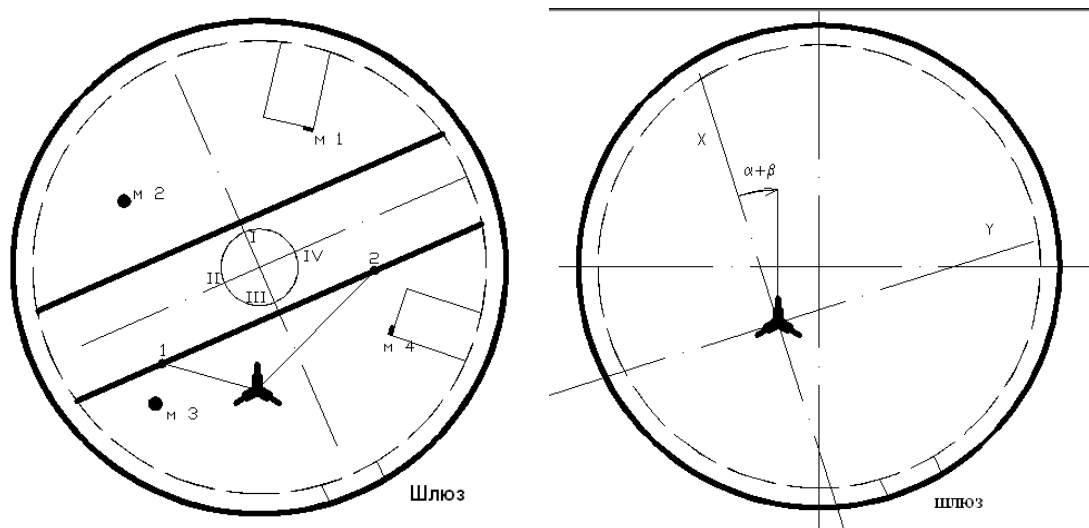


Рисунок 2.30. Схема размещения прибора в помещении ГА 701.

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

## 2.5. Методика обработки измерительной информации

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. В тех случаях, когда эти отрезки равны, перемещения называются равномерными и, наоборот, когда отрезки не равны – неравномерными.

Принцип обработки повторных измерений заключается в том, что после выполнения очередного цикла измерений находятся разности между смежными циклами  $i_1 - i$

$$\Delta_{i, (\text{между циклами})} = x_{i, (\text{послед.цикл})} - x_{i, (\text{предыд.цикл})}$$

и первым и текущим циклами  $i - i_0$

$$\Delta_{i, (\text{полн.})} = x_{i, (\text{послед.цикл})} - x_{i, (1 \text{ цикл})}$$

При этом для ЗГО вертикальные перемещения определяются как разность отметок  $H_i$ , а горизонтальные перемещения – как разность радиусов  $R_i$ . Правило знаков таково, что перемещения, направленные на увеличение размера сооружения, имеют знак (+), а направленные на уменьшение размера – знак (-). Для цилиндрической части ЗГО при каждом цикле измерений определяют

$$R_i = \sqrt{(x_i - X_0)^2 + (y - Y)^2}, \quad (2.39)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты контролируемых точек оболочки;  $X_0, Y_0$  – координаты центра оболочки.

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. На рис. 2.22 изображена схема воздействия каната на стенку оболочки при его натяжении. В каждом цикле, начиная с первого, определяют размер толщины стенки.

$$l = (R_2 - R_1)_i, \quad (2.40)$$

где  $l$  – толщина стенки.

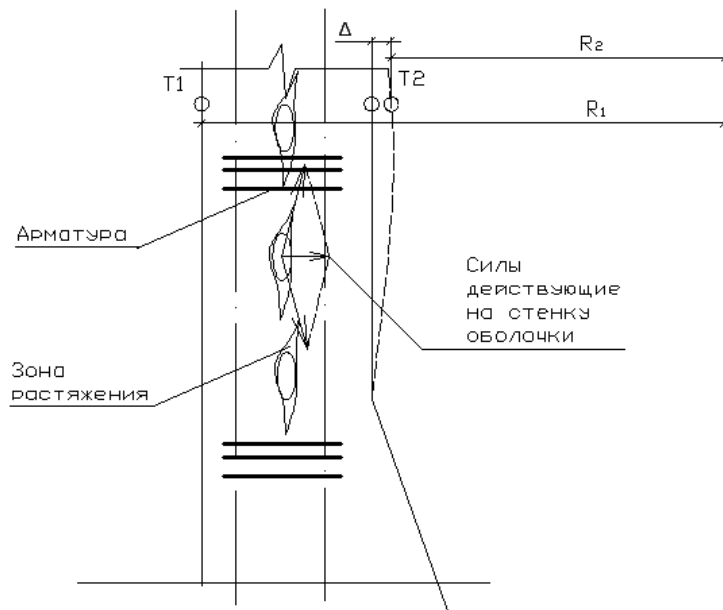


Рисунок 2.22. Схема контроля толщины стенки ЗГО при преднапряжении оболочки

При определении геометрических параметров ЗГО в период преднапряжения измерения координирование контролируемых точек осуществляются по всем измерительным каналам (внутри и снаружи ЗГО). С внутренней стороны оболочки контролю подлежат точки, находящиеся на стальной диафрагме и равномерно распределенные по ее поверхности, которые замаркированы для обеспечения однообразия выполнения измерений на одну и ту же точку по циклам. Измерения координат осуществляют с точностью 0,1 мм. При этом в соответствии с доступностью зон контроля измерения по цилиндрической части ЗГО осуществляются с рабочей отметки  $H = 37$  м. Ниже данной отметки измерения могут быть организованы лишь на отдельных автономных точках (согласно распределению помещений внутри оболочки и в ее обстройке и в соответствии с доступностью точек и возможностью монтажа измерительного устройства) и осуществлены средствами измерений малых перемещений (например, типа индикатора часового типа).

На внешней стороне ЗГО контролируют точки, находящиеся на цилиндрической части выше отметки  $H = 46$  м (выше перекрытия обстройки). Их распределение и маркирование по контролируемой поверхности таково, что ниже опорного кольца (в моментной зоне) по вертикали точки располагаются с шагом, равным толщине контролируемого объекта, в переходной зоне – шаг равен полторы толщины, в безмоментной зоне – шаг равен двум толщинам оболочки. Такое распределение точек относится к вертикальным сечениям, которые расположены в зонах, приуроченных к осям оболочки.

На опорном кольце контролируемые точки, определяемыми параметрами которых являются отметки такие же, как и для цилиндрической части, располагаются в зонах осей оболочки.

На купольной части контролируемые точки располагают по направлениям осей и по направлениям полчетвертей с шагом, следуя от опорного кольца, равного толщине контролируемого объекта в моментной зоне; в переходной зоне – с шагом, равным полторы толщины; в безмоментной зоне – шаг равен двум (и более) толщинам оболочки [43, 69].

При обработке измерительной информации величины перемещений исследуемых точек аппроксимируют стандартными функциями полиномов и определяют текущую математическую модель исследуемого элемента строительной конструкции ЗГО. Обработка данных при обжатии ЗГО выполняется следующим образом: учитывая, что в ГА 701 измерения выполняются по точкам, расположенным в вершинах нерегулярной сетки, распределенной по внутренней поверхности ЗГО и имеющей переменный шаг, первоначально путем интерполяции между смежными точками результаты измерений приводятся к вершинам регулярной сетки, главные стороны которой совпадают с осями ЗГО (рис. 2.23).

Далее на цилиндрической ( $36,9 < H < 57,0$ ) и купольной ( $57,0 < H < 64,8$ ) частях ЗГО выполняют аппроксимацию точек, расположенных на горизонтальных и вертикальных сечениях. Вертикальные сечения аппроксимируют полиномиальными функциями, а горизонтальные – уравнениями окружности. Затем полученные интерполяционные функции, полученные по цилиндрической части ( $36,9 < H < 57,0$ ), экстраполируют на нижнюю часть оболочки ( $13,2 < H < 36,9$ ).

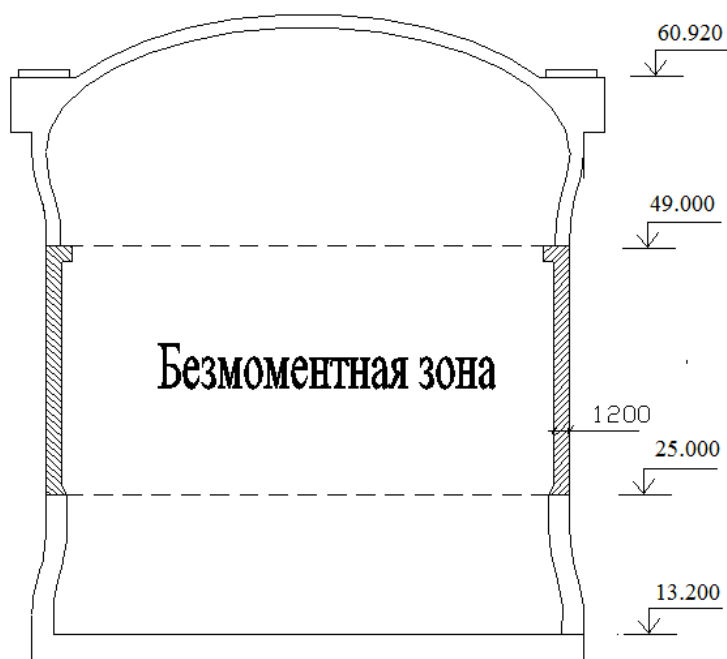


Рисунок 2.23. Форма деформации герметичной оболочки при преднапряжении армоканатов

На внешней стороне оболочки обработку измерительной информации осуществляют в следующем порядке. Учитывая особенность, что измерения на данной стороне оболочки выполняются по предварительно разбитым и замаркированным точкам, находящимся в узлах регулярной сетки, сразу выполняют аппроксимацию точек на цилиндрической ( $42,0 < H < 54,0$ ) и купольной ( $59,0 < H < 66,0$ ) частях ЗГО (см. рис. 2.23).

Поскольку измерения выполняются с внешней и внутренней сторон ЗГО в единой системе координат, то все главные стороны регулярных сеток, расположенных в вертикальных сечениях оболочки, попарно симметричны относительно оси стенки ЗГО.

Измерения, выполняемые на опорном кольце, имеют целью контролировать наклон оси ЗГО в процессе ее обжатия и испытания и, кроме этого, являются вспомогательной информацией об изменении формы цилиндрической части ЗГО. Обработка данной измерительной информации осуществляется как ряд повторных измерений при определении осадки объекта.

Для определения коэффициента  $K_0$  запаса прочности используют результаты измерений, выполненные до преднапряжения ЗГО перед её испытанием на прочность и на этапе испытаний при внутреннем давлении 4,6 атм. По значениям результатов измерений вычисляют:

$$\Delta_{\text{преднапряжения}} = A_{\text{преднапряжения}} - A_0;$$

$$\Delta_{\text{испытания}} = A_{\text{испытания}} - A_{\text{преднапряжения}},$$

где  $A_0, A_{\text{преднапряжения}}, A_{\text{испытания}}$  – результаты измерений, характеризующие положение контролируемых точек на соответствующих этапах.

Коэффициент  $K_0$  вычисляется по формуле (2.26). При эксплуатации оболочки ежегодно определяют  $K_i$  по формуле (2.27) и коэффициент текущего ресурса  $d_i$  по формуле (2.28). 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.

**Выводы по главе.** В результате выполненных исследований:

– с учетом физических свойств оболочки разработана методика диагностики её технического состояния в процессе преднатяжения испытания и эксплуатации;

– разработана методика формирования восстанавливаемого геодезического обоснования, которая обеспечивает идентичность результатов измерений на всех этапах существования ЗГО;

– обоснована методика обработки результатов измерений, позволяющая оценить техническое состояние ЗГО.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

#### 3.1. Построение измерительной системы при преднапряжении оболочки реакторного отделения третьего энергоблока РоАЭС

В процессе диссертационных исследований выполнены работы по геодезическому обеспечению преднапряжения и испытания на прочность защитных оболочек энергоблоков № 1, 2, 3 РоАЭС.

При выполнении работ на блоке № 3 первоначально сформировано многоярусное геодезическое обоснование. Внешние геодезические сети сформированы на обстройке реакторного отделения и на опорном кольце защитной оболочки (рис. 3.1). На обстройке обоснование создано в виде замкнутого многоугольника, причем четыре пункта расположены на строительных осях (I, II, III, IV) защитной оболочки.

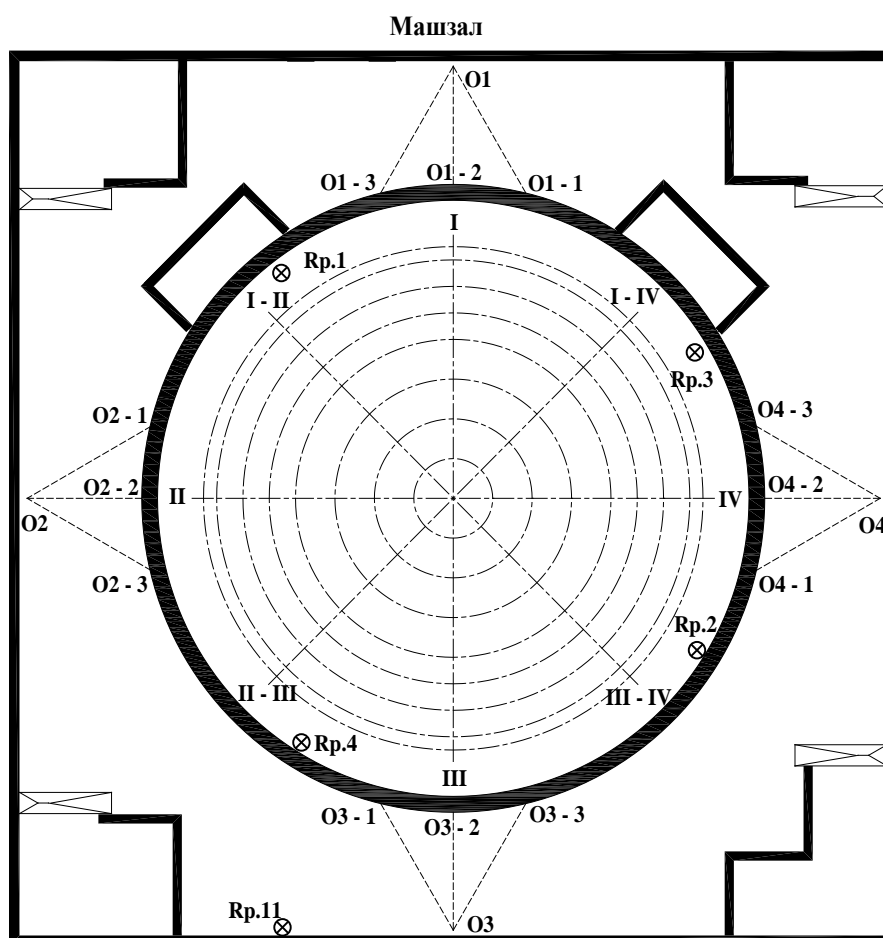


Рисунок 3.1. Схема расположения пунктов обоснования и исследуемых точек на купольной и цилиндрической частях оболочки (точки располагаются в местах пересечений окружных и меридиональных направлений)

Контролируемые точки расположены непосредственно на поверхности защитной оболочки и окрашены несмываемой краской (рис. 3.2). Точки обоснования на обстройке закреплены на ее стене и замаркированы несмываемой краской.

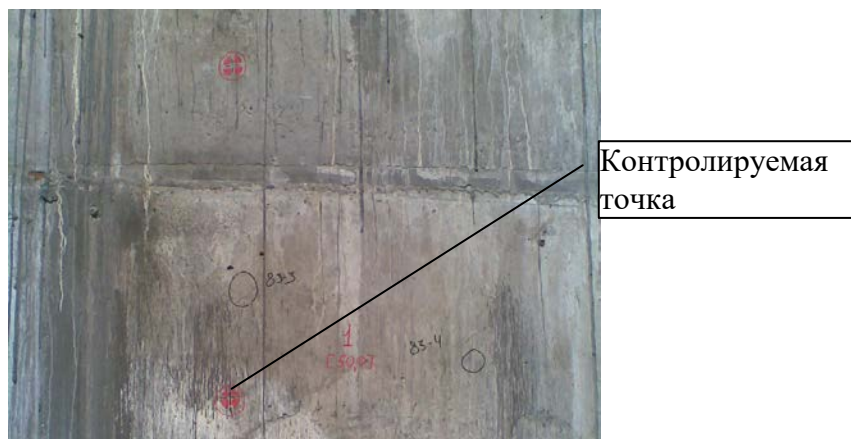


Рисунок 3.2. Контролируемые точки цилиндрической части защитной оболочки

На опорном кольце защитной оболочки и ее купольной части контрольные точки размещены по направлениям ее осей. Все пункты замаркированы несмываемой краской (рис. 3.3).

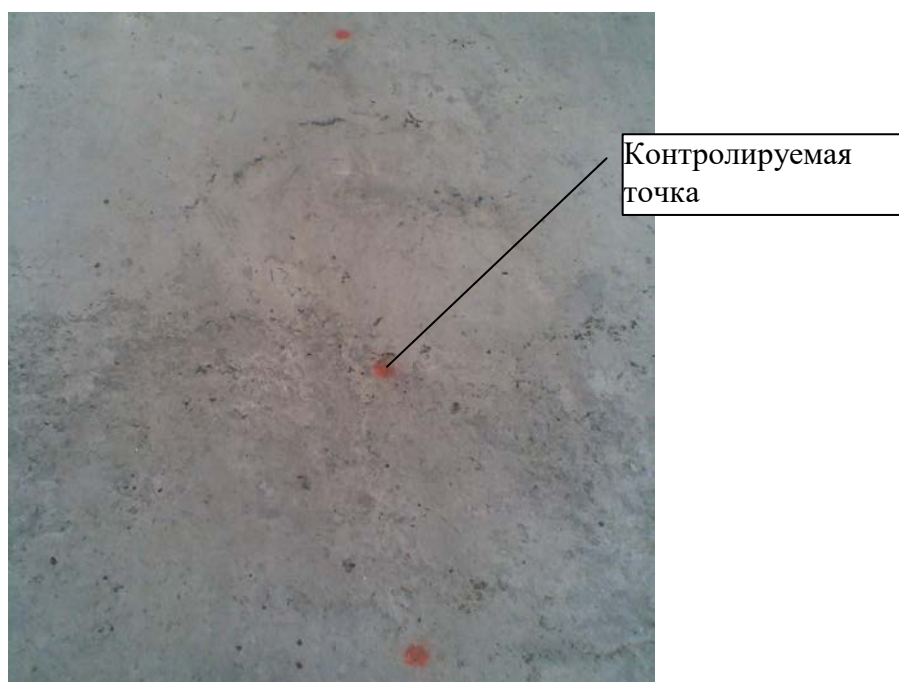


Рисунок 3.3. Контролируемые точки, расположенные на купольной части защитной оболочки

Внутреннее обоснование сформировано в главном зале (помещение ГА-701) реакторного отделения, пункты обоснования закреплены на строительных

конструкциях путем приклеивания шайб к их поверхностям. Контролируемые точки размещены на горизонтах 38,0 и 49,0 м и равномерно распределены по окружностям в каждом сечении. На горизонте 38,0 м точки закреплены путем приклеивания шайб к стальной диафрагме оболочки, на горизонте 49,0 м – маркированы несмываемой краской на поверхности стальной диафрагмы. В каждом сечении размещено не менее восьми контролируемых точек, причем четыре из них – на осевых направлениях (I–IV). Контролируемые точки выше отметки 49,0 м равномерно распределены по внутренней поверхности оболочки; маркирование этих точек не производили, так как их положение определяют тахеометром, имеющим функцию работы в безотражательном режиме.

При поэтапном контроле внешних геометрических параметров гермооболочки положение контролируемых точек, расположенных на цилиндрической части на вертикальных сечениях, определяли методом пространственной полярной засечки электронными тахеометрами Elta-S10, Set 3030 R. Положение контролируемых точек, расположенных на купольной части защитной оболочки, определяли методом геометрического нивелирования нивелиром Dini 03.

Контроль внутренних геометрических параметров защитной оболочки осуществляли на стадии преднапряжения путем определения положения контролируемых точек, расположенных на горизонтах 38,0 и 49,0 м и равномерно распределенных по окружности в каждом сечении, треккером Vintag.

***Преднапряжение защитной оболочки.*** В результате проведения геодезических работ, выполненных при формировании геодезического обоснования и обжатию защитной оболочки, получены следующие результаты. Контроль геометрических параметров цилиндрической части был осуществлен путем поцикловых измерений контрольных расстояний между точками геодезического обоснования (1–0, 2–0, 3–0, 4–0) и контролируемыми точками (1–11, 1–12; 2–21, 2–22; 3–31, 3–32; 4–41, 4–42), расположенными на поверхности защитной оболочки (рис. 3.4). Результаты работ приведены в табл. 3.1.

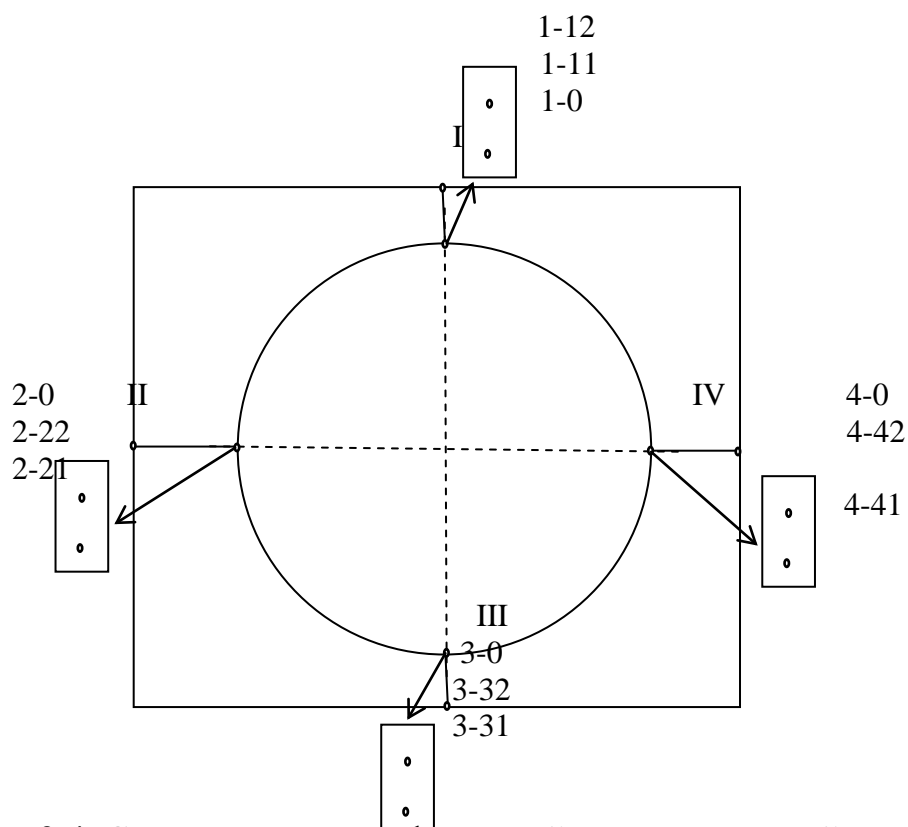


Рисунок 3.4. Схема контроля деформаций цилиндрической части при обжатии оболочки

Таблица 3.1. Значения контрольных размеров и перемещений точек, расположенных на внешней поверхности защитной оболочки

Название		23.08.2013	25.09.2013 26.09.2013	13.02.2014	(1 цикл)- (6 цикл)	(2-3 цикл)- (6 цикл)	Среднее	Отклонение от среднего
		1 цикл, мм	2-3 цикл, мм	6 цикл, мм	мм	мм	$[(1-1)+(1-3)]/2,$ мм	крен оболочки, мм
		контрольные размеры			перемещения			
Ось 1	11	9634,5	9633,0	9645,4	-10,9	-12,3	-15,3	2,9
	12	9622,5	9621,9	9633,8	-11,3	-11,9	-14,0	2,0
Ось 2	21	9647,4	9646,3	9655,5	-8,1	-9,2	-10,9	1,7
	22	9650,3	9647,6	9656,7	-6,4	-9,0	-10,4	1,4
Ось 3	31	9562,0	9561,0	9579,3	-17,3	-18,2	-15,3	-2,9
	32	9565,5	9566,2	9582,2	-16,7	-16,0	-14,0	-2,0
Ось 4	41	9576,0	9574,0	9586,7	-10,7	-12,6	-10,9	-1,7
	42	9573,2	9571,6	9583,4	-10,2	-11,8	-10,4	-1,4

*Примечание:* 23.08.2013 г. был выполнен первый цикл измерений; 25.09.2013, 26.09.2013 гг. – два цикла (2 и 3) измерений (при девяти натянутых канатах в цилиндрической части оболочки). В таблицу включены средние из двух значений результатов измерений; 13.02.2014 г. был выполнен шестой цикл измерений. Цикл был проведен через четыре месяца после реализации в полном объеме программы натяжения канатов.

Непосредственно после завершения полной программы обжатия оболочки (ноябрь 2014 г.) в ее цилиндрической части на горизонте 47,0 – 49,0 м были зарегистрированы перемещения, направленные на уменьшение радиуса горизонтального сечения, соответствующие величинам порядка 4 мм. Данная величина коррелируется с величинами деформаций рельсового пути полярного крана, установленного в помещении ГА-701 на третьем энергоблоке. Отметка консолей, на которых установлены балки рельсового пути, – 46,0 м. Съёмка рельсового пути, выполненная 04.08.13 г. (до обжатия), показала, что отклонение среднего фактического радиуса от проектного значения составила величину –1,42 мм. В результате съёмки, выполненной 30.01.2014 г. (после обжатия), получена величина того же порядка –4,5 мм. Разность полученных значений составляет –3,08 мм. Таким образом, рельсовый путь является элементом жесткости защитной оболочки.

Затем через четыре месяца после завершения программы обжатия был выполнен цикл измерений, и в результате получены значения перемещений, приведенные в табл. 3.1. При этом средние перемещения составили значения, соответствующие величинам: по оси 1 и оси 3 – 14,7 мм, по оси 2 и оси 4 – 10,7 мм, что больше величин перемещений, полученных при завершении программы обжатия в 3,7 и 2,7 раза соответственно. Данные результаты объясняются следующим. Во-первых, консоли, воспринимая усилия воздействия системы СПЗО, стремятся переместиться внутрь оболочки, однако этому перемещению препятствуют балки рельсового пути. Напряжение концентрируется в зоне крепления балок. При постоянном усилии балки скользят в отверстиях болтовых соединений. Это и приводит к некоторому конечному увеличению перемещений с течением времени. Во-вторых, при постоянном воздействии усилия обжатия происходит усадка бетона стены оболочки, что также приводит к некоторому увеличению перемещений с течением времени.

При обжатии оболочки из-за неравномерно распределенных концентраторов напряжения в теле оболочки происходит неравномерное сжатие ее

стенок, что, в свою очередь, приводит к смещению продольной оси симметрии в пространстве, выраженное отклонением ее от вертикали (рис. 3.5, 3.6).

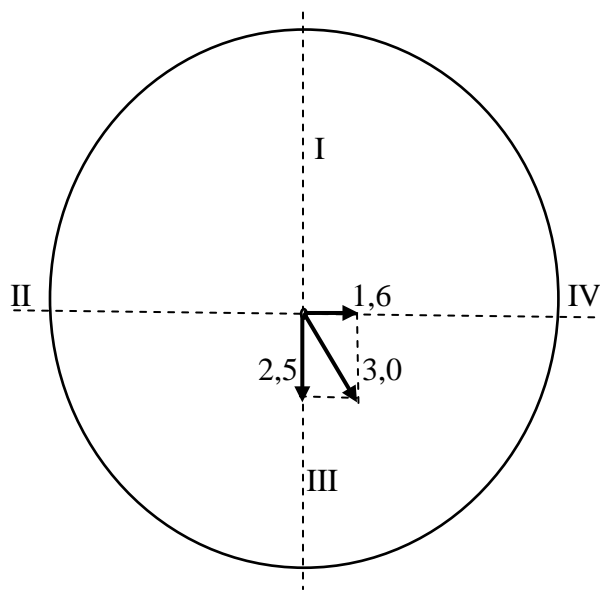


Рисунок 3.5. Отклонение оси симметрии оболочки от вертикали на отметке 47,0 м

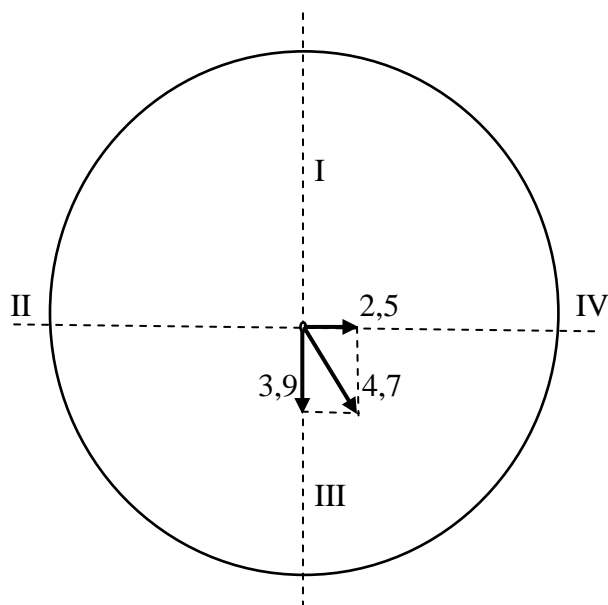


Рисунок 3.6. Отклонение оси симметрии оболочки от вертикали на отметке 66,0 м

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поциклового нивелирования контролируемых точек, расположенных на поверхности защитной оболочки (рис. 3.7). Результаты работ приведены в табл. 3.2, 3.3.

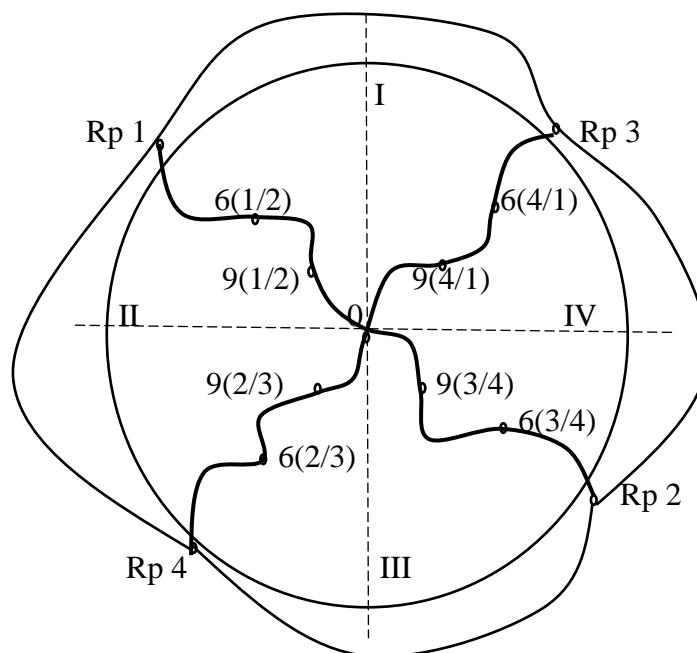


Рисунок 3.7. Схема нивелирования купольной части при обжатии оболочки

Таблица 3.2. Результаты нивелирования купола защитной оболочки

Рабочие репера	Условные отметки, мм
T1	+1
T2	0
T3	0
T4	+4

Дата выполнения контрольных измерений	9.10.13 г.	7.11.13 г.	13.11.13 г.	27.11.13 г.	02.04.14 г.
Номера контролируемых точек	условные отметки				
	(1), мм	(2), мм	(3), мм	(4), мм	(5), мм
6(2/1)	2368	2364	2361	2361	2357
9(2/1)	4551	4552	4537	4536	4531
9(3/4)	4546	4548	4529	4530	4519
6(3/4)	2266	2265	2255	2255	2252
<b>0</b>		4867	4859	4854	4849
6(1/4)	2264	2264	2257	2256	2256
9(1/4)	4487	4484	4480	4475	4476
9(2/3)	4546	4549	4542	4533	4538
6(2/3)	2329	2328	2323	2322	2321
<b>0</b>	4866	4868	4859	4851	4849

*Примечание:* 02.04.14 г. был выполнен пятый цикл измерений. Цикл был проведен через пять месяцев после реализации полной программы натяжения канатов в полном объеме.

Таблица 3.3. Величины вертикальных перемещений исследуемых точек купола защитной оболочки

Разность значений контрольных измерений	9.10.13 - 7.11.13 гг.	9.10.13 - 13.11.13 гг.	9.10.13 - 27.11.13 гг.	9.10.13 - 02.04.14 гг.	Средние значения перемещений 1-5, мм
	перемещение, мм				
Номера контролируемых точек	1-2	1-3	1-4	1-5	
6(2/1)	-4	-7	-7	-11	<b>-9,5</b>
9(2/1)	1	-14	-15	-20	<b>-15,5</b>
9(3/4)	2	-17	-16	-27	<b>-17,5</b>
6(3/4)	-1	-11	-11	-14	<b>-11,0</b>
<b>0</b>	1	-7	-12	-17	<b>-17,0</b>
6(1/4)	0	-7	-8	-8	<b>-11,0</b>
9(1/4)	-3	-7	-12	-11	<b>-17,5</b>
9(2/3)	3	-4	-13	-8	<b>-15,5</b>
6(2/3)	-1	-6	-7	-8	<b>-9,5</b>
<b>0</b>	2	-7	-15	-17	<b>-17</b>

На рис. 3.8 представлена схема расположения точек и их максимальных величин перемещения на купольной части при обжатии оболочки.

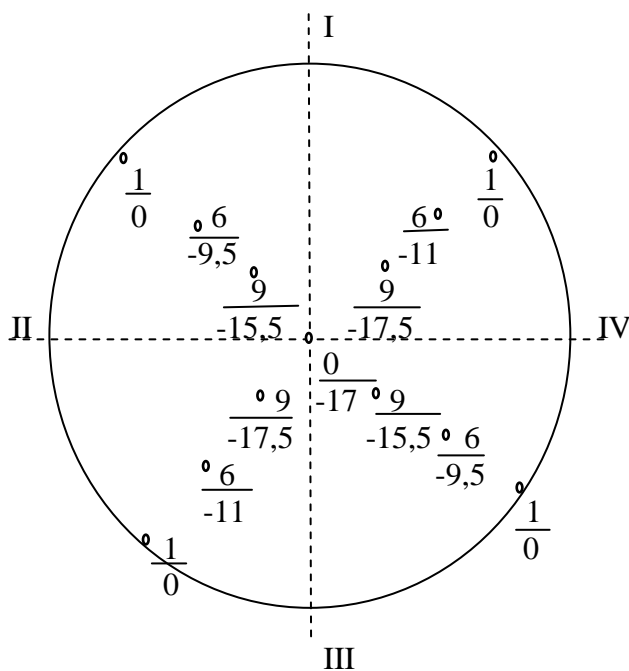


Рисунок 3.8. Схема расположения точек и их максимальных величин перемещения на купольной части при обжатии оболочки.

Таким образом, при обжатии оболочки за пять месяцев (время усадки бетона) максимальные перемещения, локализованные в ее центральной купольной части, составили  $-17,5$  мм.

**Испытание оболочки на прочность.** Работы при реализации программы испытания оболочки на прочность заключались в следующем. В отличие от программы работ, выполненных при преднапряжении оболочки, на данном этапе контролируемые точки на цилиндрической части были закреплены на осях с помощью отражающей пленки в количестве трех на каждом створе (рис. 3.9). На купольной части размещение контролируемых точек не изменялось. Контроль положения точек выполнялся по программе испытаний, при этом измерения выполнялись на каждом этапе подъема и сброса давления в гермообъеме оболочки.

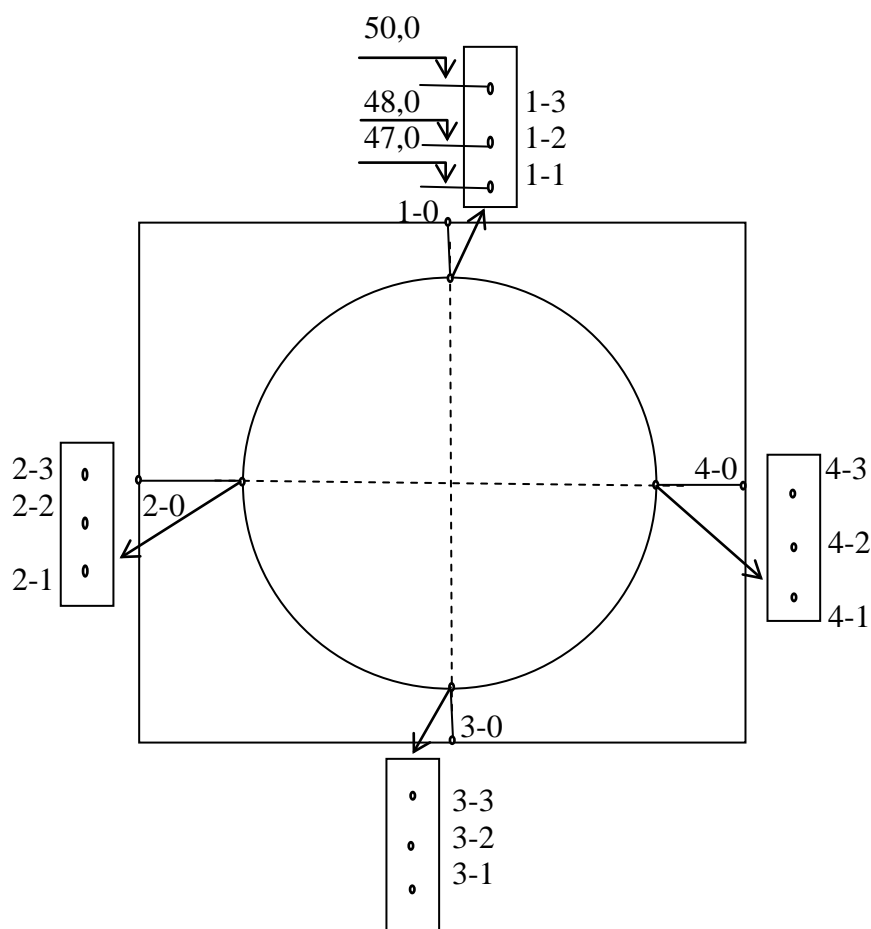


Рисунок 3.9. Размещение контролируемых точек на цилиндрической части защитной оболочки

Контроль геометрических параметров цилиндрической части был осуществлен путем поэтапных измерений контрольных расстояний между точками геодезического обоснования (1-0, 2-0, 3-0, 4-0) и контролируемыми точками (1-1, 1-2, 1-3; 2-1, 2-2, 2-3; 3-1, 3-2, 3-3; 4-1, 4-2, 4-3), расположенными на поверхности защитной оболочки (см. рис. 3.9). Результаты работ

приведены в табл. 3.4. В графическом виде параметры перемещений стенки защитной оболочки, определенные по точкам, расположенным на ее внешней поверхности, представлены на рис. 3.10.

Таблица 3.4. Средние значения величины горизонтальных перемещений исследуемых точек цилиндрической части защитной оболочки

№ оси	Этапы изменения давления								
	0	0,7(1)	2	3	4	4,6	4	0,7	0
1	0	1,76	2,43	2,43	3,84	4,09	4,29	0,41	-2,33
2	0	0,78	2,19	1,97	2,86	3,73	3,56	0,25	-1,77
3	0	1,38	1,08	0,98	3,10	4,54	3,88	0,45	-1,67
4	0	2,08	2,23	2,13	3,64	4,24	4,58	1,02	-1,33
Среднее	0	1,50	1,988	1,88	3,36	4,15	4,08	0,53	-1,77

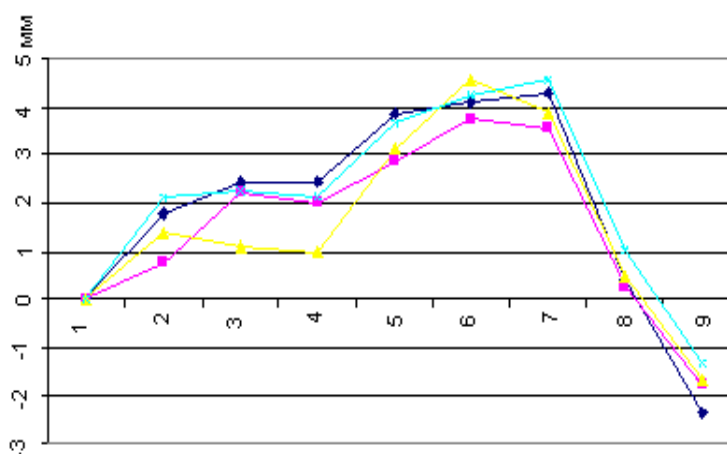


Рисунок 3.10. Схема перемещений стенки защитной оболочки по четырем осям

Максимальное среднее значение горизонтального перемещения стенки защитной оболочки при давлении 4,6 атм составило +4,2 мм. В табл. 3.5 представлены сравнительные характеристики максимальных величин горизонтальных перемещений исследуемых сечений при обжатии и испытании оболочки на отметке 47,0, совпадающих с ее строительными осями. Из представленных значений видно, что величины максимальных перемещений стенки оболочки при испытании на этапе максимального давления 4,6 атм не превосходят 40,2% от величин перемещений, зарегистрированных при обжатии оболочки. Следовательно, при максимальном внутреннем давлении оболочка находилась в сжатом режиме работы. Коэффициент запаса соответствует величине 2,5.

Таблица 3.5. Сравнительные характеристики максимальных величин горизонтальных перемещений

№ оси	Средние максимальные значения перемещений.		Процентное соотношение
	преднапряжение, мм	испытание, мм	
1	-12,2	+4,1	33,6%
2	-9,2	+3,7	40,2%
3	-17,1	+4,5	26,3%
4	-12,3	+4,2	34,1%
	Среднее		33,6%

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поциклового нивелирования контролируемых точек, расположенных на поверхности защитной оболочки (см. рис. 3.7). Результаты работ приведены в табл. 3.6. В графическом виде параметры перемещений купольной части защитной оболочки, определенные по точкам, расположенным на ее внешней поверхности, представлены на рис. 3.11.

Таблица 3.6. Величины средних вертикальных перемещений исследуемых точек купола защитной оболочки

№ контрольных точек	Этапы изменения давления									
	0	0,7(1)	0,7(2)	2	3	4	4,6	4	0,7	0
	величины перемещений, мм									
1	0,0	-0,2	-0,6	-0,5	-0,1	0,6	-0,2	-1,1	-1,0	-1,0
	0,0									
2	0,0					-0,1				
	0,0									
3	0,0					-0,4				
	0,0									
4	0,0	0,0	-0,1	1,6	1,1	2,3	2,7	2,1	-0,4	-0,8
	0,0									
5	0,0					2,8				
	0,0									
6	0,0	0,6	0,4	2,1	2,2	4,5	4,6	3,3	-0,3	-1,2
	0,0									
7	0,0					5,3				
	0,0									
8	0,0					6,9				
	0,0									
9	0,0	0,6	0,6	3,5	4,0	7,5	7,7	6,1	0,2	-0,6
	0,0									
10	0,0					8,1				
	0,0									
0	0,0	0,6	0,7	3,7	3,8	7,5	7,7	6,6	0,5	-1,0

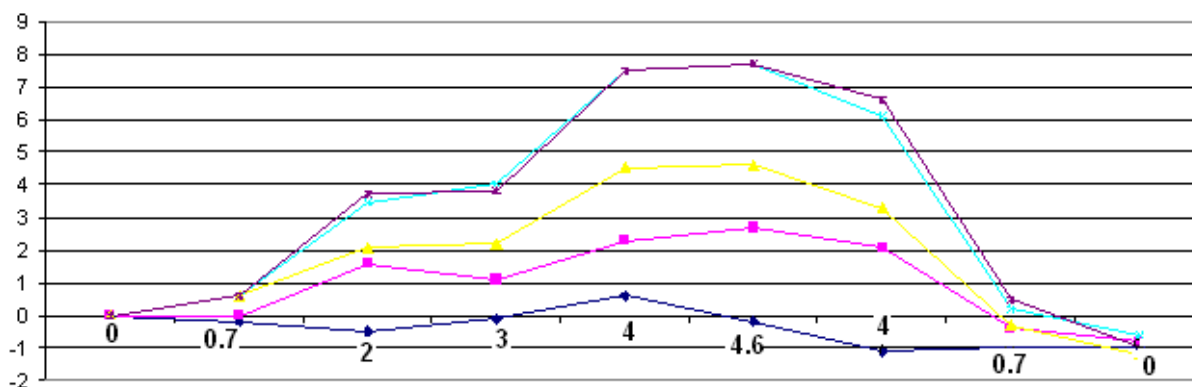


Рисунок 3.11. Схема перемещений купольной части защитной оболочки в исследуемых точках 1, 4, 6, 9, 0

Из схемы, представленной на рис. 3.11, видно, что при изменении давления от 2 до 3 атм вертикальные перемещения неадекватны значению изменения давления.

В табл. 3.7 представлены сравнительные характеристики максимальных величин вертикальных перемещений исследуемых точек при обжати и испытании оболочки. Максимальные средние значения вертикальных перемещений купольной части защитной оболочки на этапе 4,6 атм представлены в графическом виде на рис. 3.12.

Таблица 3.7. Сравнительные характеристики максимальных величин вертикальных перемещений

Номера контролируемых точек	Средние максимальные значения перемещений		Процент
	преднапряжение, мм	испытание, мм	
6(2/1)	-9,5	+4,6	48,2%
9(2/1)	-15,5	+7,7	49,7%
9(3/4)	-17,5	+7,7	44%
6(3/4)	-11	+4,6	41,8%
0	-17	+7,7	44%
6(1/4)	-11	+4,6	41,8%
9(1/4)	-17,5	+7,7	44%
9(2/3)	-15,5	+7,7	49,7%
6(2/3)	-9,5	+4,6	48,2%
0	-17	+7,7	44%
		Среднее	45,5%

Из представленных значений видно, что величины максимальных перемещений точек купольной части при испытании на этапе максимального давления 4,6 атм не превосходят 49,7% от величин перемещений, зарегистри-

стрированных при обжатии оболочки. Следовательно, при максимальном внутреннем давлении оболочка находилась в сжатом режиме ее работы. Коэффициент запаса соответствует величине 2,0.

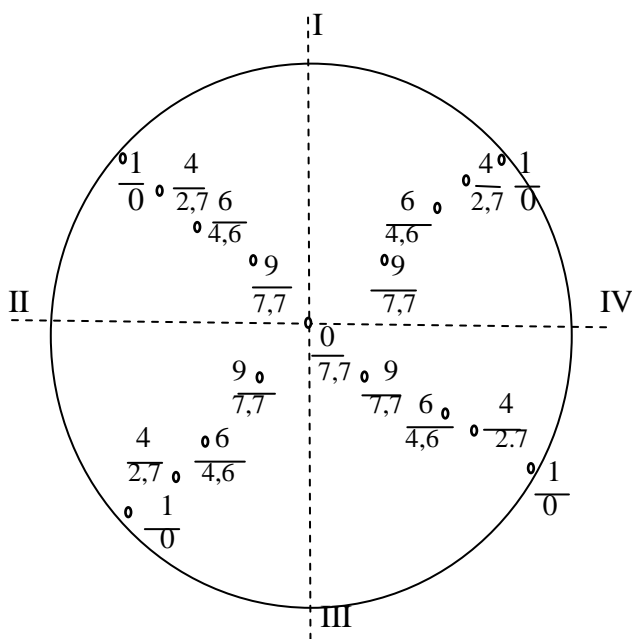


Рисунок 3.12. Схема средних значений перемещений купольной части защитной оболочки на этапе давления 4,6 атм

При контроле геометрических параметров купольной части защитной оболочки был осуществлен контроль пространственного положения опорного кольца. Результаты работ представлены в табл. 3.8. Из таблицы следует, что опорное кольцо при наддуве оболочки изменило свое высотное положение на величину +3,5 мм.

Таблица 3.8. Величины средних вертикальных перемещений опорного кольца защитной оболочки

Этапы давления		Разность
0	4,6	4,6 – 0
условные отметки, м	условные отметки, м	вертикальные перемещения опорного кольца, мм
ось 1		
0,63	0,63	3,7
1,31	1,31	3,7
2,65	2,65	4,5
Среднее		<b>+4,0</b>
Ось 2		
0,59	0,59	3
1,39	1,39	3

2,61	2,61	3,4
Среднее		<b>+3,0</b>
<b>Окончание таблицы 3.8</b>		
Этапы давления		Разность
0	4,6	4,6 – 0
условные отметки, м	условные отметки, м	вертикальные перемещения опорного кольца, мм
ось 3		
0,57	0,57	3,8
1,46	1,46	4,1
2,65	2,65	4,1
	Ср,	<b>+4,0</b>
ось 4		
0,54	0,54	2,9
1,39	1,39	3
2,68	2,68	3
Среднее		<b>+3,0</b>

**Итогом работ** по контролю геометрических параметров ЗГО третьего блока РоАЭС стали следующие результаты.

1. Максимальные вертикальные перемещения купольной части при преднапряжении ЗГО для точек 9–0 составили –17,5 мм. Горизонтальные перемещения для цилиндрической части при преднапряжении для сечений в осях 1–3 составили –15 мм.

2. Максимальные вертикальные перемещения купольной части при испытании оболочки при давлении 4,6 атм для точек 9–0 составили +7,7 мм. Горизонтальные перемещения для цилиндрической части максимально составили +4,5 мм.

3. Зона пластических деформаций купольной части зарегистрирована при изменении давления от 2 до 3 атм.

4. Вертикальные перемещения опорного кольца купольной части гермооболочки при возрастании внутреннего давления до 4,6 атм составили +3,5 мм.

### **3.2. Построение геодезической диагностической системы при испытании оболочки реакторного отделения второго энергоблока РоАЭС**

В период с 30 октября по 17 ноября 2009 г. были выполнены работы по определению значений перемещений контролируемых точек гермооболочки второго реакторного отделения Ростовской АЭС в период её испытаний. При реализации данных работ была сформирована геодезическая диагностическая система, которая обеспечивала дублирование штатной контрольно-измерительной системы. Отметим, что в штатной системе изначально оказались неработоспособны 15% датчиков. Построение геодезической диагностической системы заключалось в том, что предварительно на перекрытии обстройки реакторного отделения второго энергоблока РоАЭС было сформировано плановое обоснование в виде четырёхугольника, вершины которого располагаются на осях ЗГО. На перекрытие обстройки реакторного отделения была передана отметка строительной системы высот и развито высотное обоснование методом геометрического нивелирования.

С точек планового обоснования, расположенного на обстройке реакторного отделения, (О1, О2, О3, О4) контролировали цилиндрическую часть оболочки. С каждой точки планового обоснования наблюдались три сечения по девять точек в каждом (соответственно всего  $4 \times 3 \times 9 = 108$  контролируемых точек). Первые точки располагались под опорным кольцом купола ЗГО, последние – на горизонте примыкания оболочки к обстройке реакторного отделения (рис. 3.13).

По точкам планового обоснования, расположенным на перекрытии обстройки реакторного отделения (О1, О2, О3, О4, Т1, Т2, Т3, Т4), был проложен полигонометрический ход. По точкам высотного обоснования, расположенным на перекрытии обстройки реакторного отделения (Rp1, Rp2, Rp3, Rp4), был проложен нивелирный ход III класса. Схемы ходов приведены на рис. 3.14. Численные результаты величин ошибок измерений полигонометрического и нивелирного хода приведены в табл. 3.9.

С точек планово-высотного обоснования, расположенного на обстройке реакторного отделения, были переданы оси и отметки на купольную часть ЗГО. Используя их в качестве обоснования, выполнено пространственное координирование исследуемых закрепленных точек на куполе оболочки. Положение закрепленных точек на купольной части было предварительно определено в результате разбивочных работ, при этом их расположили вдоль осей (I, II, III, IV) и полуосей (I-II, II-III, III-IV, IV-I) на восьми концентрических радиальных поясах.

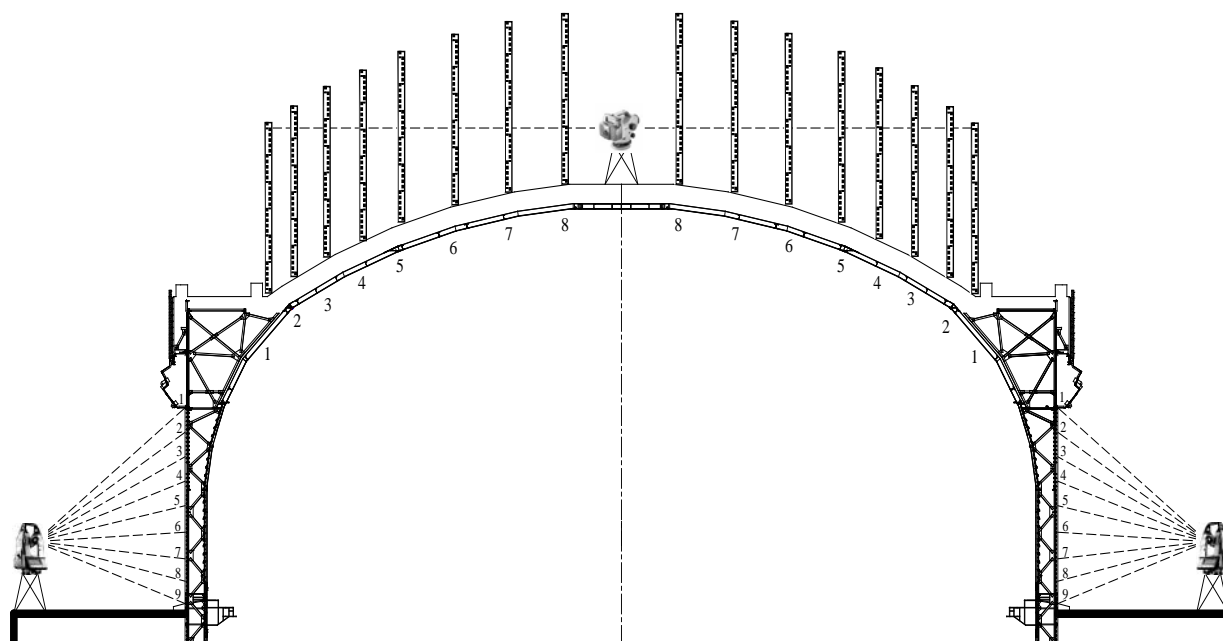


Рисунок 3.13. Схема контроля исследуемых точек на цилиндрической и купольной части гермооболочки

Рисунок 3.14. Схема планового и высотного геодезического обоснования  
 Таблица 3.9. Оценка точности результатов измерений

Наименование пунктов	Средние квадратические ошибки планового положения пунктов, м			Эллипсы ошибок, м		Дирекционный угол большой полуоси $\alpha$	Средние квадратические ошибки высотного положения пунктов, м
	общая $M$	$M_x$	$M_y$	большая полуось $a$	малая полуось $b$		
O1	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004	3°18'59"	0,001
O2	0,004	0,003	0,003	0,004	0,001	136°31'12"	0,002
O3							0,001
O4	0,005	0,004	0,003	0,004	0,002	31°20'07"	0,001
T1	0,004	0,002	0,003	0,003	0,000	123°58'43"	0,003
T2	0,003	0,002	0,003	0,003	0,000	51°35'17"	0,001
T3	0,005	0,004	0,003	0,004	0,003	10°05'02"	0,002
T4	0,005	0,004	0,004	0,004	0,003	160°28'53"	0,003

Измерения выполнялись в соответствии с этапами изменения давления внутри ЗГО. Всего было выполнено 11 циклов измерений:

- 1) исходный цикл измерений, давление 0,0 атм, дата замера 30.10.2009 г.;
- 2) вакуумирование, давление -0,5 атм, дата замера 31.10.2009 г.;

- 3) после вакуумирования, давление 0,0 атм, дата замера 31.10.2009 г.;
- 4) увеличение давления (надув), +0,7 атм, дата замера 2.11.2009 г.;
- 5) увеличение давления (надув), +2,0 атм, дата замера 3.11.2009 г.;
- 6) увеличение давления (надув), +3,0 атм, дата замера 3.11.2009 г.;
- 7) увеличение давления (надув), +4,0 атм, дата замера 4.11.2009 г.;
- 8) увеличение давления (надув), +4,6 атм, дата замера 5.11.2009 г.;
- 9) сброс давления (сдув), +4,0 атм, дата замера 5.11.2009 г.;
- 10) сброс давления (сдув), +0,7 атм, дата замера 6.11.2009 г.;
- 11) сброс давления (сдув), 0,0 атм, дата замера 7.11.2009 г.

Характеристики 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 находятся разности между смежными циклами  $(i - 1) - i$  и первым и текущим циклами  $i - i_0$ .

Названные разности характеризуют абсолютные величины перемещений исследуемых точек в заданных направлениях. При этом вертикальные перемещения определялись как разность отметок  $H_i$ , а горизонтальные перемещения – как разность радиусов  $R_i$ . Правило знаков таково, что перемещения, направленные на увеличение размера сооружения, имеют знак (+), направление на уменьшение размера – знак (-). В графическом виде перемещения исследуемых точек представлены на рис. 3.15–3.17.

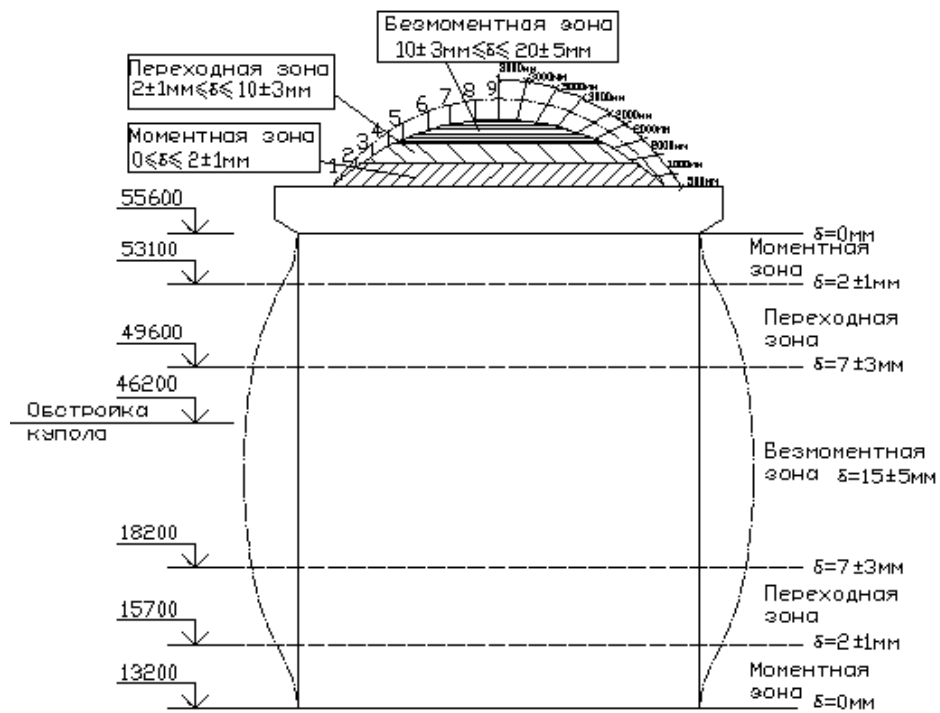


Рисунок 3.15. Схема перемещений цилиндрической и купольной частей ЗГО

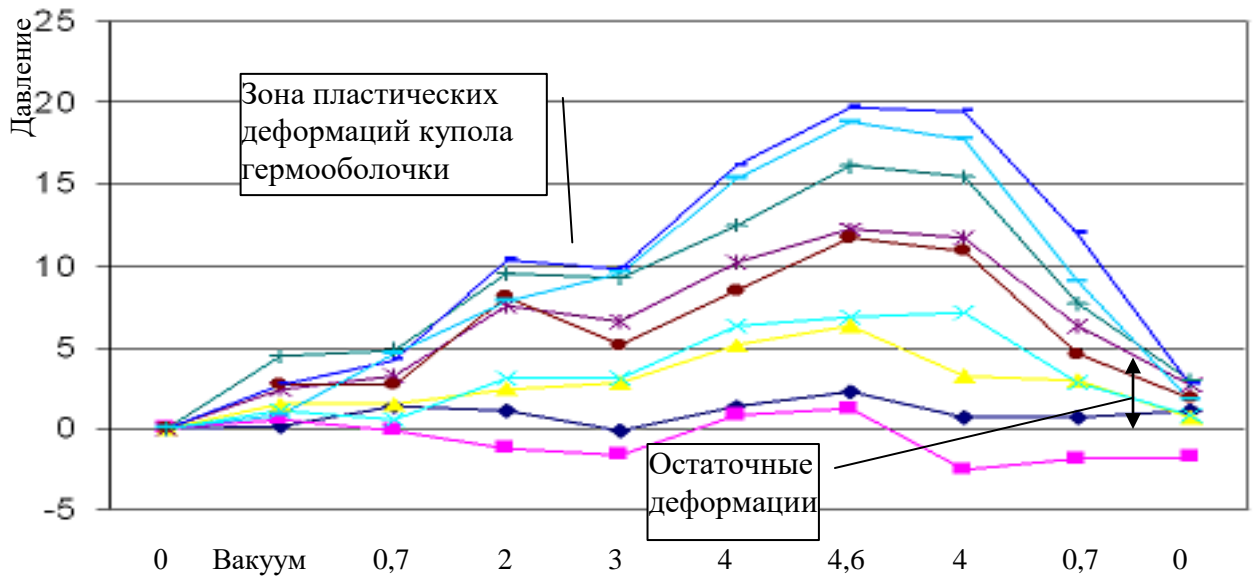


Рисунок 3.16. График перемещения точек 1–9

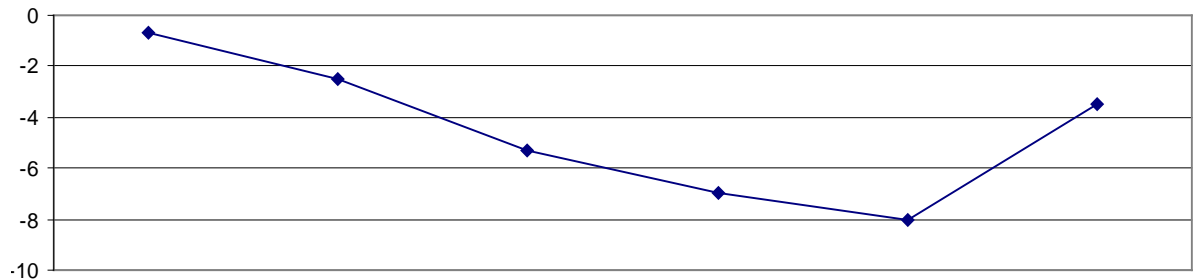


Рисунок 3.17. График вертикального перемещения опорного кольца гермооболочки

Условные средние отметки горизонтальных сечений купольной части гермооболочки, определенные по одноименным исследуемым точкам, приведены в табл. 3.10; условные средние вертикальные перемещения горизонтальных сечений купольной части гермооболочки, определенные по одноименным исследуемым точкам – в табл. 3.11; вертикальные перемещения опорного кольца гермооболочки – в табл. 3.12.

**Результаты контроля купольной части ЗГО.** Ведомости вертикальных смещений купола гермооболочки приведены в табл. 3.10 – 3.12.

Таблица 3.10. Условные средние отметки горизонтальных сечений купольной части гермооболочки

Давление	Условные средние отметки исследуемых точек, мм								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	94,5	558,3	1455,1	2262	2995,7	3907,7	4602,1	5069,7	5273,5
Вакуум	94,6	558,8	1456,6	2263	2998,1	3910,3	4606,5	5072,3	5274,2
0,7	95,8	558,2	1456,6	2262,5	2999	3910,3	4607	5073,8	5278
2	95,5	557,1	1457,5	2265,1	3003,2	3915,7	4611,6	5080,1	5281,2
3	94,3	556,7	1457,8	2265,1	3002,3	3912,8	4611,3	5079,5	5283
4	95,8	559,1	1460,2	2268,2	3006	3916,2	4614,6	5085,8	5288,7
4,6	96,7	559,6	1461,3	2268,8	3008	3919,3	4618,2	5089,4	5292,2
4	95,1	555,7	1458,3	2269,1	3007,3	3918,6	4617,6	5089,2	5291,2
0,7	95,1	556,5	1458,1	2264,7	3002	3912,5	4609,7	5081,6	5282,5
0	95,5	556,6	1455,7	2262,7	2998,35	3909,65	4605	5072,48	5275,2

Таблица 3.11. Условные средние вертикальные перемещения горизонтальных сечений купольной части гермооболочки

Давление	Средние перемещения точек, мм								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Вакуум	0,1	0,5	1,5	1	2,3	2,6	4,3	2,6	0,7
0,7	1,3	-0,1	1,5	0,5	3,2	2,6	4,8	4,1	4,5
2	1	-1,2	2,3	3,1	7,5	8	9,5	10,3	7,7
3	-0,1	-1,6	2,7	3,1	6,6	5,1	9,2	9,7	9,5
4	1,3	0,7	5,1	6,2	10,2	8,5	12,5	16,0	15,2
4,6	2,2	1,2	6,2	6,8	12,2	11,6	16,1	19,7	18,7
4	0,6	-2,6	3,2	7,1	11,6	10,8	15,5	19,4	17,7
0,7	0,6	-1,8	3	2,7	6,2	4,5	7,6	11,9	9
0	1	-1,7	0,6	0,7	2,6	1,8	2,8	2,7	1,7

Таблица 3.12. Определение вертикальных перемещений опорного кольца гермооболочки

Давление Дата	$\frac{0}{30,10,09}$ $H_0$	Вакуу- мирова- ние 31,10,09	0.7 31,10,09 $H_{0.7}$ мм	$\Delta H =$ $H_{0.7} -$ $H_0$ мм	2 31,10,09 $H_2$ мм	$\Delta H =$ $H_2 -$ $H_0$ мм	3 3,11,09 $H_3$ мм	$\Delta H =$ $H_3 -$ $H_0$ мм	4 4,11,09 $H_4$ мм	$\Delta H =$ $H_4 -$ $H_0$ мм	4.6 $H_{4.6}$ мм	$\Delta H =$ $H_{4.6} -$ $H_0$ мм	0.7 6.11.09 (сброс) $H_{0.7}$	$\Delta H =$ $H_{0.7} -$ $H_0$ мм
Рп 1 – Рп10	+15769	+15773	15770	1	15767	-2	15764	-5	15763	-6	15763	-6	15766	-3
Рп2 – Рп20	+15809	-	15809	0	-		15802	-7	15800	-9	15799	-10	15805	-4
Рп3 – Рп30	+15731	15725	15728	-3	15728	-3	15727	-4	15725	-6	-			
Среднее				-0.7		-2.5		-5.3		-7		-8	.	-3.5

**Результаты контроля цилиндрической части ЗГО.** На рис. 3.18 даны смещения горизонтального сечения цилиндра оболочки № 7, у которого выявлены максимальные деформации в период испытаний. На рис. 3.19 схематично представлена трёхмерная математическая модель деформированной цилиндрической части гермооболочки. На рис. 3.20–3.27 приведены вертикальные профили (разрезы) гермооболочки при максимальном надуве +4,6 и 0,0 атм после испытаний.

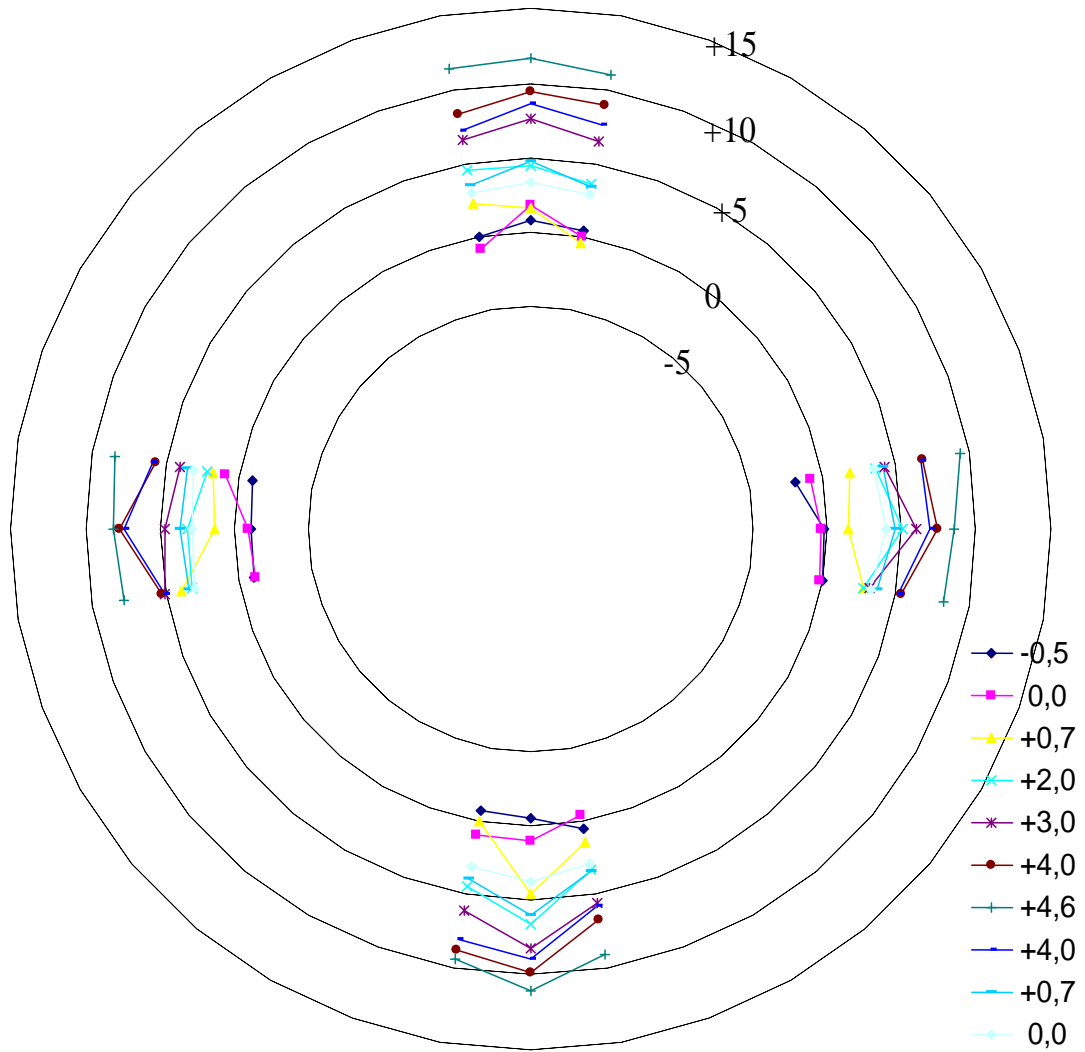


Рисунок 3.18. Деформации горизонтального сечения цилиндра оболочки

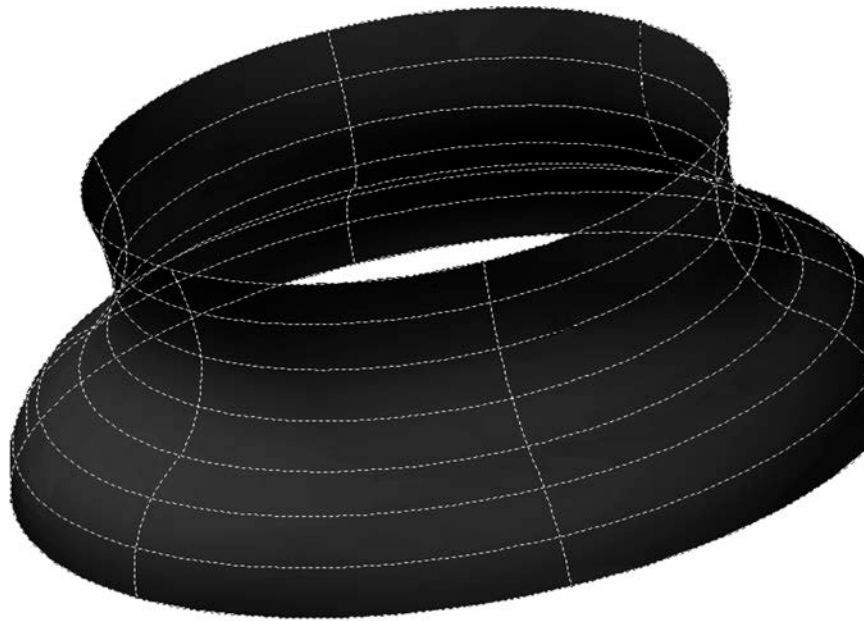


Рисунок 3.19. 3D-модель деформированной оболочки в отметках 46,0-59,0 м, полученная путем аппроксимации результатов измерений полиномиальными функциями

Формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РоАЭС по оси I при давлении +4,6 атм

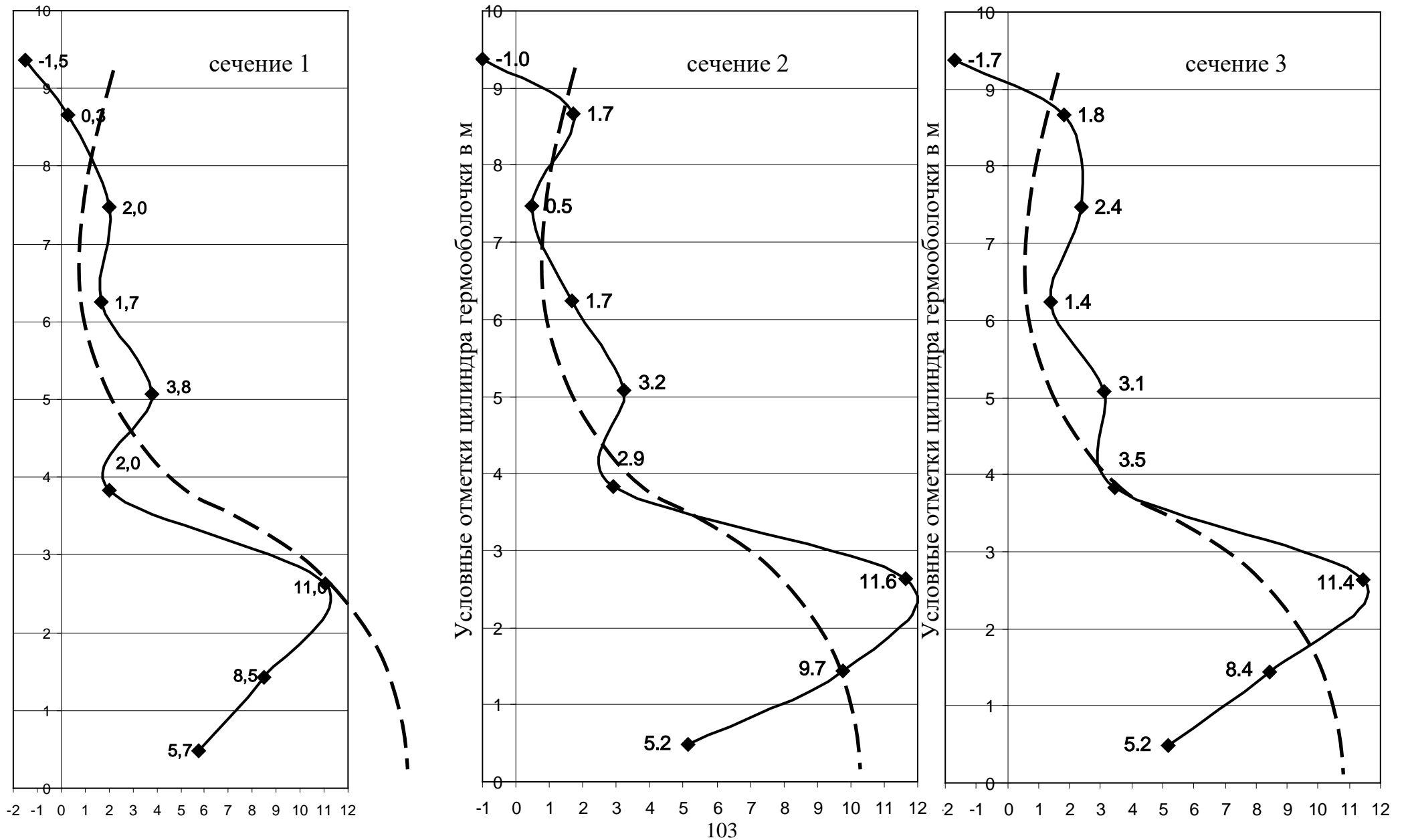


Рисунок 3.20. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм до +4,6 атм в мм

Формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РоАЭС по оси II при давлении +4,6 атм

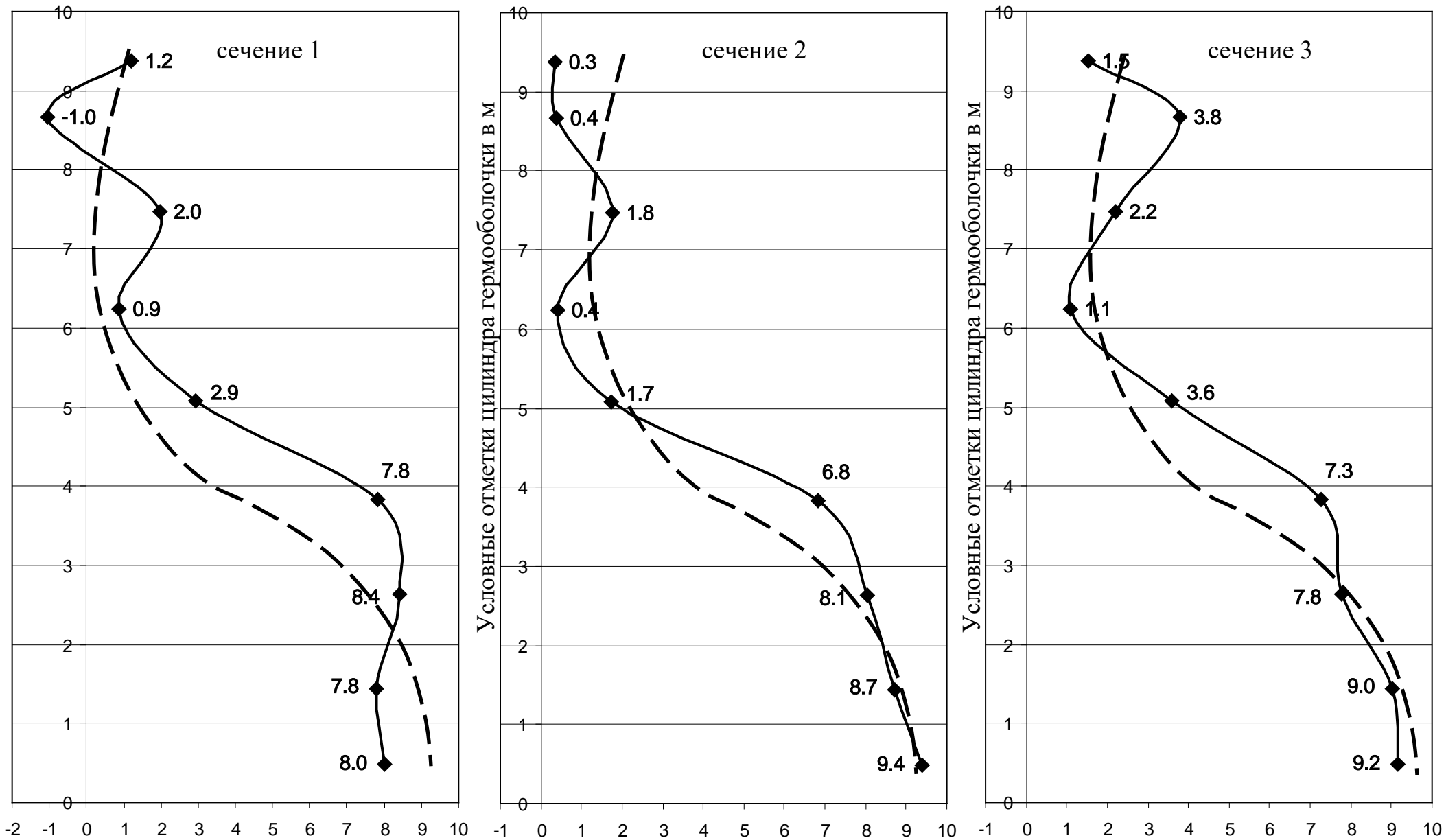


Рисунок 3.21. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм до +4,6 атм в мм

Формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РoАЭС по оси III при давлении +4,6 атм

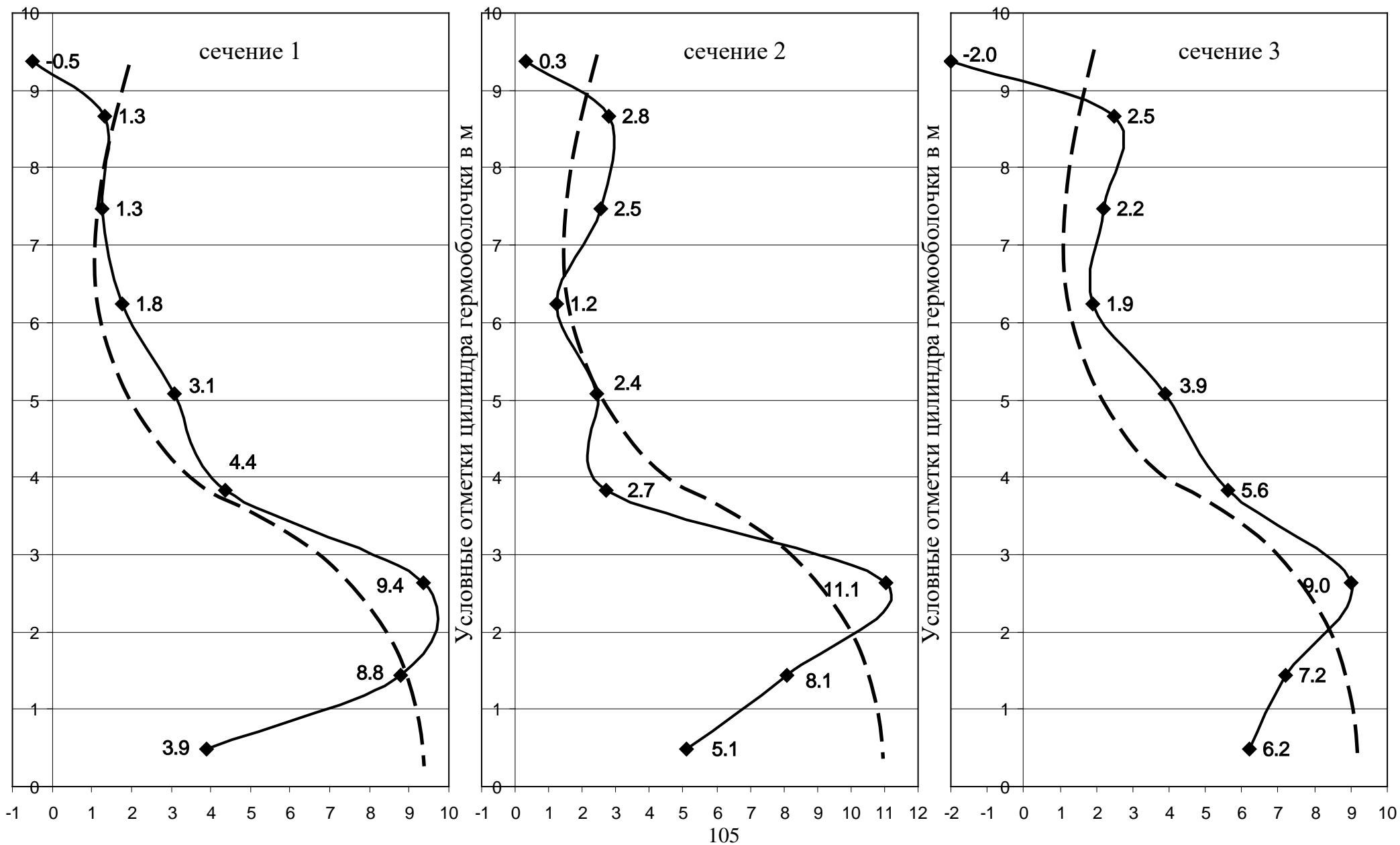


Рисунок 3.22. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм до +4,6 атм в мм

Формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РоАЭС по оси IV при давлении +4,6 атм

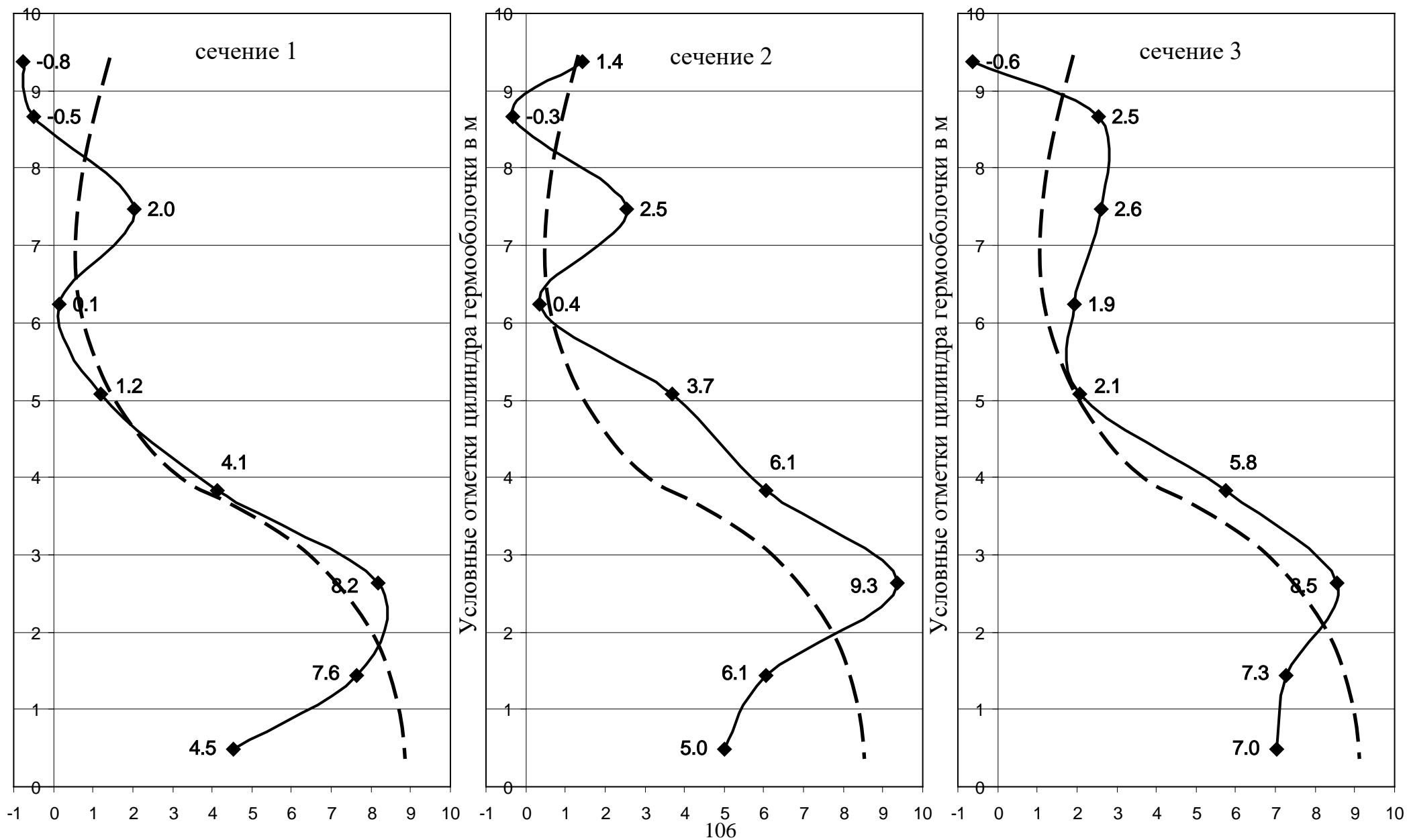


Рисунок 3.23. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм до +4,6 атм в мм

Остаточная деформация формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РoАЭС по оси I при давлении 0,0 атм

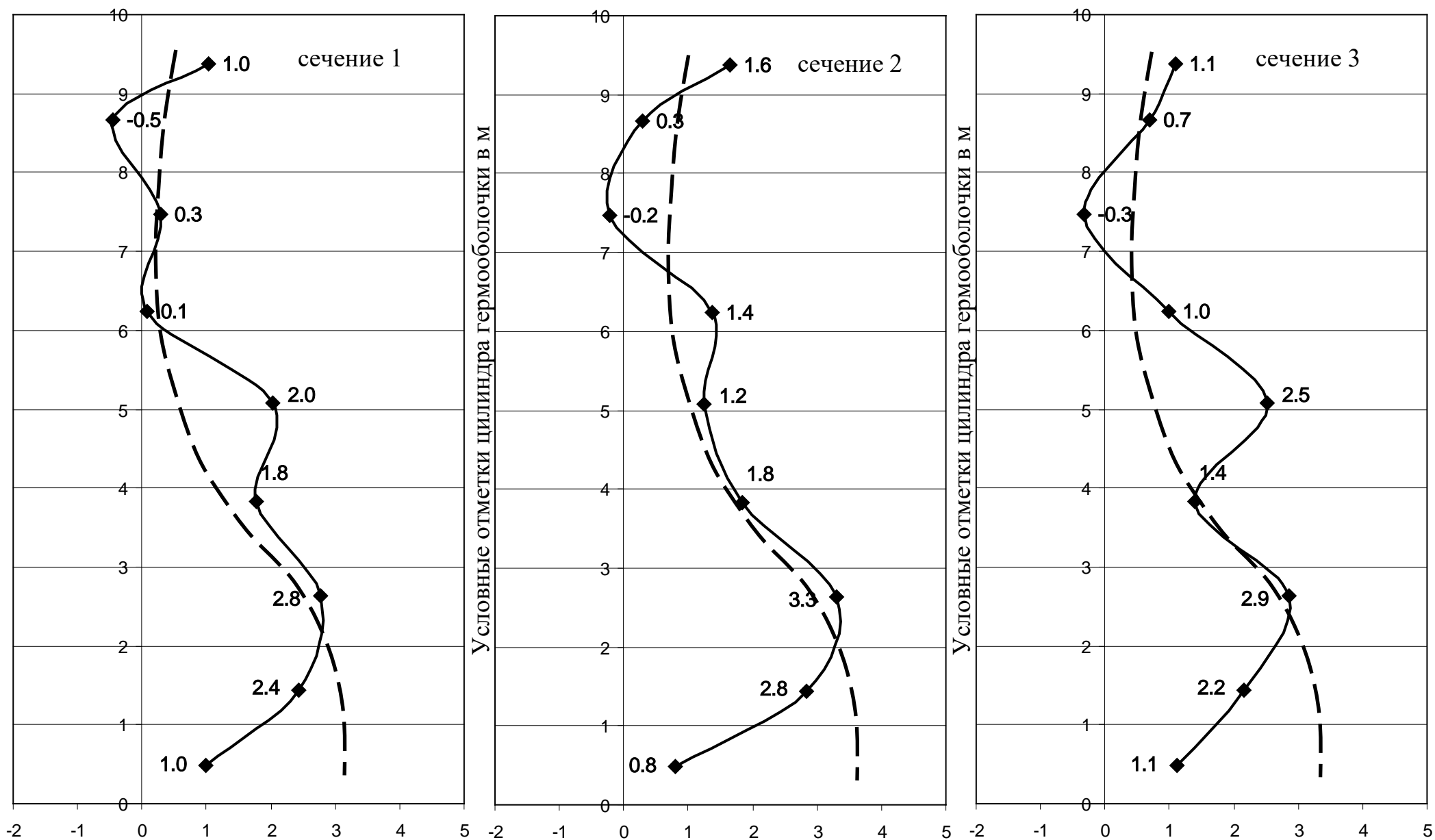


Рисунок 3.24. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм (до испытаний) до 0,0 атм (после испытаний) в мм

Остаточная деформация формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РоАЭС по оси II при давлении 0,0 атм

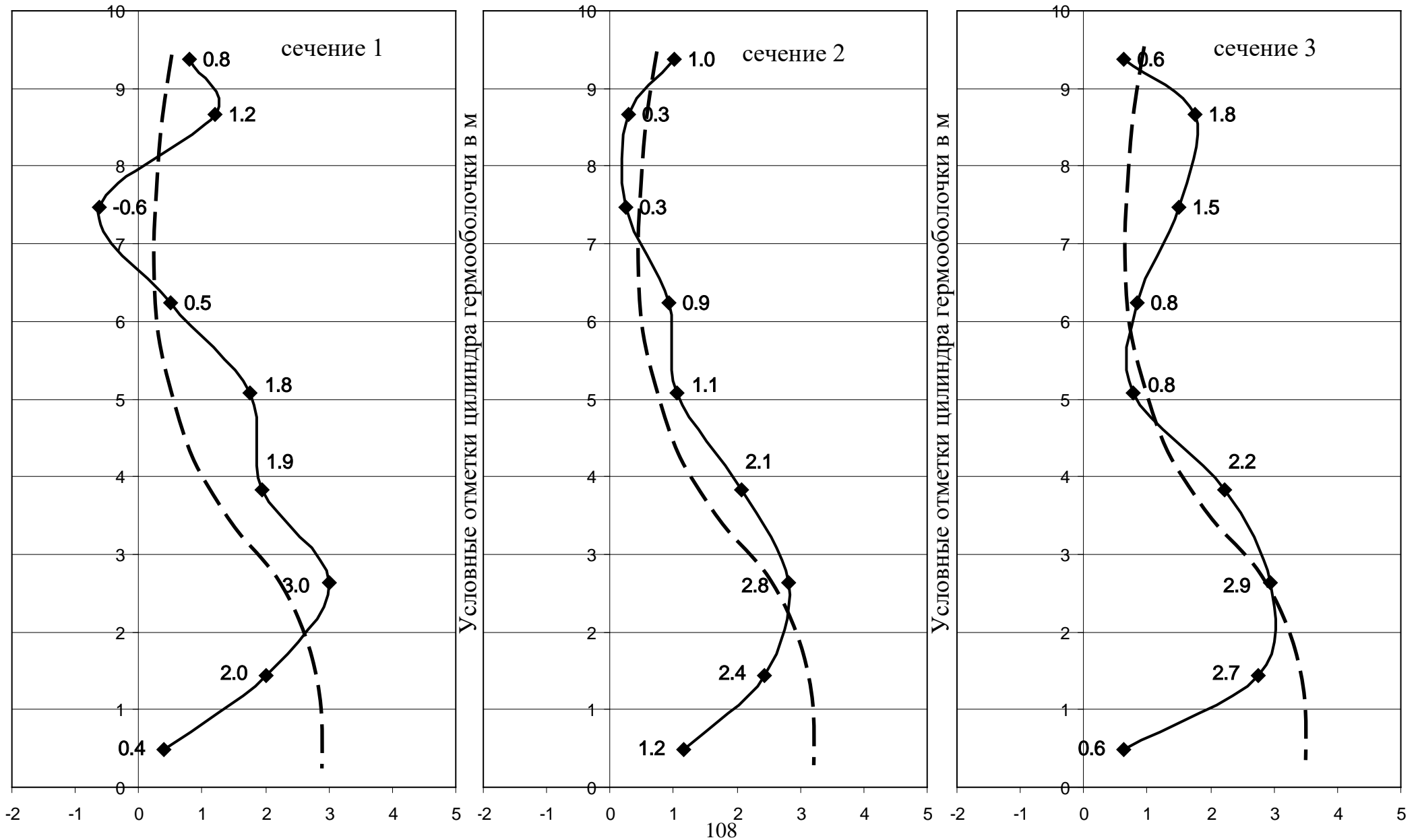


Рисунок 3.25. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм (до испытаний) до 0,0 атм (после испытаний) в мм

Остаточная деформация формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РоАЭС по оси III при давлении 0,0 атм

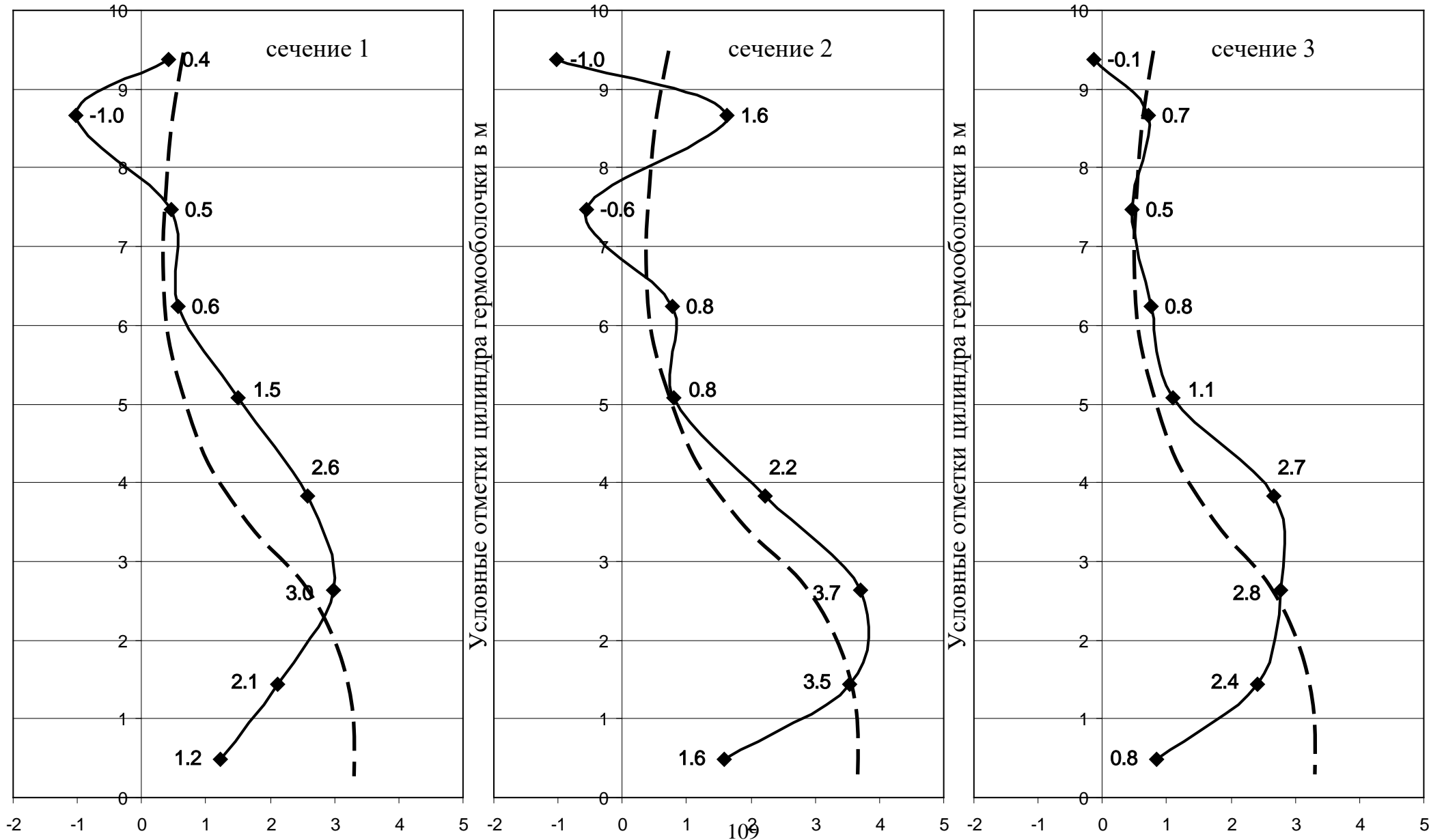


Рисунок 3.26. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм (до испытаний) до 0,0 атм (после испытаний) в мм

Остаточная деформация формы цилиндра гермооболочки второго энергоблока РоАЭС по оси IV при давлении 0,0 атм

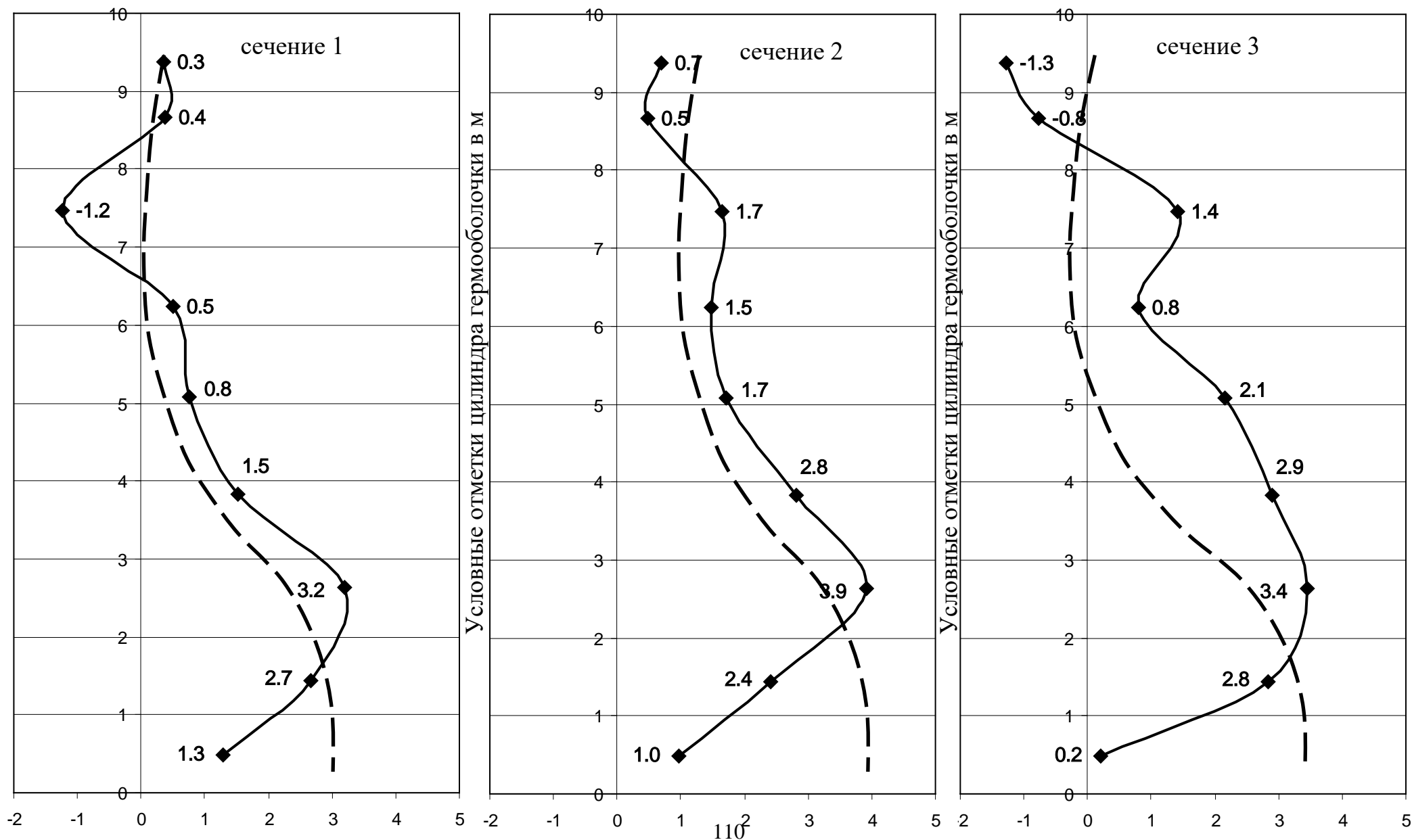


Рисунок 3.27. Изменение радиуса цилиндра от 0,0 атм (до испытаний) до 0,0 атм (после испытаний) в мм

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

1. 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.
2. Максимальные остаточные деформации купольной и цилиндрической частей гермооболочки составили 2 мм.
3. Зона пластических деформаций купольной части зарегистрирована при изменении давления от 2 до 3 атм.
4. Вертикальные перемещения опорного кольца купольной части гермооболочки при возрастании внутреннего давления до 4,6 атм составили –8 мм.

На основе полученных результатов был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния ЗГО.

### **3.3. Построение измерительной системы при испытании оболочки реакторного отделения первого энергоблока РоАЭС**

На Ростовской АЭС 9–20 сентября 2000 г. проводился комплекс работ по испытанию ЗГО. В качестве альтернативной для штатной системы контроля впервые в отечественной практике была предложена информационно-измерительная система контроля геометрических параметров оболочки. Целью наблюдений являлось определение деформационных характеристик, вызванных изменением давления внутри оболочки.

Общая организация работ сводилась к тому, что предварительно на перекрытии обстройки реакторного отделения было сформировано обоснование в виде шестиугольника (рис. 3.28). На куполе ЗГО разбиты восемь концентрических радиальных поясов, каждый из которых имеет двадцать четыре исследуемые точки.

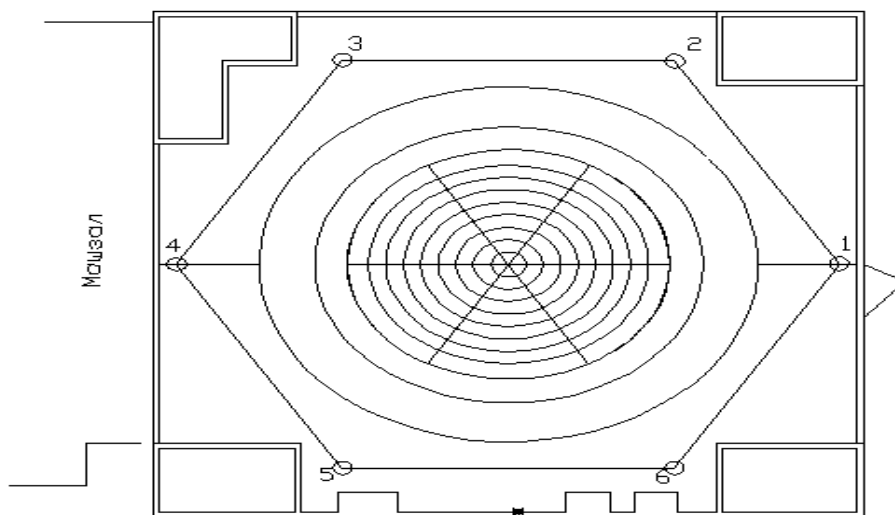


Рисунок 3.28. Схема расположения пунктов обоснования на обстройке реакторного отделения

Программа измерений согласовывалась с этапами изменения давления внутри защитной оболочки: 0; 3; 4; 4,6; 4; 0 атм. Положения контролируемых точек определялись путем реализации методов пространственной тахеометрии на цилиндрической части оболочки и геометрического нивелирования на опорном кольце и куполе ЗГО. В результате проведения всего комплекса работ были получены и проанализированы следующие результаты.

Максимальное перемещение опорного кольца составило величину  $-8$  мм, остаточные деформации оболочки выражены в том, что отметка опорного кольца после испытаний стала меньше на величину  $-6$  мм (табл. 3.13).

Таблица 3.13. Изменение отметок базовых точек № 1, 2, находящихся на опорном кольце купола защитной оболочки

Давление внутри защитной оболочки	Отметки точки № 1	$\Delta$	$v$	Отметки точки № 2	$\Delta$	$v$	$\Delta_{\text{ср}}$
0	102,438	0	-2	102,438	0	2	0
3	102,437	-1	-1	102,435	-3	1	-2
4	102,434	-4	0	102,431	-7	1	-5
4,4	102,432	-6		102,428	-10		-8
4	102,430	-8	2	102,430	-8	-2	-5
0	102,434	-4	0	102,430	-8	2	-6
Остаточные деформации $m_{\Delta} = 1,6$ мм		-4		-8			-6

Перемещения цилиндрической части в графическом виде представлены на рис. 3.29. На рис. 3.30 представлены остаточные деформации цилиндрической части ЗГО.

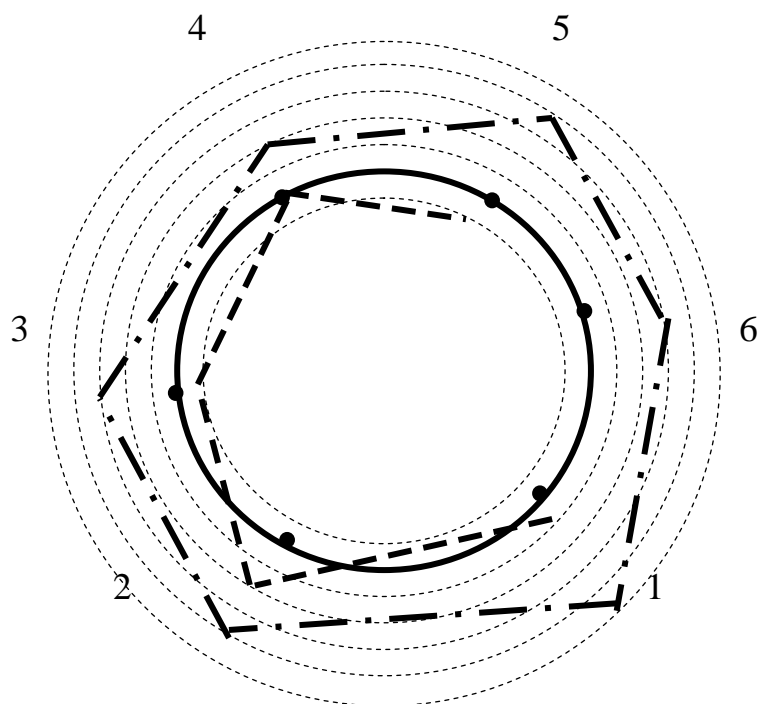


Рисунок 3.29. Деформационные характеристики горизонтального сечения цилиндра оболочки на отметке 46,000 м:

- - исходное состояние (ноль атм);
- · - - давление 4,4 атм (на шестой точке 3 атм);
- - - - конечное состояние (0 атм)

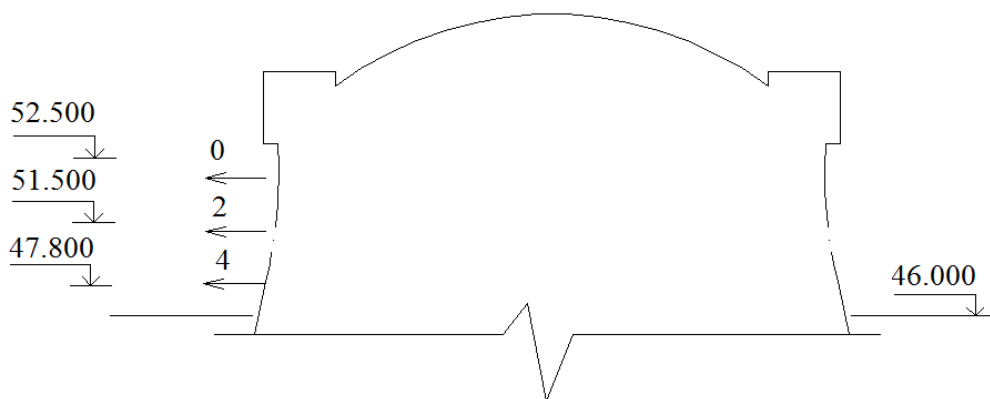


Рисунок 3.30. Обобщенные деформационные характеристики защитной гермооболочки первого реакторного отделения РoАЭС

На рис. 3.31 в графическом виде представлены величины перемещений исследуемых точек купола при изменении давления внутри обстройки от 0 до 4 атм. При этом впервые определено то, что при увеличении давления от 2 до

3 атм приращения перемещений имели отрицательные значения, что свидетельствует о нелинейном характере перемещений купола при повышении давления, а также о присутствии упруго-пластических деформаций в конструкциях оболочки.

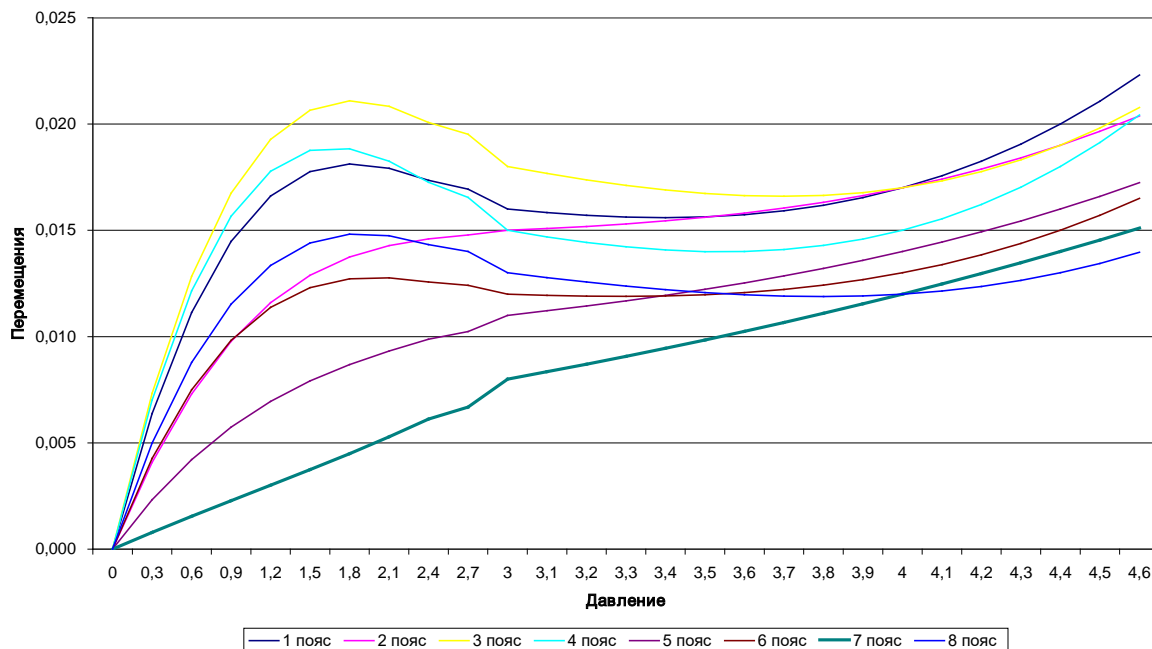


Рисунок 3.31. График перемещения контрольных точек купольной части ЗГО

В процессе подготовительных работ и испытаний было установлено, что 25 % датчиков штатной системы контроля не могут быть использованы. В соответствии с этим основной измерительной информацией для расчета напряженно-деформированного состояния ЗГО явились данные, представленные в текущем параграфе.

### 3.4. Анализ совместной обработки результатов испытаний защитных оболочек энергоблоков РоАЭС

Исследуя результаты, полученные при испытании ЗГО первого и второго блоков Ростовской АЭС, были определены общие закономерности и выработаны рекомендации по оптимальному выполнению работ. Для проведения сравнительного анализа выбрана наиболее характерная зона, расположенная в районе третьего измерительного створа, так как в этой зоне размещено наибольшее количество струнных датчиков встроенной штатной кон-

трольно-измерительной системы. Кроме того, сопоставление результатов проводили по нескольким особенным зонам, которые имеют индивидуальные характеристики, в том числе зоны:

- 1) моментная купольной части;
- 2) переходная купольной части оболочки;
- 3) безмоментная купольной части оболочки;
- 4) моментная цилиндрической части оболочки;
- 5) переходная цилиндрической части оболочки;
- 6) безмоментная цилиндрической части оболочки.

В результате анализа и обобщения результатов предлагается нормировать величины перемещений, регистрируемых при выполнении испытаний ЗГО. Ранее на рис. 3.15 были приведены рекомендуемые для нормирования максимальные величины перемещений характерных зон оболочки. На рис. 3.32 приведены в графическом виде перемещения стенок оболочек с отметки 46,00 до отметки 55,00 м ЗГО реакторных отделений первого и второго энергоблоков РoАЭС. Отличием организации измерений при испытании первого энергоблока является то, что производился контроль пространственного положения в трёх контролируемых точках на отметках 46,00; 50,00; 55,00 м. При испытании второго энергоблока контролировались девять точек на отметках 46,00; 50,00; 55,00; 46,00; 50,00; 55,00 м. На графике видно, что перемещения стенок оболочек при наборе максимального давления практически идентичны и отличаются на величину погрешности измерений.

Сопоставим графики изменения напряжения в рабочей ненапрягаемой арматуре, изменения силы натяжения армоканатов системы СПЗО и перемещения стенки герметичной оболочки реакторного отделения № 2 в зависимости от давления внутри ЗГО. Совместное рассмотрение параметров этих графиков показывает особенность работы стенки оболочки под нагрузкой. При достижении максимального давления в ЗГО стенка оболочки перемещается на 15 мм, а напряжения в стержневой арматуре падают за счет передачи усилия на армоканаты СПЗО (рис. 3.33).

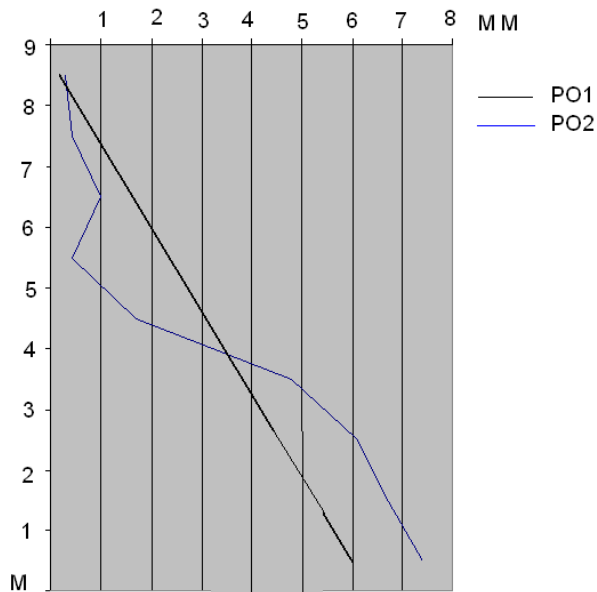


Рисунок 3.32. Перемещения стенки цилиндрической ЗГО энергоблоков № 1,2 при максимальном давлении

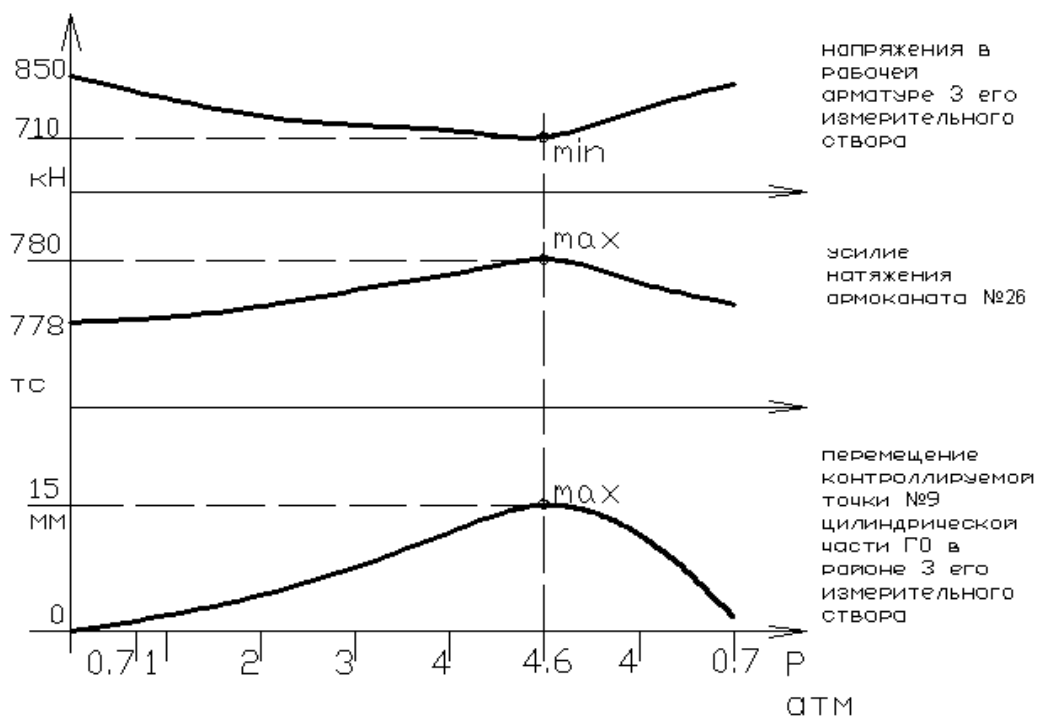


Рисунок 3.33. Перемещения стенки герметичной оболочки при увеличении давления и изменении усилия и напряжения в армирующих элементах

На рис. 3.34 изображен график перемещения центров купольных частей оболочек реакторных отделений первого и второго энергоблоков РоАЭС. На графике видно, что перемещения контролируемых точек оболочек при максимальном давлении практически одинаковы и отличаются лишь на величину погрешности измерений. Сопоставим графики изменения

напряжения в рабочей ненапрягаемой арматуре, изменения силы натяжения армоканатов системы СПЗО и перемещения стенки герметичной оболочки реакторного отделения № 2 в зависимости от давления внутри зоны локализации аварии (рис. 3.35). Совместное рассмотрение этих графиков наглядно показывает особенность работы купола оболочки под нагрузкой. При достижении максимального давления в ЗГО центр купола оболочки перемещается на 19 мм, а напряжения в стержневой арматуре падают за счет передачи усилия на армоканаты СПЗО.

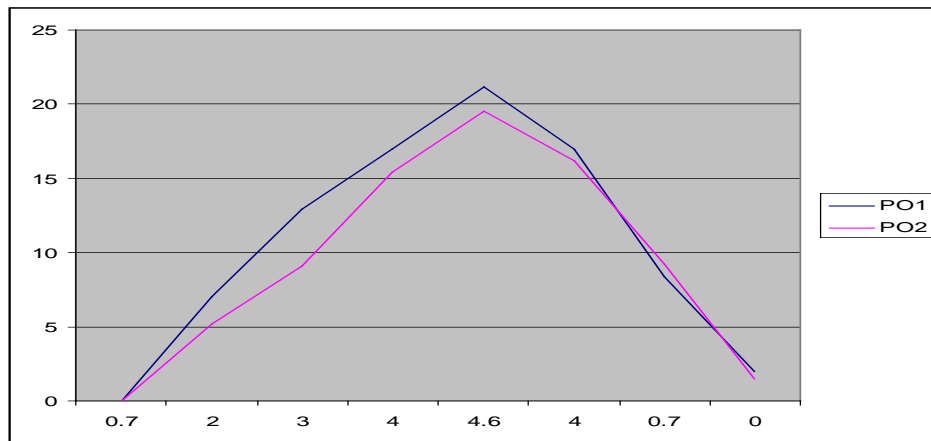


Рисунок 3.34. График перемещения центра купольной части ЗГО энергоблоков № 1 и 2

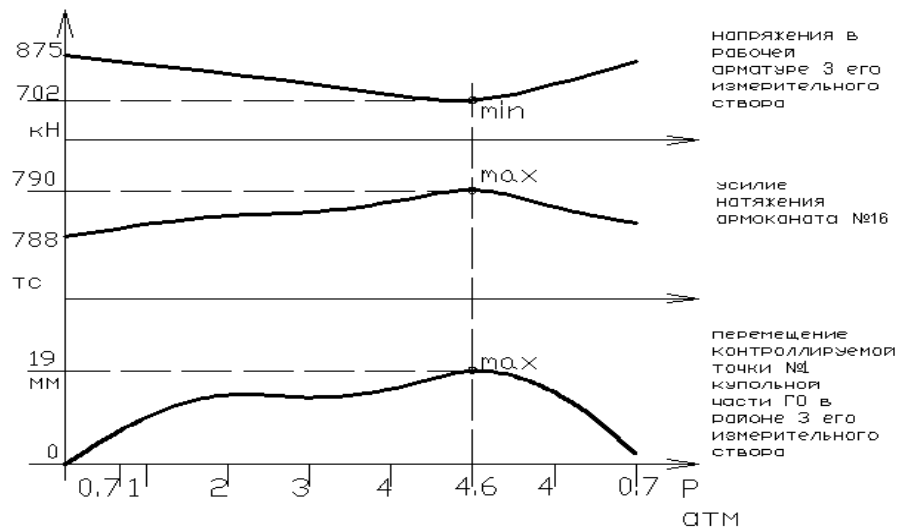


Рисунок 3.35. График перемещения центра купольной части ЗГО при увеличении давления и изменении усилия и напряжения в армирующих элементах

Результаты выполненного анализа количественно и качественно совпадают с результатами предварительных расчетов, выполненных при разра-

ботке методики выполнения контрольно-измерительных работ, что подтверждает высокую работоспособность системы.

### 3.5. Разработка рекомендаций по использованию измерительно-информационной системы при испытании защитной оболочки проекта АЭС-2006

В настоящее время в России разработан и реализуется проект АЭС 2006. Одним из преимуществ данного типа АЭС является двухслойная конструкция защитной оболочки, которая уменьшает влияние окружающей среды на конструкцию герметичной оболочки и тем самым повышает стабильность работы конструкций (рис. 3.36). Такого типа блоки построены или строятся на АЭС Куданкулам, АЭС Тньваньская, ЛАЭС 2, Балтийская АЭС. В это же время для такого типа оболочек необходимо применять повышенные требования к контролю геометрических параметров. Кроме того, двухслойная конструкция затрудняет контроль геометрических параметров внешней поверхности напрягаемой внутренней ЗГО методом пространственной тахеометрии.

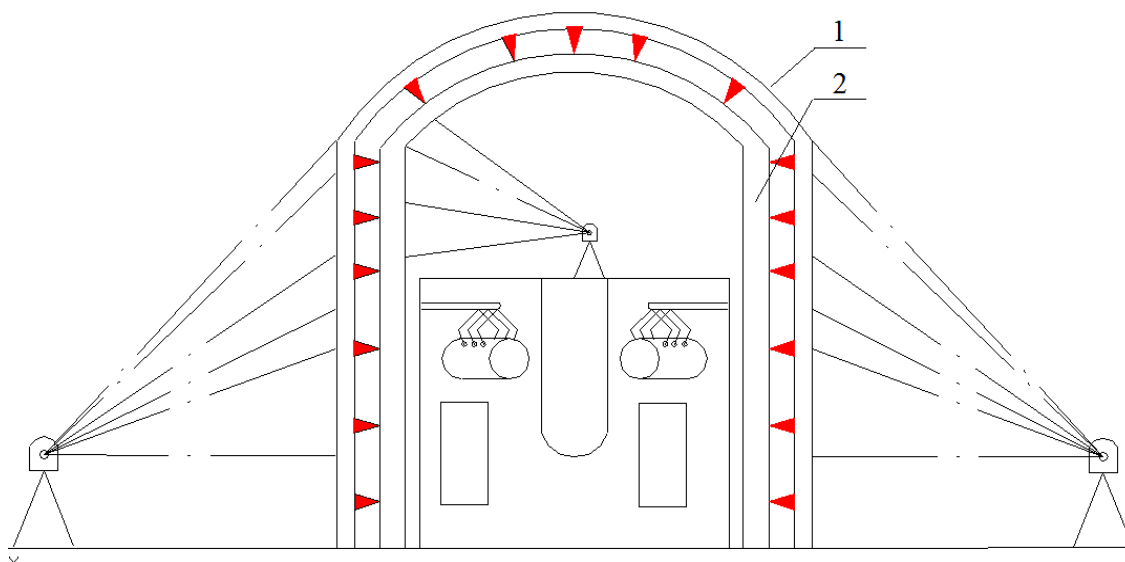


Рисунок 3.36. Схема двухслойной защитной оболочки:

- 1- внешняя ненапрягаемая оболочка;
- 2- внутренняя напрягаемая оболочка

Описанная в работе методика формирования структуры мобильной геодезической диагностической системы после модернизации может использоваться при преднапряжении, испытании и эксплуатации оболочек проекта

АЭС 2006, здесь предложено сформировать дополнительный (пятый) измерительный канал, который обеспечит получение измерительной информации из межоболочечного пространства. Его формирование может быть организовано таким образом, чтобы через шлюзы ненапрягаемой оболочки можно было бы развить систему опорного обоснования в межоболочечном пространстве. Дискретно распределяют и маркируют контрольные точки на внутренней поверхности ненапрягаемой оболочки. На напрягаемой оболочке формируют и маркируют контролируемые точки, которые расположены в одних сечениях с контрольными точками и на одних радиальных прямых. В каждом цикле измерений выполняют определение расстояния между контрольными и контролируемыми точками, например, электронными рулетками. Таким образом, измерительная система может быть успешно реализована при преднапряжении, испытании и эксплуатации двухслойных оболочек.

**Выводы по главе.** Результаты исследований предложенной методики измерений и информационно-измерительной системы показали следующее:

- изучены физические процессы, формируемые при преднапряжении, испытаниях на прочность и при эксплуатации ЗГО;
- разработанная методика определения технического состояния герметичных оболочек является рациональной и оптимально учитывает особенности работы конструкций защитной оболочки в различных условиях;
- разработаны рекомендации по использованию методики формирования структуры мобильной геодезической диагностической системы для оболочек проекта АЭС-2006.

## 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 технология 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Р.В. Предпосылки возможности продления срока службы защитных оболочек АЭС с ВВЭР-1000 / Р.В. Арутюнян, В.Н. Киселев, В.Ф. Медведев, А.Н. Стрижов // Препринт ИБРАЭ № ИВРАЕ-2005-03. Москва, ИБРАЭ РАН. – 2005. – Вып. 3. – с. 20-25.
2. Баран П.И. Геодезические работы при монтаже и эксплуатации оборудования / П.И. Баран. – М.: Недра, 1990. – 233 с.
3. Бедов А.И. Обследование и реконструкция железобетонных и каменных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // А.И Бедов, В.Ф. Спрыткин. – М.: АСВ, 1995. –192 с.
4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. –М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
5. Болгов И.Ф. Геодезические работы при строительстве и испытании крупных сооружений / И.Ф. Болгов. – М.: Недра, 1984. –145 с.
6. Большаков, В.Д. Теория ошибок наблюдений / В.Д. Большаков. – М.: Недра, 1983. – 223 с.
7. Буш В.В. Геодезические работы при строительстве сооружений башенного типа / В.В. Буш, В.В. Калугин, А.И Саар. – М.: Недра, 1985. – 216 с.
8. Брянский Л.Н. Краткий справочник метролога / Л.Н. Брянский, А.С Дойников. М., издат. Стандартов, 1991. – 80 с.
9. Васютинский И.Ю. Геодезические приборы при строительномонтажных работах / И.Ю. Васютинский, П.Е. Рязанцев, Х.К. Ямбаев. – М.: Недра, 1982. – 272 с.
10. Видуев Н.Г. Вероятностно-статистический анализ погрешностей измерений / Н.Г. Видуев, Г.С. Кондра. – М.: Недра, 1969. – 320 с.
11. Власов В.З. Общая теория оболочек / В.З. Власов. М.: Гостехиздат, 1949. – 473 с.
12. 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.
13. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек / А.Л. Гольденвейзер. – М.: Наука, 1976. 465 с.
14. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – с. 25.
15. ГОСТ 21779-82. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски. – С. 11.
16. ГОСТ 21780-83 Система обеспечения точности геометрических параметров. Расчет точности. – с. 9.
17. ГОСТ 23616-79\*. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Контроль точности. – с. 10.
18. ГОСТ 8.508-84. Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. – с.10.
19. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – К.: Факт, 2005. – 344 с.
20. Гроздов В.Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений / В.Т. Гроздов. – СПб. Издательский дом KN+, 2001. – 48 с.
21. Губеладзе А.Р. К вопросу о точности геодезических работ при монтаже технологического оборудования / А.Р. Губеладзе // Прикладная геодезия. – Ростов н/Д: РГСУ, 1999. – С. 40–43.
22. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы / Б.А. Дементьев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. –208 с.
23. Дубровский В.Б. Строительство атомных электростанций / В.Б. Дубровский, П.А. Лавданский. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2006. – 336 с.
24. Дунаев И.М. Организация проектирования системы технического контроля / И.М. Дунаев, Т.П. Скворцов, В.Н. Чупырин. – М.: Машиностроение, 1981. – 191 с.

- 25.Егоров Ю.А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций / Ю.А. Егоров. М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
- 26.Жуков Б.Н. К совершенствованию системы обеспечения геометрической точности в строительстве / Б.Н. Жуков // Исследования по совершенствованию инженерно-геодезических работ. – Новосибирск, 1983. – С. 34–37.
- 27.Жуков Б.Н. Нормирование точности геодезических измерений при возведении сооружений, монтаже оборудования и контроле за их состоянием / Б.Н. Жуков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1983. – Вып. 4. – С. 28–30.
- 28.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. – спецвыпуск. – С.58–62.
- 29.Забазнов Ю.С. Геодезическая технология определения деформаций гермооболочки / 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)
- 30.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)
- 31.Забазнов Ю.С. Геодезическое обеспечение испытаний защитной оболочки реакторного отделения / Ю.С. Забазнов // Бюллетень союза геодезистов. – 2009. – Вып. 3. – С. 34–39.
- 32.Иванов В.А. Эксплуатация АЭС / В.А. Иванов. – М.: Энергоиздат, 1994. – 250 с.
- 33.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. – спецвыпуск. – С. 47–50.

34. Ключин А.Б. О точности геодезического контроля монтажа и подъема скользящей опалубки / А.Б. Ключин // Геодезия и картография. – 1983. – Вып. 10. – С. 23–28.
35. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
36. Котов Ю.В. Оборудование атомных электростанций / Ю.В. Котов, В.В. Котов. – М.: Машиностроение, 1982. – 376 с.
37. Кривоногов В.Г., Применение лазерной техники для контроля пространственной геометрии объектов / В.Г. Кривоногов, Н.Б. Мирошникова // Прикладная геодезия. – 1999. – С. 37–41.
38. Кузьмин Г.И. Использование контрольных исполнительных измерений в повышении качества строительства / Г.И. Кузьмин // Геодезические методы контроля точности в строительстве. Куйбышевский гос. ун-т. 1983. – С. 42–45.
39. Лисицкий Д.В. Автоматизированные информационно-измерительные геодезические системы / Д.В. Лисицкий, В.А. Середович. – М.: Недра, 1978. – 327 с.
40. Лобов М. И. О точности передачи плановой разбивочной сети на монтажные горизонты в условиях реакторного отделения АЭС / М.И. Лобов, В.И. Андоленко // Методы и средства инженерно-геодезических работ в строительстве. – М.: МИИГАиК, 1985. – Вып. 10 (7). – С. 104–112.
41. Лысов Г.Ф. Поверки и исследования теодолитов и нивелиров в полевых условиях / Г.Ф. Лысов. – М.: Недра, 1978, – 96 с.
42. Малявин В.П. Вопросы прогнозирования потерь усилий преднапряжения защитных оболочек энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 / В.П. Малявин, Е.А. Коган // ГНИПКИИ «Атомэнергопроект», сборник трудов. – 2003. – Вып. 4. – С. 82–92.
43. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова. – М.: Высшая школа, 1984. – 304 с.

44. Марусов А.А. Способ контроля геометрических параметров сооружений с применением лазерного геодезического прибора и геодиметра / А.А. Марусов, А.Н. Татенко // Совершенствование методов и средств топографо-геодезических работ. – 1990. – С. 112–117.
45. Медведев В.Н. Анализ предельной прочности защитной оболочки энергоблока ВВЭР-1000 / В.Н. Медведев, А.Н. Ульянов, А.С. Киселёв, А.А. Лопанчук // Состояние и перспективы строительства и безопасной эксплуатации Волгодонской АЭС. Волгодонск, 2006. –С. 14–17.
46. Медведев В.Н. Определение эксплуатационной безопасности защитной оболочки 3-го энергоблока Калининской АЭС / В.Н. Медведев, А.Н. Ульянов, А.С. Киселев // Сб. статей. Вып. 10/ МОО "Пространственные конструкции". – М.: 2006. – С. 230–243.
47. Механика преднапряженных защитных оболочек АЭС: Сб. ст. / Под ред. Р.В. Арутюнян. - М.: Наука, 2008. – 151 с.
48. Науменко Г.А. О поверке лазерных приборов / Г.А. Науменко // Прикладная геодезия. – Ростов н/Д: РГСУ, 1998. – С. 49–53.
49. Науменко Г.А. Метрологическое обеспечение геодезических работ, выполняемых при контроле монтажа технологического приборов / Г.А. Науменко // Прикладная геодезия.- Ростов н/Д: РГСУ, 1999. – С. 42–45.
50. Науменко Г.А. О метрологической аттестации дальномерных насадок совместно с теодолитами / Г.А. Науменко // Прикладная геодезия. – Ростов н/Д: РГСУ, 1999. – С.46–49.
51. Николаев Н.А. К расчету точности контрольно-измерительных систем / Н.А. Николаев // Исследования по совершенствованию инженерно-геодезических работ. – Новосибирск, 1983. – С. 115–117.
52. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений– 2-е изд., перераб. и доп. / П.В Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
53. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. –Л.: ГСИСП, 1962. -401 с.

54. НП-010-98. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности. – М.: 1982. – 17 с.
55. Петров В.В. Обмер объектов крупного машиностроения в пространственных высотно-угловых сетях / В.В. Петров // Полезные ископаемые России и их освоение: Тезисы докл. научн. конф.- СПб: СПбГГИ, 1996. – С. 93–96.
56. Петров В.В. Методика повышения точности обмера объектов крупного машиностроения угломерными координатоопределяющими системами / В.В. Петров. – СПб.: 1996. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 24.09.96. № 2862-В96.
57. Петров В.В. Совершенствование методов высокоточного обмера крупногабаритных объектов сложной формы с применением теодолитных координатоопределяющих систем: Автореф. дис. канд. техн. наук. – СПб: СПбГГИ, 1996. – 22 с.
58. 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.
59. Пимшин Ю.И. Анализ работы строительных элементов герметичной оболочки АЭС при ее преднапряжении и испытании/Ю.С. Забазнов, Л.Ф. Кирильчик// Инженерный Вестник Дона . – 2014. № 1. – Режим доступа к журн.: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2263>
60. Пимшин Ю.И. Методы контроля геометрических параметров инженерных сооружений и автомобильных дорог с применением лазерных приборов / Ю.И. Пимшин, В.С. Хорошилов, А.А. Марусов. Хабаровск, Хабар. политех. ин-т, – 1990, –С. 96–98.
61. Пимшин Ю.И. Способ исследования радиальных поверхностей / Ю.И. Пимшин // Геодезия и картография. – 1994. – №5. – С. 30–33.

62. Пимшин Ю.И. Об универсальном лазерном приборе для контроля геометрии объектов / Ю.И. Пимшин, В.П. Глухов, А.С. Демиденко // Прикладная геодезия. – Ростов н/Д: РГСУ, 1998. – С. 39–42.
63. Пимшин Ю.И. О проблемах метрологической аттестации лазерных геодезических средств измерений / Ю.И. Пимшин, Г.А. Науменко // Тезисы докладов международной научно-практической конференции. – Ростов н/Д: РГСУ, 1997. – С.7–9.
64. Пимшин Ю.И. Оценка деформированного состояния объектов по результатам геодезических измерений / Ю.И. Пимшин, Ю.С. Забазнов, Г.А. Науменко // Научное обозрение. – Москва, 2013. – С.57
65. Пимшин Ю.И. Метрологическая аттестация лазерных средств измерений / Ю.И. Пимшин, В.Г. Кривоногов, Г.А. Науменко - Ростов н/Д: РГСУ, 1998. – С.3–5.
66. Пимшин Ю.И. Состояние и перспективы контроля технического состояния зданий и сооружения Ростовской атомной электростанции / Ю.И. Пимшин, А.В. Кривошеев, Г.А. Науменко // Материалы научно-практической конференции. Ростов-н/Д, 29.02-1.03.2000 г. – С.91-95.
67. Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Губеладзе О.А., Пимшин П.Ю. положительное решение №4,3/27 от 13.02.2015 Заявка №2013154404/28(084952) от 06.12.2013 Способ определения деформационных характеристик защитной герметичной оболочки.
68. Пимшин Ю.И., Литвинова Л.Ф., Науменко Г.А., Кривошеев А.В. Пат.217008 G 01 B 11/26 Устройство для контроля расположения осей объектов, опубл. 10.07.2001 г. бюл. №19
69. Пимшин Ю.И., Литвинова Л.Ф., Науменко Г.А., Демиденко А.С. Пат.2177143 G 01 C 5/00 Способ геометрического нивелирования, опубл. 20.12.2001 г. бюл. №35
70. Пимшин Ю.И., Наугольнов В.А., Пимшин И.Ю., Забазнов Ю.С., Яковлев В.В. Пат.2426089. Способ определения деформационных характеристик сооружений 2011.

71. Пимшин Ю.И. Контроль и оценка геометрии инженерных объектов / Ю.И. Пимшин, В.В. Рыбина // Прикладная геодезия. – Ростов н/Д: РГСУ, 1998. – С.29–31.
72. План развития топливно-энергетической отрасли России до 2020 года. №1234-р от 28.08.2003 г.
73. Плютинский В.И., Погорелов В.И. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС / В.И. Плютинский, В.И. Погорелов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 116 с.
74. Предназначение защитной оболочки комплект технологических карт. Тема 1332-4-V (КТК) изд 1990 изм. От 05. 2007 г.
75. Программа испытаний системы герметичного ограждения на герметичность и прочность ПМ.2.А2.ОБ/9.
76. Программа развития атомной энергетики Российской Федерации на 1998-2005 годы и на период до 2010 года. Постановление Правительства Российской Федерации, –1998.
77. Применение геодезических методов при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Том 7 (47): Межвузовский сборник. – Новосибирск: НИИГАиК, 1979. – 162 с.
78. Разработка рекомендаций по методам контроля НДС строительных конструкций защитной оболочки АС нового поколения. – М.: НТО/АЭП, 1991. – 96 с.
79. РД 007-2005. Эксплуатация атомных электрических станций. – 223 с.
80. Резепов В.К. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций / В.К. Резепов, В.П. Денисов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 120 с.
81. Рубинов А.Д. Контроль больших размеров в машиностроении / А.Д. Рубинов. – Л.: Машиностроение, 2004. – 120 с.
82. Русков А.М. Способы определения радиусов сооружения башенного типа / А.Д. Русаков, И.Ф. Боглов // Геодезические методы контроля в строительстве. – Куйбышев: Куйбышевский гос. ун-т, 1985. – С. 82–86.

83. Сидоренко В.А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР / В.А. Сидоренко. – М.: Атомиздат, 1977. – 216 с.
84. Слипенко Л.Н. Плановое геодезическое обоснование монтажа реакторного отделения на строительстве атомной электростанции / Л.Н. Слипенко, А.М. Русаков // Геодезические методы контроля точности в строительстве. – Куйбышев: Куйбышевский гос. ун-т, 1983. – С. 66–69.
85. СН 319-65. Инструкция по монтажу сборных железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. – 112 с.
86. Соколов В.И. Контроль пространственно-временного состояния крупных инженерных сооружений / В.И. Соколов, А.Г. Зюкин, А.В. Гудков // Геодезия и картография. – 1989. – Вып. 12. – С. 12–14.
87. Справочник по геодезическим работам в строительном производстве / Под ред. Полищук Ю.В. – М.: Недра, 1990. – 336 с.
88. Справочник по производственному контролю в машиностроении / Под ред. Кутая. – Л.: Машиностроение, 3-е изд.. – 1974. – 975 с.
89. Староверов В.С. Нормирование точности геодезических разбивочных и монтажных работ при возведении сборных сооружений / В.С. Староверов, Б.Д. Бачишин, Л.С. Пашян // Геодезические работы в строительстве. – Куйбышев: Куйбышевский гос. ун-т, 1988. – С. 117–119.
90. Стерман Л.С. Тепловые и атомные электростанции / Л.С. Стерман, А.С. Телвин, А.Т. Шарков. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 257–260.
91. Столбов И.А. Об определении кренов сооружений / И.А. Столбов // Геодезия и картография. – 1988. – Вып 3. – С. 35–37.
92. Столбов Ю.В. Статистические методы контроля качества строительномонтажных работ / Ю.В. Столбов. – М.: Стройиздат, – 1982. – 87 с.
93. Столбов Ю.В. Допуски и средства проверки качества строительномонтажных работ / Ю.В. Столбов // Геодезические методы контроля точности в строительстве. – Куйбышев: Куйбышевский гос. ун-т. – 1983. – С. 63–65.

94. Столбов Ю.В. О методах расчета допусков на контрольные измерения при возведении сооружений / Ю.В. Столбов // Геодезические методы контроля в строительстве. – Куйбышев: Куйбышевский гос. ун-т. –1984. – С. 61–65.
95. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Минатом РФ. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2001. –89 с.
96. Сухов А.Н. Геодезические разбивочные сети при строительстве АЭС / А.Н. Сухов, А.Б. Беликов, А.И. Данилович // Геодезия и картография. – 1985. – Вып. 11. – С. 26– 31.
97. Сытник В.С. Геодезическое обеспечение строительного-монтажных работ / В.С. Сытник. – М.: Стройиздат, 1982. – 159 с.
98. Технический контроль в машиностроении. Справочник проектировщика. / Под ред. Чупырина В.Н., Никифорова А.Д. – М.: Машиностроение, 1987. – 512 с.
99. Тулявичус В.В. Исследование геометрических параметров элементов из сборного железобетона / В.В. Тулявичус, С.К. Казакиявичус // Труды по геодезии Вильнюсского инженерно-строительного института. –1983. – Вып. 12. – С. 71–79.
100. Ульянов А.Н. Оценка напряженного состояния защитной оболочки 2-го энергоблока Калининской АЭС / А.Н. Ульянов, В.Н. Медведев, В.Ф. Стрижов, А.С. Киселев, А.С. Залесов // Третья международная научно-техническая конференция "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". Концерн "Росэнергоатом", 18-19 апреля, 2002 г. – М.: ВНИИАЭС, 2002. –С. 107-118.
101. Уставич Г.А. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации крупных энергетических объектов / Г.А. Уставич, Г.Д. Костина. – М.: Недра, 1983. – 133 с.
102. Флесс П.А. О создании плановой разбивочной основы крупных сооружений сферической формы / П.А. Флесс // Геодезия и картография. – 1994. – Вып. 6. – С. 19–22.

103. Чмчян Т.Т. Расчет точности геодезических измерений при возведении сферических и конических оболочек / Т.Т. Чмчян // Геодезия и картография. – 1987. – Вып. 7. – С. 24–28.
104. Чмчян Т.Т. Расчеты точности геодезических работ в строительстве: Справочник / Т.Т. Чмчян. – М.: Недра, 1988. – 151 с.
105. Ямбаев Х.К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве / Х.К. Ямбаев.
106. РД ЭО 0624-2005 «Типовая инструкция по эксплуатации производственных зданий и сооружений атомных станций – М.: Недра, 1986. – 263 с.