

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I»

*На правах рукописи*

Лобанова Юлия Васильевна



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ  
(НА ПРИМЕРЕ АЭС)

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Брынь М. Я.

Санкт-Петербург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ</b> .....	13
1.1 Характеристика особо опасных и технически сложных объектов. Общие сведения об атомных электростанциях.....	13
1.2 Анализ требований к точности геодезического обеспечения строительства и эксплуатации АЭС .....	18
1.3 Анализ видов геодезических работ на атомной электростанции.....	22
1.3.1 Методы создания плановой разбивочной основы, внутренней разбивочной сети и производство разбивочных работ .....	22
1.3.2 Использование спутниковых технологий на объекте работ.....	30
1.3.3 Способы геодезических измерений деформаций .....	33
1.3.4 Определение осадок тригонометрическим нивелированием .....	37
1.3.5 Учет влияния вертикальной рефракции при выполнении тригонометрического нивелирования .....	41
1.4 Выводы по главе 1 .....	46
<b>ГЛАВА 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	49
2.1 Постановка задачи.....	49
2.2 Обоснование требований к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты.....	50

2.3 Проектирование внешней разбивочной сети при строительстве реакторного блока АЭС .....	63
2.3.1 Основные этапы проектирования и развития внешней разбивочной сети ....	63
2.4 Построение внутренней разбивочной сети способом свободного стационарирования на примере реакторного блока АЭС.....	65
2.4.1 Основные этапы проектирования и развития внутренней разбивочной сети .....	65
2.4.2 Рекомендации по созданию внутренней разбивочной сети без переноса ее с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты.....	67
2.5 Приведение результатов спутниковых измерений к центрам пунктов с использованием элементов центрировки.....	68
2.5.1 Приведение внецентренных спутниковых измерений к центрам пунктов на основе использования элементов центрировки и взаимнообратных координатных преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами.....	68
2.5.2 Оценка точности вычисления координат центра геодезического пункта на основе элементов центрировки при внецентренных спутниковых измерениях ....	71
2.5.3 Учет поправок за уклонение отвесной линии в измеренное горизонтальное направление и в измеренное превышение .....	76
2.6 Определение и учет вертикальной рефракции на основе построения вертикального базиса на строительной площадке.....	79
2.6.1 Предрасчет точности определения превышения из одностороннего тригонометрического нивелирования .....	79
2.6.2 Обобщение способов определения коэффициента рефракции геодезическими методами.....	82

2.6.3 Методика построения вертикального базиса «во всех комбинациях» для определения коэффициента рефракции и алгоритм выполнения оценки точности .....	83
2.7 Выводы по главе 2.....	85
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ .....</b>	<b>89</b>
3.1 Проектирование внешней разбивочной сети .....	89
реакторного блока АЭС.....	89
3.1.1 Составление электронной схемы сети в программе <i>AutoCad</i> .....	89
3.1.2 Моделирование результатов измерений при создании внешней разбивочной сети.....	91
3.1.3 Предрасчет точности внешней разбивочной сети в компьютерной программе <i>Credo</i> .....	94
3.2 Проектирование внутренней разбивочной сети реакторного блока АЭС .....	97
3.2.1 Исходные данные .....	97
3.2.2 Моделирование результатов измерений при создании внутренней разбивочной сети в программе <i>NW</i> профессора Коугия В. А. ....	98
3.2.3 Предрасчет точности внутренней разбивочной сети .....	99
3.3 Экспериментальные исследования по приведению внецентренных спутниковых измерений к центрам пунктов .....	100
3.4 Натурные исследования по влиянию вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования при коротких расстояниях (200 м) .....	103
3.4.1 Построение вертикального базиса с оценкой точности для определения коэффициента рефракции.....	103

3.4.2 Определение коэффициента вертикальной рефракции по результатам геодезических измерений на короткие расстояния (до 200 м) на вертикальном базисе .....	107
3.5 Выводы по главе 3 .....	110
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>113</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>115</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Точностные параметры при строительстве .....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Фрагмент распечатки результатов вычислений в компьютерной программе <i>NW</i> профессора Коугия В. А.....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>	<b>135</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт внедрения результатов диссертационного исследования .....</b>	<b>136</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

В современных условиях повышенного внимания приобретают вопросы строительства и безопасной эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов. К таким объектам в первую очередь относятся объекты использования атомной энергии, далее гидротехнические сооружения первого и второго классов, тепловые электростанции мощностью 150 МВт и выше, портовые гидротехнические сооружения и др.

Атомная энергетика скрывает большую опасность для всего человечества и окружающей среды, о чем свидетельствуют аварии на АЭС в США, Японии, Англии, Франции и в СССР. Крупные аварии и катастрофы на радиационно-опасных объектах с каждым годом показывают все большую непредсказуемость и масштабность таких катастроф. Однако, для безаварийной работы АЭС атомная энергетика — это чистое производство энергии (с точки зрения экономики и экологии), и замены ей пока нет и в ближайшем будущем не предвидится.

Атомные электростанции использует 31 страна. В России за последние 5 лет введено в эксплуатацию 7 энергоблоков АЭС.

Для сохранения и увеличения к 2030 г. мощностей атомной генерации в 2013 г была утверждена первая редакция «Схемы территориального планирования Российской Федерации в области энергетики». Ее актуальная на 2019 г редакция определяет строительство десяти АЭС до 2030 г, а также разработаны конкретные мероприятия по повышению эффективности строительного производства и улучшению функциональной работы энергетических объектов.

Важную роль в перечне мероприятий занимает повышение качества строительно-монтажных работ и эффективности работы оборудования в процессе эксплуатации энергетических объектов. Решение этой задачи возможно только при условии соблюдения требуемой точности сопряжения отдельных строительных и технологических элементов при высокой стабильности параметров строительных конструкций и оборудования во времени и пространстве. Это может быть выполнено только при условии использования высокоэффективных методов и

средств геодезического обеспечения, позволяющих достичь необходимой точности при монтаже строительных конструкций и оборудования, а также производить геодезические измерения с необходимой точностью, в том числе определение деформации сооружений в процессе эксплуатации.

Однако, разработанной модели проектирования и усовершенствованных на ее основе существующих методов определения планового положения пунктов разбивочной сети и переноса разбивочных сетей с исходного на монтажные горизонты способом свободного стационарирования, методики приведения спутниковых измерений к центрам пунктов с оценкой точности и исследования влияния вертикальной рефракции на результаты измерения при строительстве и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов выполнены в недостаточном объеме.

### **Степень разработанности темы исследования**

Разработкой и усовершенствованием методов производства инженерно-геодезических работ занимались многие ученые всего мира, вот некоторые из них: Брайт П. И., Визиров Ю.В., Ганьшин В. Н., Гордеев В. А., Гуляев Ю. П., Жуков Б. Н., Зайцев А. К., Зубов А. В., Карлсон А. А., Ключин Е. Б., Коугия В. А., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Мазуров Б.Т., Мустафин М. Г., Никольский Е. К., Ознамец В. В., Пискунов М. Е., Середович В. А., Симонян В. В., Уставич Г. А., Хорошилов В. С., Ямбаев Х. К., Marczak P., Tarnowski K. и др.

Вопросами влияния вертикальной рефракции на результаты измерения занимались такие ученые, как Вшивкова О. В., Дрок М. К., Изотов А. А., Мозжухин О. А., Мороз А. И., Никонов А. В., Островский А. Л., Пеллинен Л. П., Яковлев Н. В. и др.

### **Цели и задачи, идея**

Целью диссертационной работы является совершенствование методов производства геодезических измерений для обеспечения процесса строительства и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов (на примере АЭС).

Основные задачи исследований:

– разработать метод переноса разбивочной сети с исходного горизонта на монтажные горизонты способом свободного стационарирования;

– разработать алгоритм оценки точности определения положения точки стояния тахеометра и деформационных марок в способе свободного стационарирования при строительстве и эксплуатации;

– предложить методику приведения спутниковых измерений к центрам пунктов;

– обобщить способы определения коэффициента вертикальной рефракции, предложить методику определения коэффициента вертикальной рефракции и исследовать суточный ход рефракции на коротких расстояниях (200 м).

Идея работы состоит в комплексировании линейно - угловых и спутниковых измерений для проектирования и построения разбивочных сетей, а также для определения горизонтальных и вертикальных перемещений с учетом коэффициента вертикальной рефракции на коротких расстояниях (200 м).

### **Научная новизна**

1. Обоснованы требования к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования.

2. Предложено отказаться от переноса геодезических разбивочных сетей с исходного на монтажные горизонты, а выполнять перенос способом свободного стационарирования с опорой на точки внешней сети с выполнением проектирования и оценкой точности положения электронного тахеометра.

3. Предложена методика приведения внецентренных спутниковых измерений к центрам пунктов на основе использования элементов центрировки и взаимнообратных координатных преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами и разработан алгоритм оценки точности измеряемых величин и полученных результатов, а также обоснована необходимость внесения поправок за уклонение отвесных линий в измеряемые величины.

4. Обобщены способы определения коэффициента вертикальной рефракции геодезическими методами (по результатам одностороннего тригонометрического

нивелирования на эталонном вертикальном базисе, по разностям измеренных и истинных зенитных расстояний и по вычисленным и известным превышениям).

5. Разработана методика определения коэффициента рефракции на вертикальном базисе, построение которого предложено на основе способа «во всех комбинациях».

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

*Теоретическая значимость* заключается в том, что полученные результаты по разработке модели проектирования и усовершенствованию на ее основе методах определения планового положения пунктов разбивочной сети комбинированным способом (спутниковым и линейно-угловым) позволяют повысить точность за счет применения способа свободного стационарирования и сократить время на выполнения этих работ, а предложенная методика позволит вести наблюдения в режиме «реального времени». *Практическая значимость* заключается в том, что эти разработки могут быть востребованы, как на этапе проектирования, так и в полевых условиях при производстве геодезических работ в период строительства и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов.

### **Методология и методы исследования**

Заключаются в обоснованном применении следующих методов исследования: анализа существующих геодезических методов, используемых при строительстве и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов, определения и оценки координат пунктов геодезических сетей, обработки геодезических измерений на основе сравнительного анализа, теории ошибок геодезических измерений, методов аналитической геометрии, метода наименьших квадратов, методов моделирования геодезических сетей, а также сопоставление полученных результатов с выводами, полученными по традиционным методикам.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Построение внутренних разбивочных сетей особо опасных и технически сложных объектов предлагается основывать на предрасчете точности без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты, а использовать способ свободного стационарирования.

2. Построение геодезических сетей, определение и контроль деформаций зданий и сооружений целесообразно проводить спутниковой аппаратурой, применяя, в том числе, методику проведения внецентренных спутниковых измерений и приведение их к центрам пунктов на основе использования элементов центрировки и взаимнообратных координатных преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами.

3. Разработанная методика определения вертикальной рефракции на вертикальном базисе позволяет обеспечить точность определения превышений тригонометрическим нивелированием на уровне 2 мм при расстояниях визирного луча до 200 м.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается корректной постановкой целей и задач исследования, планированием экспериментов, использованием математического аппарата и апробированных методик измерения, применением аттестованных измерительных средств, обработки данных, оценкой точности измерений. Результаты исследований согласуются с выводами, полученными другими исследователями.

Разработанные методы построения внутренних разбивочных сетей особо опасных и технически сложных объектов без переноса их с исходного на верхние монтажные горизонты с использованием способа свободного стационарирования и приведение к центрам пунктов результатов внецентренных спутниковых измерений внедрены на строящихся объектах организацией ООО «Промышленная геодезия» в г. Санкт-Петербург (подтверждается актом внедрения, Приложение Г).

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, а именно на: II Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения», Санкт-Петербург, ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018 г.; Международной научно-практической конференции «Транспортное строительство в холодных регионах» (TRANSOILCOLD – 2019), Санкт-Петербург, ПГУПС,

2019 г; III Международной научно-технической конференции «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (САТРИД – 2020), г. Нальчик, 2020 г; Международной научно-практической конференции «Современные проблемы инженерной геодезии», Санкт-Петербург, ПГУПС, 2020 г.

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ.

**Личный вклад автора** заключается в поиске и анализе информации необходимой для проведения исследований. Результатом самостоятельного исследования соискателя являются: обоснование требований к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования; проектирование внешней и внутренней разбивочных сетей; проведение эксперимента по приведению спутниковых измерений к центрам пунктов на основе использования элементов центрировки; обобщение способов определения коэффициента рефракции на основе геометрического и тригонометрического нивелирования; разработаны теоретические и практические рекомендации по методике создания вертикального базиса с уравниванием и оценкой точности результатов измерения и выполнение натурного эксперимента по определению коэффициента рефракции.

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК); в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования *Scopus*. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка. Содержит 136 страниц машинописного

текста, 23 рисунка и 30 таблиц, список литературы из 117 наименований и 4 приложения на 9 страницах.

### **Благодарности**

Автор выражает в первую очередь благодарность в первую очередь своему научному руководителю, доктору технических наук, профессору Брыню Михаилу Ярославовичу за помощь, оказанную при работе над диссертацией, а также заведующему кафедрой, кандидату технических наук, доценту Афонину Дмитрию Андреевичу за помощь в организации полевых исследований и всем преподавателям кафедры «Инженерная геодезия» ФГБОУ ВО ПГУПС за предоставленные информационные материалы и консультации.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

## 1.1 Характеристика особо опасных и технически сложных объектов. Общие сведения об атомных электростанциях

Классификация строительных объектов предполагает разделение всех видов объектов по назначению (промышленные, транспортные, жилищно-гражданские и др.) и по уровню ответственности (повышенный, нормальный, пониженный). К повышенному уровню ответственности относятся особо опасные, технически сложные и уникальные объекты.

Градостроительный кодекс в статье 48.1 [29] к категории «особо опасные и технически сложные объекты» относит объекты использования атомной энергии, гидротехнические сооружения первого и второго классов, объекты космической инфраструктуры и др. Уровень ответственности (повышенный, нормальный, пониженный) зависит от того, относится ли объект к опасным или особо опасным. Это влияет на уровень экспертизы проектной документации. Полный перечень особо опасных и технически сложных установлен Федеральным законом от 30.03.2016 № 74-ФЗ [102].

Кодекс [29] не раскрывает понятия объектов, относимых к особо опасным и технически сложным, их понятия содержатся в иных федеральных законах. Так, в соответствии с Федеральными законами от 21.11.1995 № 170-ФЗ и от 30.03.2016 № 74-ФЗ [101, 102] к ядерным установкам относятся: сооружения и комплексы с ядерными реакторами, в том числе атомные станции, суда и другие плавсредства, космические и летательные аппараты, другие транспортные и транспортабельные средства; сооружения и комплексы с промышленными, экспериментальными и исследовательскими ядерными реакторами, критическими и подкритическими ядерными стендами; сооружения, комплексы, полигоны, установки и устройства с ядерными зарядами для использования в мирных целях; другие содержащие ядерные материалы сооружения, комплексы, установки для производства,

использования, переработки, транспортирования ядерного топлива и ядерных материалов; к радиационным источникам — не относящиеся к ядерным установкам комплексы, установки, аппараты, оборудование и изделия, в которых содержатся радиоактивные вещества или генерируется ионизирующее излучение; к пунктам хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилищам радиоактивных отходов – не относящиеся к ядерным установкам и радиационным источникам стационарные объекты и сооружения, предназначенные для хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранения или захоронения радиоактивных отходов.

В письме Минстроя России от 20.04.1995 № БЕ-19-9/24 [84] тоже приведен перечень особо опасных и технически сложных объектов и первым пунктом в этом списке также идут атомные электростанции.

Таким образом видно, что АЭС относятся к особо опасным и технически сложным объектам.

#### *Классификация атомных электростанций*

В нашей стране более 80% всей электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС). ТЭС могут работать как на минеральном топливе (уголь, торф, сланцы, газ, нефть, мазут), так и на ядерном топливе. В последнем случае они называются атомными электростанциями (АЭС) [42, 44].

Если говорить о структуре АЭС, то это очень сложный инженерно-энергетический комплекс, в который входят здания особого назначения, энергетическое и иное оборудование [26].

В состав АЭС [44, 97] входят главный корпус, в котором сосредоточено оборудование по выработке электроэнергии, объекты технического водоснабжения, сооружения топливного хозяйства, электротехнические сооружения, различные коммуникации – подземные и наземные, на опорах и др.

Ниже приведена схема работы АЭС (рисунок 1.1).

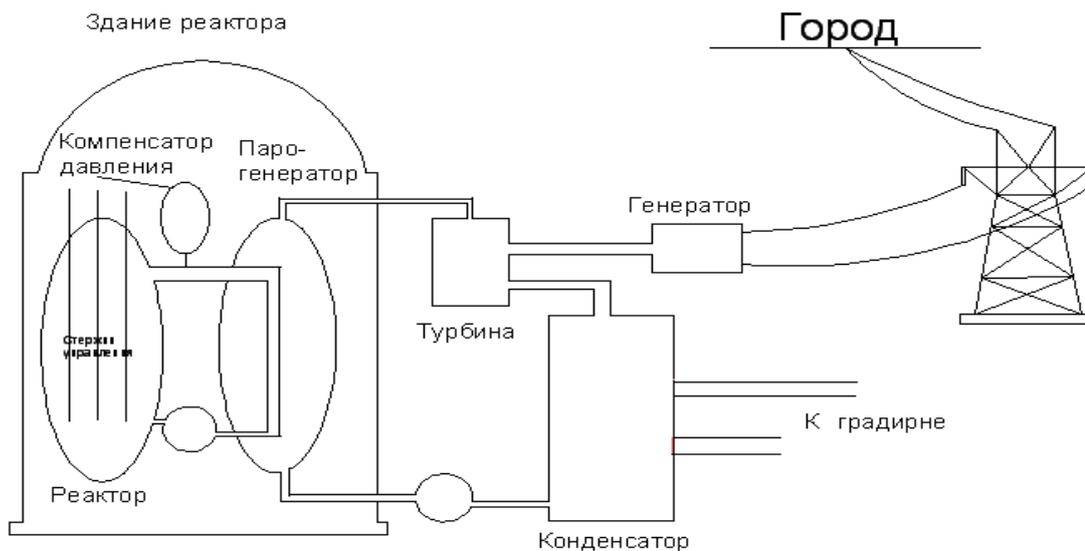


Рисунок 1.1 – Схема работы АЭС

Авторы работы [36] делят атомные электрические станции на конденсационные, теплофикационные (АТЭС), а также атомные станции теплоснабжения (АСТ) и атомные станции промышленного теплоснабжения (АСПТ). Ядерные реакторы АЭС классифицируются по различным признакам: по уровню энергии нейтронов (тепловые и быстрые); по виду замедлителя нейтронов (водные, тяжеловодные, графитовые). Реакторы водоохлаждаемые делятся также по типу конструкции: корпусные и каналные [36].

В случае отсутствия около АЭС большого водоема, вода для конденсации пара может охлаждаться в специальных охлаждающих башнях, называемыми градирнями.

#### *Преимущества и недостатки АЭС*

Главное преимущество использования [36] АЭС заключается в том, что на них используется небольшой объем топлива, а также при перевозке ядерного топлива расходы минимальны (в отличие от традиционного). Огромным преимуществом АЭС является экологическая чистота. Пожалуй единственный фактор при сохранении экологии окружающей среды, в котором уступают АЭС – это тепловое загрязнение, так как для охлаждения конденсаторов турбин необходимо большое количество технической воды. Поэтому современные АЭС

как правило имеют собственные искусственные водохранилища - охладители или охлаждаются градирнями. Также некоторые АЭС для снижения непродуктивных тепловых потерь, отводят часть тепла на нужды отопления и горячего водоснабжения близлежащих городов.

Существенным недостатком АЭС является тяжелые последствия аварий (выброс радиоактивных веществ и загрязнением окружающей среды), для предотвращения которых на АЭС оборудуются сложные системы безопасности, обеспечивающие исключение расплавления активной зоны даже в случае максимальной проектной аварии.

Если не допускать аварийность работы АЭС, то это пока самое экономичное и экологически чистое производство энергии.

#### *Строительство Ленинградской АЭС-2*

Срок эксплуатации атомных электростанций устанавливается правительством конкретной страны. Например, в России безопасный срок эксплуатации АЭС 40 и более лет. Под замену старым строятся новые реакторы. Таким примером является ЛАЭС-2, которая является заменой отработавшей и устаревшей ЛАЭС-1.

ЛАЭС-2 построили в Ленинградской области рядом с г. Сосновый Бор, на побережье Финского залива в 30 км от г. Санкт-Петербург.

Необходимость строительства II очереди Ленинградской АЭС (ЛАЭС-2) была обусловлена усилением напряженности энергетической обстановки на Северо-Западе России. Назначение ЛАЭС-2 заключалось в сохранении и развитии производства электрической и тепловой энергии в Северо-Западном регионе европейской части России, в том числе для поэтапного замещения действующих мощностей I очереди Ленинградской АЭС (ЛАЭС-1) при исчерпании ее эксплуатационного ресурса.

Краткая история строительства ЛАЭС показана на схеме ниже (рисунок 1.2).

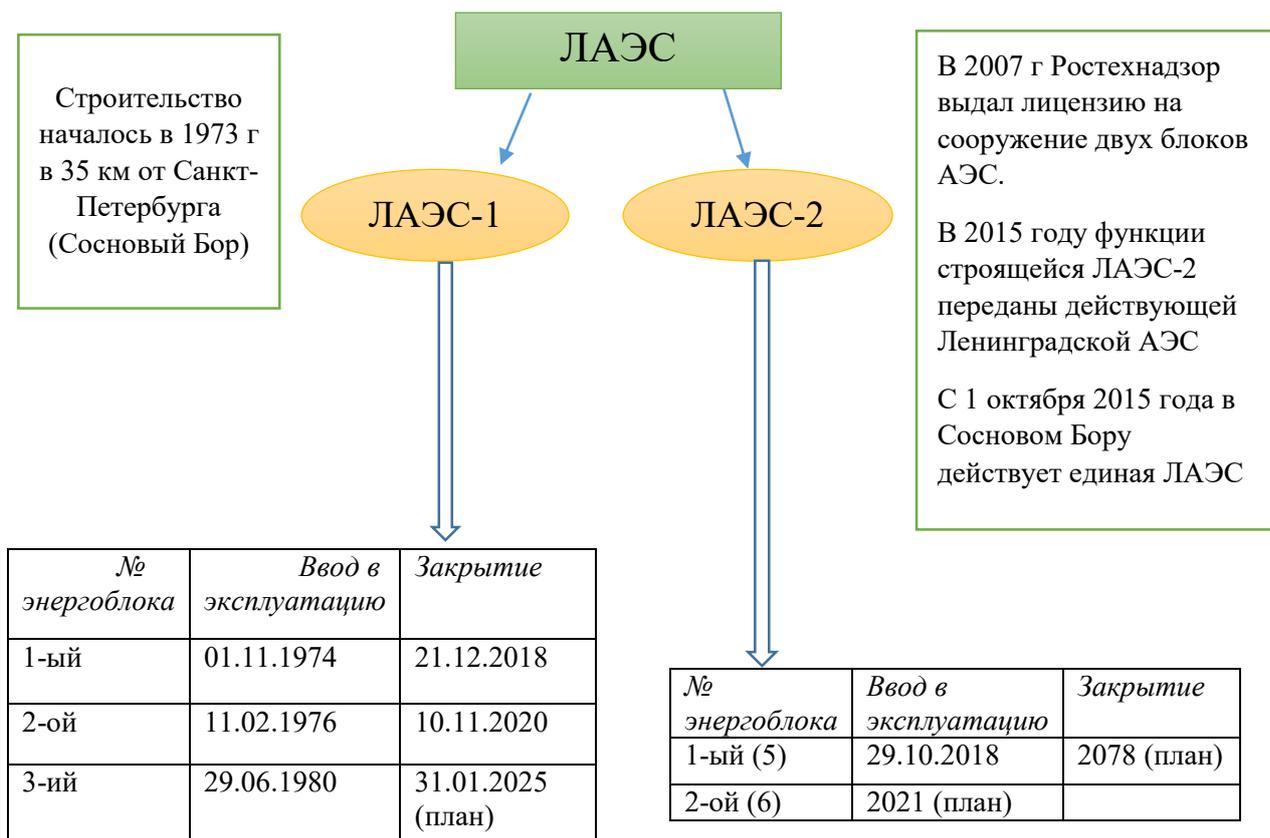


Рисунок 1.2 – История строительства ЛАЭС

В перечень основных объектов строительства ЛАЭС-2 входят следующие здания и сооружения: здание реактора, здание управления, паровая камера, здание безопасности, вспомогательный корпус, хранилище свежего ядерного топлива и твердых радиоактивных отходов здания реактора, здание ядерного обслуживания с бытовыми помещениями зоны контролируемого доступа, здание блочной дизельной электростанции с промежуточным складом дизельного топлива, здание турбины, здание электроснабжения нормальной эксплуатации, здание водоподготовки, башенная испарительная градирня, насосная станция потребителей здания турбины, брызгальный бассейн и др.

Многие здания объединены в реакторный блок. Схема расположения зданий реакторного блока ЛАЭС-2 представлена частично ниже (рисунок 1.3).

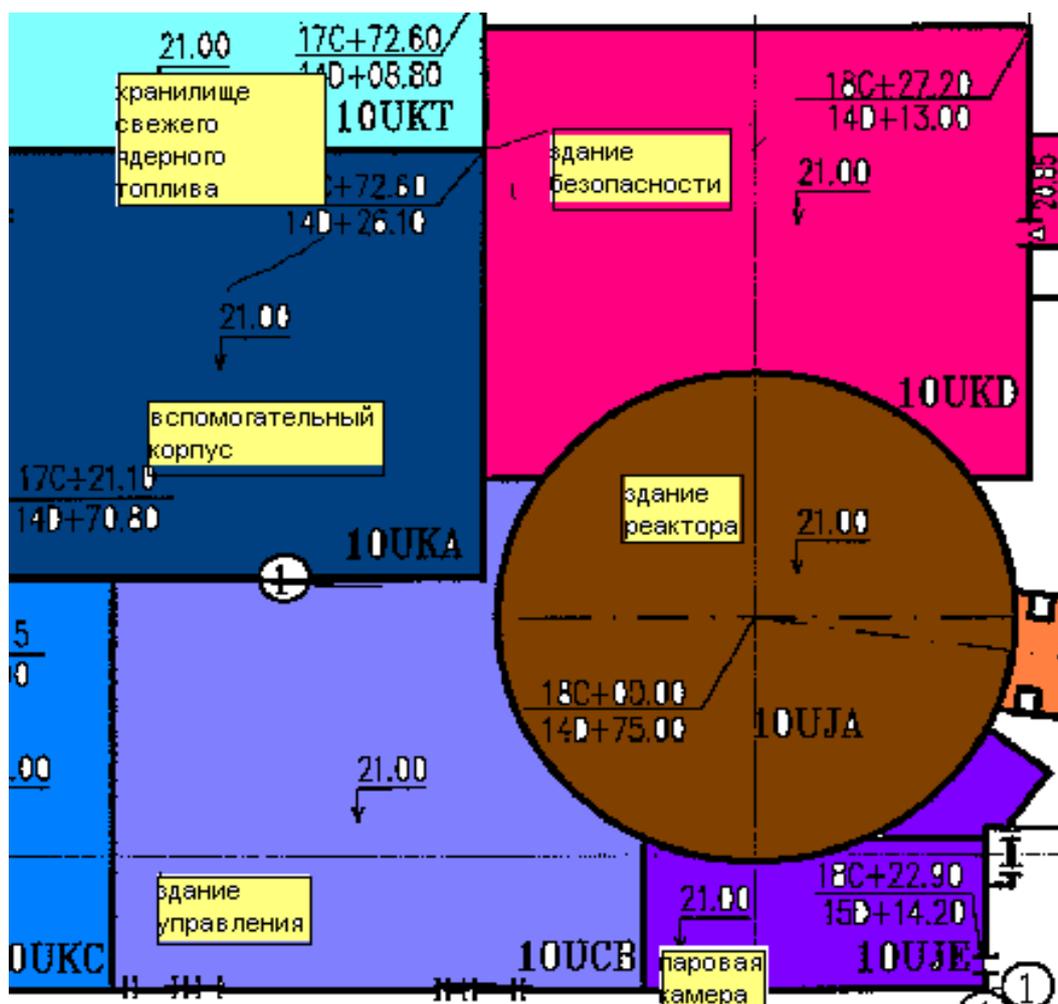


Рисунок 1.3 – План реакторного блока АЭС

## 1.2 Анализ требований к точности геодезического обеспечения строительства и эксплуатации АЭС

Геодезические работы в строительстве следует выполнять в объеме и с точностью, обеспечивающих при размещении и возведении объектов строительства соответствие геометрических параметров проектной документации требованиям строительных норм, правил и Государственных стандартов [88].

Точность построения разбивочных сетей, а также выполнение геодезических работ и контроль качества строительства на данный момент регламентируются актуальными основными нормативными документами [28, 88, 90, 91, 93].

Строительство ЛАЭС-2 выполнялось согласно нормативным документам (например, СНиП 3.01.03-84), которые на сегодняшний день утратили силу. Поэтому анализ требований к точности геодезического обеспечения строительства

и эксплуатации АЭС производился по тем документам, которые были актуальны на момент строительства.

В состав геодезического обеспечения при проведении строительства, согласно [89], входили такие работы как: создание разбивочной сети и разбивочные работы, а также контроли качества строительства и деформаций сооружений.

В нормативном документе СНиП [92] также были расписаны методы и точность выполнения вышеназванных работ. Кратко рассмотрим них ниже.

#### *Точность построения разбивочной сети*

Когда проводилось строительство ЛАЭС-2, то после создания разбивочной сети, которая согласно [92], опиралась на уже имеющиеся в то время пункты геодезических сетей в районе строительства, она включала в себя внешнюю и внутреннюю разбивочные сети, а также разбивочную сеть для монтажа технологического оборудования.

Разбивочная сеть строительной площадки служила для выноса в натуру основных или главных разбивочных осей сооружения. Она создавалась в виде строительной сетки.

Как было указано в [92], внешняя разбивочная сеть реакторного блока строилась по контуру сооружения по основным его осям и дополнительно в этот разбивочный процесс включали линии симметрии здания (то есть выносили в натуру главные оси этого сооружения). По правилам закрепления их на местности требовалось не менее четырех пунктов на одну ось.

Для выполнения детальных разбивочных работ, выполнения необходимого геодезического контроля в виде исполнительных съемок, а также для передачи координат на монтажные горизонты при строительстве ЛАЭС-2 создавалась внутренняя разбивочная сеть. Создание внутренней разбивочной сети здания (сооружения) на исходном горизонте выполняли с привязкой к пунктам внешней разбивочной сети, а на монтажном горизонте – к пунктам внутренней разбивочной сети исходного горизонта.

Точность построения разбивочной сети строительной площадки принимались соответственно данным, приведенным в таблице А.1 [92], а точность

построения внешней и внутренней разбивочной сети здания (сооружения), в том числе вынос основных или главных разбивочных осей – в таблице А.3 (таблицы А.1 и А.3 приведены в Приложении А).

Исходя из данных таблицы А.1 (площадь ЛАЭС-2 около 1,2 км<sup>2</sup>), можно видеть, что при создании разбивочной сети строительной площадки принимались следующие величины средних квадратических погрешностей: измерения углов – 3", измерения линий – 1/25000 и превышений (которые определяются из геометрического нивелирования) – 4 мм на один км хода.

Так как реакторный блок на ЛАЭС-2 имеет высоты в пределах 56 – 73 м и учитывая данные таблицы А.3 (Приложение А), величины средних квадратических погрешностей при выносе основных или главных разбивочных осей принимали: измерения углов 20", измерения линий – 1/5000, а также определение превышений из геометрического нивелирования – 2,5 мм на станции.

#### *Разбивочные работы*

Разбивочные работы в процессе строительства обеспечивали вынос в натуру от пунктов геодезической разбивочной сети с заданной точностью осей и отметок, определяющих в соответствии с проектной документацией положение в плане и по высоте частей и конструктивных элементов сооружения.

Точность разбивочных работ в процессе строительства принимали, руководствуясь данными, приведенными в таблице А.3 (Приложение А).

Передачу точек плановой внутренней разбивочной сети сооружения с исходного на монтажный горизонт выполняли методами наклонного и вертикального проектирования в зависимости от высоты сооружения и его конструктивных особенностей, учитывая требования к точности, которые приведены в [92] и таблице А.4 (Приложение А).

#### *Контроль качества строительства*

Для контроля качества строительных работ проводились исполнительные (далее составлялась исполнительная документация), а также для контроля выполнялись наблюдения за деформациями (горизонтальными и вертикальными

перемещениями) сооружения на всех этапах строительства и последующей эксплуатации.

Согласно [92], погрешность измерений в процессе геодезического контроля точности геометрических параметров сооружений, в том числе при исполнительных съемках инженерных сетей, не превышала 0,2 величины отклонений (это значение является допуском по строительным нормам и правилам). Допустимые величины отклонений частично приведены в таблице А.5 (Приложение А).

Точность выполнения исполнительных съемок, а также величины отклонений элементов АЭС, допускаемых строительными нормами и правилами представлены нормативных документах [90, 91, 93].

Анализируя величины отклонений, можно заметить, что точность монтажа элементов конструкций зависят от материала, методов возведения зданий и сооружений, технологических допусков. Наиболее жесткие требования по точности предъявляются к соосности элементов реакторного блока.

Необходимо отметить, что атомные предприятия обязательно имеют специальную канализацию для перевозки жидких радиоактивных отходов в резервуары и сооружения временного хранения, выдержки и выпаривания.

Как показывает производственный опыт, что при строительстве специальной канализацией на атомных предприятиях объем геодезических работ в 8 – 12 раз выше по сравнению со строительством обычных канализаций, поэтому и требования к точности при проведении строительства повышаются в разы [8, 95]. Наиболее жесткие требования предъявлялись к высотным отклонениям частей канализации.

### *Контроль деформаций*

В ГОСТе [27] приведены все методы и требования к точности выполнения контроля деформаций.

Для производства и контроля деформаций (горизонтальных и вертикальных перемещений) при выборе метода и допускаемых погрешностей руководствовались таблицей класса точности измерений (таблица А.2,

Приложение А), а класс точности в свою очередь назначался в зависимости от типа сооружения и грунтов, на которых производилось строительство.

Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод, что контроль деформаций на ЛАЭС-2 производился по II классу точности измерений, так как данный объект возводился на глинистых грунтах.

### **1.3 Анализ видов геодезических работ на атомной электростанции**

#### **1.3.1 Методы создания плановой разбивочной основы, внутренней разбивочной сети и производство разбивочных работ**

При строительстве 1-й очереди ЛАЭС-2 был разработан проект производства геодезических работ (ППГР), который включал в себя следующие сведения:

1. Общие положения (основания для разработки ППГР, исходные данные проектирования, общие сведения об объекте, этапы строительства, применяемое ПО, соответствие проекта и установленных требований)
2. Сведения об основных сооружениях объекта (существующие и проектируемые здания и сооружения, топографо-геодезическая изученность объекта, планы и разрезы основных сооружений)
3. Сведения об основных коммуникациях объекта (существующие и проектируемые коммуникации)
4. Проект организации геодезических работ (организация геодезических работ на разных этапах СМР, календарный план, состав и материально-техническое обеспечение геодезической службы, расчёт сметной стоимости)
5. Геодезические работы на строительной площадке и при монтаже основных технологических схем проекта АЭС
6. Геодезические работы при контроле деформаций зданий и сооружений в период строительства
7. Первоочередные мероприятия ППГР
8. Мероприятия по охране окружающей среды и по охране труда

Отметим, что в ППГР не предусматривается проектирование разбивочных сетей, а это необходимо делать, так как сокращает объем полевых работ, повышает производительность труда, а также предрасчет точности, выполняемый при проектировании дает уверенность в выбранном методе построения разбивочных сетей.

ППГР предполагает выполнение большого объема работ, поэтому в данной работе остановимся только на некоторых пунктах ППГР на примере строительства части зданий энергоблока №1 ЛАЭС-2.

#### *Создание строительной сетки*

В 1961, 1962 гг. частями военной топографической службы были выполнены геодезические работы: триангуляция 2, 3, 4 классов и полигонометрия 4 класса в районе Ленинград – Нарва. В дальнейшем при строительстве ЛАЭС-2 три пункта триангуляции 2 класса были использованы в качестве исходных при развитии сети сгущения.

В 1995 г. на территории города Сосновый Бор предприятием ГП «Аэрогеодезия» был выполнен комплекс работ по закладке, определению и уравниванию полигонометрии 4 класса и 1, 2 разрядов. Пункты данной работы использовали в качестве исходных при разбивке строительной сетки.

С целью создания строительной сетки площадки строительства ЛАЭС-2 в 2007 г. на объекте были выполнены инженерно-геодезические изыскания предприятием ООО «Нефтегазгеодезия».

Перед началом полевых работ геодезистами предприятия ООО «Нефтегазгеодезия» выполнен анализ существующей строительной сетки. По сохранившимся пунктам строительной сетки был проложен электронным тахеометром ход полигонометрии 2 разряда. В результате выявлено, что угловые и линейные элементы сетки имели отклонения от проектных. В целях выполнения требований СНиП по созданию геодезической разбивочной основы, создали опорную геодезическую сеть с требуемой точностью. Для этого потребовалась закладка 4-х центров глубокого заложения (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Геодезические центры глубокого заложения

Определение координат пунктов опорной сети проводилось с помощью глобальной системы позиционирования (*GPS*) «*Trimble*» с точностью полигонометрии 4 класса.

Далее было выполнено определение координат сохранившихся пунктов строительной сетки (14 шт.) методом полигонометрии 1 разряда. Угловые и линейные измерения проводились электронным тахеометром *TC R 405*.

#### *Создание внешней разбивочной сети*

На данном этапе геодезические работы при строительстве реакторного блока ЛАЭС-2 состояли из закладки пунктов разбивочной сети (точки закреплены арматурными стержнями диаметром 18 мм длиной 80 см, забитыми в грунт на глубину 0,5 м) и выноса осей сооружений с предварительным закреплением точек металлической арматурой

Вынос осей производился полярным методом с пунктов строительной сетки.

Геодезические работы по окончательному выносу осей сооружений первого энергоблока ЛАЭС-2 подразумевали закладку 35-и пунктов глубокого заложения и вынос осей сооружений.

Вынос осей производился методом приближения. В процессе работ было выполнено 3 приближения.

По вновь заложенным осевым пунктам проложены ходы полигонометрии 1 разряда. Измерения производились электронным тахеометром *TC 802 Power*. В качестве исходных служили пункты сети сгущения 4 класса (каркасные пункты).

После уравнивания ходов полигонометрии в системе координат строительной сетки были получены поправки для редуцирования и произведено редуцирование на местности.

Когда были получены фактические строительные координаты точек первого определения, то они сравнивались с проектными значениями и вычислялась редукция для перемещения точек (графическим методом) на плите в проектное положение.

Оптимальным был принят вариант редукции, при котором обеспечивался минимум сумм квадратов редукций по осям, т.е. проектные линии строительной сетки проходили наиболее близко к центральной части металлической плиты.

Редукцию выполняли при помощи координатного шаблона графическим методом [13].

Для проверки правильности редуцирования проложены контрольные ходы полигонометрии 1 разряда по точкам второго приближения положения осевых пунктов. Измерения производились электронным тахеометром. В качестве исходных приняты пункты сети сгущения 4 класса (каркасные пункты).

#### *Создание внутренней разбивочной сети*

Внутренняя разбивочная сеть была создана непосредственно на исходном горизонте от пунктов геодезической разбивочной основы.

От многих факторов зависела конфигурация схемы создания разбивочной основы на исходном горизонте при строительстве реакторного блока на ЛАЭС-2, а именно: методов и видов строительного-монтажных работ, конструкции сооружения, а также методов передачи сети на монтажные горизонты (в том числе возможность применения вертикального проектирования) и выполнения контрольных измерений в период строительства и эксплуатации.

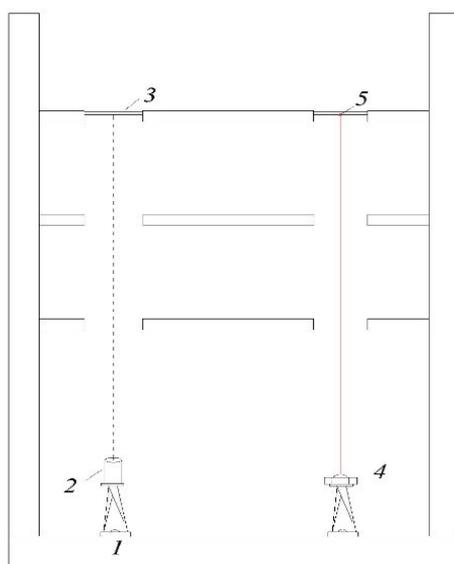
Создание внутренней разбивочной сети при строительстве реакторного блока на ЛАЭС-2 велось по разным схемам (в виде прямоугольников, центральных систем и их комбинаций), так как данное сооружение имело различную конфигурацию и значительную подземную часть. В качестве исходного горизонта были приняты фундаментные плиты каждого из зданий. На отметке +21.000

(условная нулевая отметка строительной площадки) представилась возможность объединения внутренних разбивочных сетей зданий и сооружений главного корпуса ЛАЭС-2, что позволило выполнить контроль различных сетей и распределить накопленные погрешности [50].

Плановое положение пунктов внутренней разбивочной сети при строительстве ЛАЭС-2 выполнялось методом построения линейно-угловой сети с помощью электронных тахеометров (со средней квадратической погрешностью измерения углов одним приемом  $2''$ ) от пунктов исходного горизонта.

В свою очередь, линейно-угловая сеть представляет собой систему треугольников, в каждом из них измеряют все углы и длины сторон этих треугольников [1, 6, 18, 24, 31]. Эти сети на производстве очень распространены, так как имеют большое число избыточных измерений и очень надежны.

На ЛАЭС-2 при передаче плановой сети на монтажные горизонты частично использовали метод вертикального проектирования через лифтовые шахты (так как технологические отверстия в перекрытиях отсутствовали). Проецирование точек внутренней разбивочной сети выполнялось оптическими и лазерными приборами вертикального проектирования (рисунок 1.5).



- 1 – геодезический пункт на исходном горизонте,
- 2 – прибора вертикального проектирования (оптический),
- 3 – закрепленная палетка на монтажном горизонте,
- 4 – прибора вертикального проектирования (лазерный),
- 5 – лазерное пятно на палетке.

Рисунок 1.5 – Передача положения пунктов внутренней разбивочной сети

Метод вертикального проектирования довольно прост в исполнении и точен. Например, если использовать прибор вертикального проектирования такой как *FG – L100 (FRM)*, то при передаче планового положения точки стояния на верхние монтажные горизонты на высоту до 100 м можно получить погрешность не более 1 мм. А при применении лазерного прибора типа *LV-1 (Sokkia)* – не более 2,5 мм на 100 м. Однако, следует заметить, через технологические отверстия в условиях строительной площадки проникает много мусора, что затрудняет выполнение работ и технологические отверстия ведут к ослаблению плит перекрытия.

В условиях чрезмерной стесненности и загруженности строительной площадки для развития и сгущения внутренних разбивочных сетей можно было бы применить способ свободного стационарирования. Данный способ очень удобен при использовании современных тахеометров, однако он не упоминается в нормативных документах.

#### *Разбивочные работы*

Для установления в проектное положение конструктивных элементов зданий (сооружений) в процессе строительства ЛАЭС-2, а также осей трасс сетей инженерно-технического обеспечения, разбивочные работы обеспечивали вынос в натуру точек от пунктов внутренней разбивочной сети, следуя действующим нормативным документам [28, 87, 90, 91].

Отдельные точки сооружения или точки, закрепляющие его оси выносят в натуру разными способами [32, 51, 73, 98, 106, 100, 108]: полярных координат, створной линейной засечкой, прямоугольных координат, прямой угловой засечки, линейной засечки, створов.

Перечисленные выше способы являются классическими (которые описаны в разных источниках с использованием теодолитов и рулеток), но в строительстве уже давно применяют электронные тахеометры, поэтому вынос на ЛАЭС-2 проводился способами с использованием электронных тахеометров.

Ниже приводится краткая методика самых распространенных способов выноса в натуру с помощью электронного тахеометра [20, 104]:

### 1. Полярный способ

Этот способ наиболее распространенный, особенно в связи с внедрением электронных тахеометров в производство геодезических работ.

Вынос любой точки способом полярных координат с помощью электронного тахеометра, который имеет функцию «вынос в натуру», выполняется по заданным проектным координатам или проектному углу и проектному расстоянию.

Прибор устанавливается над пунктом внутренней разбивочной сети сооружения и в его память заносятся координаты. Прибор ориентируют по другой точке сети. В память тахеометра вводятся значения проектного угла и проектного расстояния или проектные координаты выносимой точки. Веха с отражателем устанавливается в примерно выносимой точке и выполняются измерения. На дисплее отражаются значения величин перемещений призмы. Далее необходимо перемещать призму таким образом, чтобы добиться допустимых отклонений полученных координат точки от проектных.

### 2. Способ свободного стационарирования

Когда есть на строительной площадке загромождения строительной техникой, механизмами, оборудованием целесообразно применять способ применяется свободного стационарирования, а также этот способ можно применять на монтажных горизонтах (например, когда наличие перегородок или крупногабаритного оборудования закрывает видимость с пунктов внутренней разбивочной основы).

Разбивочные работы в данном способе [7] выполняются после выбора местоположение прибора.

Вблизи места выполнения разбивочных работ устанавливается тахеометр (т. S, рисунок 1.6) так, чтобы с него была обеспечена видимость на пункты с известными координатами.

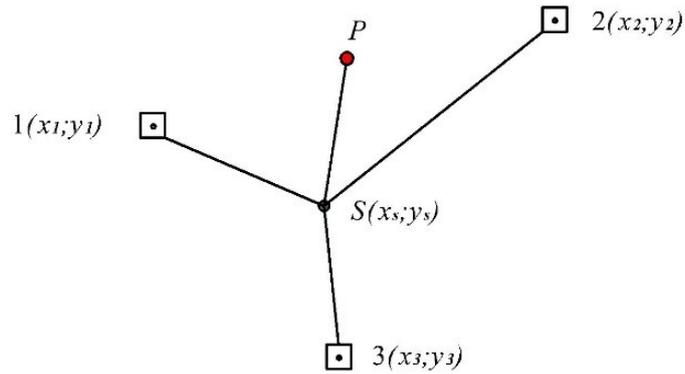


Рисунок 1.6 – Вынос точки способом свободного стационарирования

Координаты точки стояния прибора вычисляются при использовании функции «обратная засечка», а на дисплее еще и высвечиваются погрешности точки стояния по координатам.

Чтобы произвести контроль измерений, необходимо в режиме «координаты» произвести измерения на любой пункт, который является исходным и сравнить полученные координаты с истинными координатами этого пункта.

Далее используя режим «вынос в натуру» с т.  $S$  по координатам выполняется вынос в натуру т.  $P$ .

В данном способе при выполнении обратной засечки на дисплей тахеометра выводятся СКП точки стояния прибора, однако в литературе нет оценки точности всего способа свободного стационарирования.

### 3. Способ обратной засечки

Данный способ широко освещен во всех источниках [48, 113]. Способ обратной засечки невозможно применить в «чистом виде» для выноса в натуру точки, а можно использовать его только в сочетании с методом редуцирования, так как прибор устанавливается не в точке  $P$ , потому что положение этой точки неизвестно, а где-то поблизости, например в точке  $P_1$  (рисунок 1.7).

Выбор комбинации исходных пунктов – это самый главный пункт при использовании способа обратной угловой засечки, так как при некоторых комбинациях нет решения задачи. Точность обратной угловой засечки в большей степени зависит от расположения определяемой точки относительно исходных

пунктов существующей сети. Самый оптимальный вариант – это когда определяемая точка находится как бы «внутри» исходных пунктов.

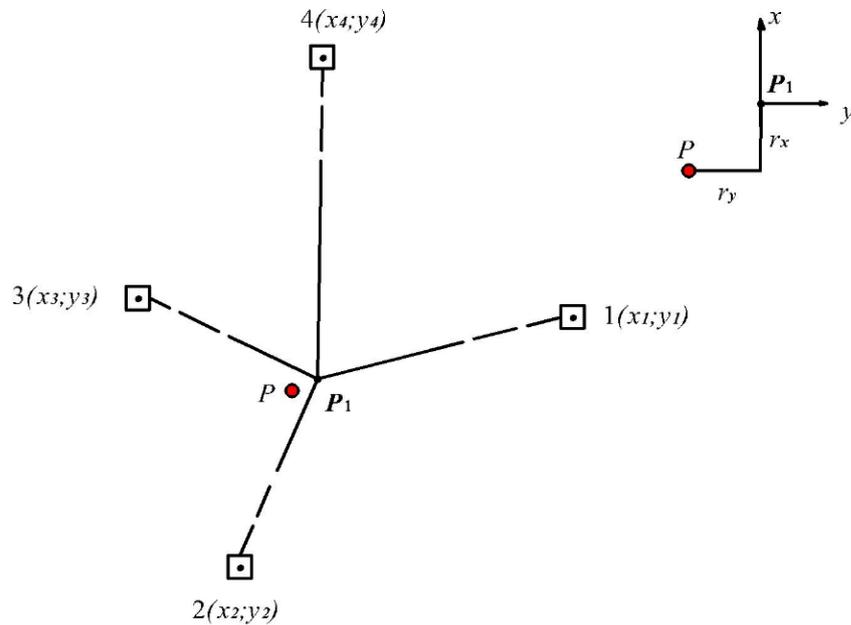


Рисунок 1.7 – Вынос точки  $P$  способом обратной засечки

В связи с внедрением в производство электронных тахеометров, появилась возможность выполнять не только угловые, а еще и линейно измерения одновременно, это позволяет иметь максимальное количество избыточных измерений, так как они позволяют проконтролировать и повышать точность определения координат.

Далее координаты точки  $P_1$  (которые были найдены) сравниваются с проектными координатами точки  $P$ , и полученные разности (редукции) откладываются по линейки по направлениям соответствующих координатных осей. Полученное положение точки  $P$  закрепляется.

Приведенные выше способы давно применяются при строительстве, но в нормативных документах никак не упоминаются.

### 1.3.2 Использование спутниковых технологий на объекте работ

На ряду с классическими методами построения сетей (полигонометрические ходы, триангуляция, засечки), нормативные документы

разрешают применение спутниковой аппаратуры при построении плановых сетей. Так, например, в документе [86] сказано, что «при выполнении разбивочных работ с использованием приборно-инструментальных комплексов *ГЛОНАСС/GPS* базовые пункты сети следует располагать в тех местах, где применение спутниковых технологий и методов измерений обеспечат требуемую нормативную точность».

Так, например, при строительстве ЛАЭС-2, как было сказано выше, определение координат пунктов опорной сети проводилось с помощью глобальной системы позиционирования (*GPS*) «*Trimble*» с точностью полигонометрии 4 класса.

При построении геодезических сетей используют дифференциальные режимы спутниковых навигационных систем [4]. В них псевдодальности до спутников измеряют обязательно с двух станций. Опорная (или ее еще называют базовой) станция устанавливается на пункте, у которого получены координаты в принятой системе координат, а на определяемом пункте – мобильная (или передвижная) станция.

Дифференциальный режим используют для исключения систематических погрешностей, общих для опорной и мобильной станций. В свою очередь, основными источниками систематических погрешностей являются неточность прогноза эфемерид, уходы часов спутника, задержки сигнала в ионосфере и тропосфере, включенный режим ограниченного доступа *S/A* в *GPS*.

Чтобы уменьшить влияние систематических погрешностей на результаты измерений, необходимо их проводить одновременно на опорной и мобильной станциях, в одной и той же точке. Разнос измерений во времени и в пространстве снижает потенциальную точность дифференциального режима [46, 60, 72].

При выполнении измерений спутниковым методом часто вынуждено приходится устанавливать спутниковую геодезическую аппаратуру вне центров пунктов. Производится это в случаях экранирования спутниковых сигналов, либо для исключения ошибок многолучевости и др.

Чтобы привести результаты измерений к центрам геодезических пунктов, необходимо определять элементы приведений (к ним относятся элементы центрировки и редукции). Элементами за центрировку являются поправки в результаты измерений за внецентренную установку прибора на пункте наблюдения. Поправки в результаты измерений за несовпадение осей визирных цилиндров с центрами наблюдаемых пунктов называются поправками за редуцию.

В современном производстве геодезических работ наблюдения на визирные цилиндры сигналов уже практически не производятся, так как геодезические приборы (в том числе и антенны спутниковых приемников) могут быть установлены вне центров пунктов, поэтому в дальнейшем речь будем вести только об элементах центрировки. Для определения элементов центрировки на практике используют способы: графический и аналитический. Наиболее распространенным способом определения элементов приведения является графический способ. Большим недостатком этого способа является то, что он применяется при небольших величинах линейных элементов приведения (не более 0,5 м).

А также использование в ряде случаев, названных выше способов, бывает затруднено, например, в силу залесенности, крутых склонов [2, 115].

Вопрос приведения к центрам пунктов спутниковых измерений рассматривался в работах [12, 16, 17, 25, 62, 107], при этом авторы к элементам центрировки при построении пространственных сетей относят полярные сферические координаты центр пункта относительно точки центра антенны спутникового приемника, а именно, наклонное расстояние между точками, геодезический азимут этого направления (либо угол между наблюдаемым направлением и начальным направлением) и геодезическое зенитное расстояние.

Для приведения к центрам пунктов спутниковых измерений выполняются, как правило, измерения на дополнительных точках, в которых имеются благоприятные условия радиовидимости.

При этом, выполнив измерения на дополнительных точках, часто передают координаты к искомому центру традиционными методами геодезии (засечками,

проложением полигонометрических ходов,...). В практическом руководстве [4] предложено выполнять спутниковые измерения на трех дополнительных точках вокруг сложного наружного знака, которые рекомендовано последовательно преобразовать в плоские прямоугольные  $x, y$  по схеме  $X, Y, Z \rightarrow B, L, H \rightarrow x, y$ , где  $B, L, H$  – эллипсоидальные координаты дополнительных точек. Выполнив измерения длин линий между дополнительными точками, а также между дополнительными точками и искомым центром, появляется возможность определить с контролем плоские прямоугольные координаты центра решением двух линейных засечек. Аналогично можно получить и высоту центра, выполнив измерения превышений между указанными точками и пунктом. Путем обратных преобразований можно получить пространственные прямоугольные координаты искомого пункта.

Часто спутниковые измерения выполняются на двух дополнительных точках, устанавливаемых в створе, как в плане, так по высоте, с искомым центром. После выполнения измерений расстояний от центра до дополнительных точек, координаты центра пункта вычисляются с учетом линейных зависимостей [4].

В условиях строительства практически невозможно работать спутниковой аппаратурой (в связи с полным или частичным скрыванием небесной сферы и поэтому, отсутствием сигнала), поэтому необходимо предложить комбинированный метод работы с использованием спутниковой аппаратуры и электронного тахеометра, а также, установкой прибора вне центра пункта.

### 1.3.3 Способы геодезических измерений деформаций

Изменение пространственного положения точек сооружения, его частей или всего сооружения в целом – это и есть деформации зданий и сооружений [1, 11].

Согласно источнику [27], в процессе строительства определяют (отдельно или совместно) следующие деформации:

- вертикальные перемещения, а именно осадки, просадки, подъемы;
- горизонтальные перемещения (сдвиги); крены.

По своей характеристике осадки также можно разделить на равномерные и неравномерные.

В рамках реального строительства и эксплуатации зданий и сооружений равномерных осадок при сжатии грунта практически не наблюдается, так как геологическое строение в вертикальном и в горизонтальном направлениях даже на совсем небольших участках не бывает однородным.

Также неравномерные осадки возникают из-за того, что грунт под фундаментом неодинаково сжимается и происходит различное по своей силе давление частей сооружения, что, в свою очередь, вызывает разного рода перемещения и деформации в конструкциях сооружений и приводит к наклонам, прогибам, искривлениям и другим видам деформации сооружения [51, 75, 117].

Если говорить о горизонтальных перемещениях [1], то под ними следует понимать деформации, которые связаны изменением прямоугольных координат  $x$  и  $y$  точек сооружения под действием горизонтальных нагрузок на основание.

Крен возникает при неравномерной осадке сооружения, а также при изгибе и наклоне верхней части здания из-за одностороннего температурного нагрева и ветра. Наибольшую опасность представляет крен высотных сооружений (25 и более этажей).

Не менее опасно, если возникает кручение здания, которая представляет собой сложную деформацию, а именно поворот сооружения в поперечных сечениях вокруг продольной оси в различных направлениях). При кручении образуются трещины, которые представляют собой разрывы в отдельных конструкциях сооружения в следствии того, что сооружение оседает неравномерно.

Обобщенные причины возникновения деформаций связаны с особенностями свойств грунтов (инженерно-геологических, гидрологических и физико-механических и др.), а также с просчетами и ошибками при изысканиях, проектировании и строительстве сооружения [5,14, 38, 39].

Деформации сооружений характеризуется параметрами, показанными на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Оценка деформаций сооружений и ее параметры

Расчеты параметров оценки производятся по формулам [66], которые представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Оценка деформации, ее параметры и формулы расчета горизонтальных и вертикальных перемещений зданий и сооружений

Параметры оценки деформаций	Расчетные формулы
Абсолютная или полная осадка $S$	$S = H_{\text{нач}} - H_{\text{тек}}$ . Определяется как разность между начальным и текущим циклом наблюдений абсолютных высот
Средняя осадка $S_{\text{ср}}$ (наибольшая и наименьшая)	$S_{\text{ср}} = \frac{(s_1 + s_2 + \dots + s_n)}{n}$ . Определяется как отношение суммы осадок ко всем $n$ его точкам. Вместе со средней осадкой показывают $\max$ и $\min$ осадки точек сооружения, чтобы дать полную характеристику.
Неравномерность осадок $\Delta S_{1,2}$	Определяется как разность двух точек, например 1 и 2. $\Delta S_{1,2} = s_2 - s_1$
Относительная неравномерность осадки $K$ (относительный крен)	$K = \frac{s_2 - s_1}{l}$ . Это величина крена, вычисленная между точками 1 и 2, если расстояние $l$ - задано.
Горизонтальное перемещение отдельной точки $q$	$q_x = x_{\text{тек}} - x_{\text{нач}}$ ; $q_y = y_{\text{тек}} - y_{\text{нач}}$ , где $q$ – горизонтальное перемещение отдельной точки сооружения. Находится как разность координат, которая получается из текущего и начального циклах наблюдений.

Продолжение таблицы 1.1

Относительный прогиб	$\frac{f}{L} = \frac{2s_2 - s_1 - s_3}{2L}$ Это отношение длины прогиба или выгиба участка (например, фундамента) к длине $L$ изгибаемого участка сооружения. В формуле $s_1$ и $s_3$ - это осадки начала и конца рассматриваемого участка сооружения, а $s_2$ - это точка в центре того же участка (в центре всегда наибольшая осадка).
Средняя скорость деформации $v_{\text{ср}}$ , (среднемесячная, среднегодовая)	$v_{\text{ср}} = \frac{s_j - s_i}{t}$ Средняя скорость осадки находится по формуле отношения разности осадок между двумя циклами $j$ и $i$ к конкретному промежутку времени $t$ . Различают среднемесячную скорость (где $t$ – число месяцев) и среднегодовую (где $t$ – число лет).

Чтобы определить плановые (горизонтальные) перемещения применяются способы линейно-угловых измерений и боковое нивелирование [66, 71].

В свою очередь, при определении деформаций сооружений и их отдельных элементов (например: опорный контур, элементы перекрытия и т.д.) применяются линейно-угловые построения. Этот способ используется в тех случаях, когда наблюдаемые точки располагаются на разных высотах, и они, в свою очередь, практически всегда труднодоступны.

А для контроля поперечных горизонтальных перемещений прямолинейных сооружений и конструкций отдельных элементов применяют способ бокового нивелирования.

В дальнейшем при строительстве сооружений (в зависимости от загруженности территории) дополнительно применяют такие методы определения крена наземной части сооружения [66] как способ координат и наклонного проектирования.

Основными методами определения вертикальных деформаций (перемещений) сооружений являются геометрическое и тригонометрическое нивелирование [27].

На атомных станциях [44, 97, 99] определяют осадки сооружений, а также крены дымовых труб (через трубу выводятся радиоактивные инертные газы, которые не улавливаются установленными фильтрами. А большие размеры трубы,

предназначены для того, чтобы как можно дальше от станции и как можно в большей площади атмосферы рассеять эти газы и обеспечить их медленное осаждение, которые пока опустятся, успевают в основном распасться).

Наиболее ответственным объектом наблюдений является главный корпус АЭС (каждый энергоблок размещается в отдельном здании). К главному корпусу примыкает реактор. Большинство операций в нем, например, загрузка ядерного топлива, выполняют автоматы (роботы). Неравномерные осадки, перекося могут привести к нарушению их работы.

### 1.3.4 Определение осадок тригонометрическим нивелированием

Согласно [27] определение осадок выполняется такими методами, как нивелирование (геометрическое, тригонометрическое или гидростатическое) и фотограмметрии. Выбор метода выполняется согласно классам точности измерения (например, для тригонометрического нивелирования принимают II - IV классы точности).

Как отмечается в [27], измерение вертикальных перемещений методом тригонометрического нивелирования следует выполнять короткими визирными лучами (до 100 м), а допускаемые погрешности измерения расстояний и вертикальных углов в зависимости от выбранного класса точности измерений приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Допустимые погрешности измерений расстояний и вертикальных углов при тригонометрическом нивелировании

Класс точности измерений	Допустимая погрешность измерений			
	$d$ (мм), при значениях $v$ (градусы)		$v$ (сек), при их значениях (градусы)	
	до 10	св. 10 до 40	до 10	св. 10 до 40
II	7	1	2,5	1,5
III	15	3	5,0	3,0
IV	35	8	12,0	10,0

В геодезии для вычисления превышения  $h$  из одностороннего тригонометрического нивелирования применяют известные формулы (1.1 и 1.2) [35, 49]:

$$h = d \operatorname{ctg} z + i - l + f \text{ или} \quad (1.1)$$

$$h = d \operatorname{tg} \alpha + i - l + f, \quad (1.2)$$

где  $d$  – расстояние (горизонтальное проложение);  $z$  – зенитное расстояние;  $\alpha$  – угол наклона;  $i$  – высота прибора;  $l$  – высота визирной цели;  $f$  – совместная поправка влияние кривизны Земли ( $K$ ) и рефракции ( $r$ ).

В настоящее время тригонометрическое нивелирование, выполненное электронными тахеометрами, широко используется при наблюдениях за осадками инженерных сооружений. В прошлом применение тригонометрического нивелирования было не так распространено, так как не было технической возможности измерить расстояния до исследуемых объектов с необходимой точностью, тогда производили наблюдения с постоянных станций [43, 45].

В работе [82] были проведены полевые экспериментальные исследования по определению точности превышений ( $h > 3\text{ м}$ ), полученных из тригонометрического нивелирования: на отвесной стене было закреплено двенадцать визирных целей ( $\max$  превышение составило 49,8 м). С помощью теодолита *Theo 010* было выполнено нивелирование способом из середины при длине плеч около 70 м. Максимальная средняя квадратическая погрешность самого большого превышения была 0,8 мм. Точность определения превышений характеризовалась погрешностью 0,13 мм (это по внутренней сходимости). После натурных исследований автор предлагает одинаково ставить прибор (то есть в плане и по высоте) в каждом последующем цикле наблюдений именно при определении превышений  $\geq 1$  м.

Еще в 1970 г в МИИГАиКе [83] были выполнены исследования высокоточного тригонометрического нивелирования, которое выполнялось короткими лучами. Исследования проводились в два этапа: в лабораторных условиях и полевых. Первая часть эксперимента, названная лабораторной, заключалась в том, что с помощью теодолита ОТ-02 измерялись зенитные расстояния при визировании на инварную рейку, которая была установлена на расстоянии 30 м от теодолита. По полученным результатам были сделаны выводы, что получить превышение между зафиксированными точками можно с

погрешностью около 0,10 мм, при условии, что длина плеча не превышает 30 м. Полевая часть эксперимента проводилась на открытой местности, работа заключалась в измерении десяти приемами измерения превышений между намеченными визирными точками. Обычная стальная рулетка была закреплена на верху здания, а на другой конец рулетки был прикреплен груз (10 кг). Теодолит ОТ-02 был установлен на бетонной тумбе (расстояние от прибора до рулетки – 41 м). Сравнили результаты превышения из тригонометрического нивелирования с эталонными значениями, и они отличались не более чем на 0,2 мм.

Авторы статьи [85] предложили методику измерения превышений теодолитом с длиной визирного луча 200 мм. Были заданы условия, что погрешность определения осадки не должна превышать 1 мм, а далее был произведен предрасчет точности. Результаты получились следующие: используя теодолит ЗТ2КП были отнивелированы 16 марок, максимальное расстояние от прибора до марки было 8 м, а для теодолита ЗТ5КП – 3 м. Видно, что ограничение по расстоянию значительно затрудняет применение предложенной методики.

До изобретения электронных тахеометров тригонометрическое нивелирование не достигало широкого распространения в строительстве, так как этот метод имеет меньшую точность чем геометрическое нивелирование, поэтому невозможно было достичь требуемой точности при определении осадок зданий и сооружений.

На сегодняшний день, с внедрением современных геодезических приборов в производство действующие нормативные документы разрешают использовать тригонометрическое нивелирование для развития высотного обоснования, при инженерно-геодезических изысканиях и для определения осадок оснований сооружений, расположенных в труднодоступных местах.

В дополнении к вышесказанному, применение современных электронных тахеометров позволило заметно упростить методику выполнения нивелирования при наблюдениях за осадками сооружений [9, 56, 58, 59].

Авторы работы [98] на экспериментальном примере сделали вывод, что при выполнении тригонометрического нивелирования короткими лучами с

применением высокоточных тахеометров возможно получить превышение с погрешностью не более 0,15 мм на станции при небольших углах наклона.

В статье [41] авторами была приведена классификация разрядов тригонометрического нивелирования, которая может в принципе где-то сравниться с классами геометрического нивелирования.

Как было сказано выше, что одним из недостатков метода тригонометрического нивелирования при определении превышений на станции с большими углами наклона возникает необходимость одинаковой установки прибора, как в плане, так и по высоте для каждого цикла наблюдений. Для исключения данного недостатка, автор [10] предлагает осадочные марки закреплять примерно на уровне высоты прибора, тогда это позволит добиться точности определения превышений при длине плеча до 10 м в пределах 0,5 мм.

В нормативном документе [67] говорится, что возможно применение тригонометрическое нивелирование при наблюдениях за осадками зданий и сооружений на ряду с классическим нивелированием (например, геометрическое или гидростатическое), но все эти методы применяются при разных условиях наблюдения.

При этом измерение вертикальных перемещений методом тригонометрического нивелирования рекомендуется проводить короткими визирными лучами (до 100 м). Однако, как показывает практика, при проведении работ на строительной площадке расстояния от тахеометра до визирных целей часто превышают 100 м, используется при этом, как правило, одностороннее тригонометрическое нивелирование. В качестве визирных целей в большинстве случаев используются отражательные пленки (ОП) или отражатели с креплением к поверхности. Поэтому очень важно провести оценку точности тригонометрического одностороннего нивелирования при длине луча до 200 м.

### **1.3.5 Учет влияния вертикальной рефракции при выполнении тригонометрического нивелирования**

В основном все геодезические и специальные инженерные задачи, выполняемые в приземном слое атмосферы, решаются посредством высокоточных измерений [26, 61, 94, 110]. А приземной слой атмосферы, в свою очередь представляет собой неоднородную по плотности среду. Лучи света распространяются в воздушной среде и, безусловно, испытывают его воздействие. Искривление траектории распространения световых волн, проходящие различные слои атмосферы различной плотности, искажают угловые измерения. Основной составляющей пространственной рефракционной кривой является ее проекция на вертикальную плоскость, которую называют вертикальной рефракцией [63]. В свою очередь, плотность среды характеризует показатель преломления, который в приземном слое воздуха зависит от температуры, давления и влажности.

Во многих источниках, а также в работе [22] дана классификация рефракции, которая делится на линейную рефракцию (это когда изменяется скорость распространения электромагнитного излучения при изменении показателя преломления) и угловую рефракцию (это когда на протяжении всего пути луч неоднократно меняет свое направление из-за неоднородной атмосферы и представляет собой кривую, которая называется рефракционной кривой).

Из приведенных определений можно сделать вывод, что линейная рефракция влияет на точность линейных измерений, а в следствии угловой рефракции возникают погрешности в результатах угловых измерений.

Наибольшее количество работ по этому поводу и исследований приходится на XX век. Тщательные исследования рефракции, начавшиеся еще в 30-х годах, продолжают до сих пор. Предложения некоторых исследователей и авторов имеют более фундаментальный [40, 63, 68, 69, 70, 80, 86, 112] или прикладной [21, 33, 34, 55, 74, 77, 79, 109, 114, 116] характер.

Введение коэффициента, независимого от длины и высоты луча, привело бы к исключению атмосферного влияния на измерения превышений.

Известно, что коэффициентом рефракции  $k$  называют отношение радиуса Земли  $R$  к радиусу световой кривой  $R_c$  и находится как соотношение (1.3) [77]:

$$k = \frac{R}{R_c} . \quad (1.3)$$

При  $k = const$  проблема вертикальной рефракции была бы решена. Действительно, влияние кривизны Земли  $K$  на превышения определяется простой формулой (1.4) [77]:

$$K = \frac{d^2}{2R} , \quad (1.4)$$

и если  $k = const$  и известно (например,  $k = 0,145$ ), тогда влияние вертикальной рефракции на превышения (при  $k = const = 0,145$ ) находится по формуле (1.5) [77]:

$$r = 0,145 \cdot K . \quad (1.5)$$

В настоящее время, анализируя формулы (1.3), (1.5), доказано, что о едином коэффициенте рефракции не только для государства, но и для отдельного участка работ не может быть и речи [77]. Коэффициент рефракции изменяется в пределах от +6 до -6. С некоторым приближением можно вести речь о едином коэффициенте только для нормальной (безразличной) стратификации атмосферы. Такое состояние длится при ясной погоде утром и вечером, максимум по полчаса, в это время  $k = 0,145$ .

Главным объектом исследования остается аномальная вертикальная рефракция, которая на один-два порядка больше нормальной [77].

Существует два направления определения коэффициента рефракции – классическое и инструментальное [22]. Классическое направление предполагает уменьшение влияния рефракции на геодезические измерения путем привлечения данных метеоэлементов в приземном слое воздуха (например, метеорологических способ). Метеорологический способ определения коэффициента рефракции подразумевает измерение температуры воздуха (с помощью датчиков, установленных на разных высотах над землей), атмосферного давления и влажности воздуха. Инструментальное направление включает аппаратные методы учета влияния рефракции (например, геодезический способ). В данной

работе метеорологический способ не применялся, поэтому ниже рассматриваются некоторые моменты определения коэффициентов рефракции только геодезическим способом.

Геодезический метод учета вертикальной рефракции предполагает вычисление рефракции проводить по результатам геометрического и тригонометрического нивелирования.

В выражениях (1.1 и 1.2) есть поправка  $f$  за совместное влияние кривизны Земли ( $K$ ) и рефракцию ( $r$ ), которая вычисляется по формуле (1.6) [35]:

$$f = \frac{1-k}{2R} d^2. \quad (1.6)$$

Значения  $K$  вычисляется по формуле (1.4), а  $r$ , в свою очередь, можно записать как (1.7), выразив ее из формулы (1.6):

$$r = \frac{d^2 k}{2R}. \quad (1.7)$$

Для определения коэффициента рефракции при больших расстояниях авторы [19] предлагают способы по измеренному углу наклона между двумя точками, разность высот и расстояние между которыми известны с достаточной точностью или по одновременным взаимным измерениям углов наклона.

Однако, на практике в тригонометрическом нивелировании для больших расстояний прямое и обратное направления неодновременно наблюдать невозможно.

Помимо измеряемых величин (аргументов), которые непосредственно участвуют в определении коэффициентов рефракции, а значит и поправки за рефракцию, на ее величину влияют и внешние факторы: тип подстилающей поверхности, время года и суток, географическое положение района работ, направление и скорость ветра, облачность, осадки. Кроме того, как было приведено выше, величина рефракции еще очень зависит от длины и высоты прохождения визирного луча. Таким образом, делаем вывод, что результат определения рефракции в данный момент будет актуальным только на данный момент и для данной местности. Однако, проанализировав результаты многочисленных

экспериментов [21, 34, 35, 40, 52, 53, 54, 70, 78], которые были проведены в различных условиях (погодные, специфика местности, величины расстояний и углов визирования), можно все-таки найти хоть и косвенные, но все же общие закономерности влияния вертикальной рефракции на результаты превышения, полученных из тригонометрического нивелирования.

Главным объектом исследования остается аномальная вертикальная рефракция (проблема определения нормальной рефракции решается и рассмотрена выше). Аномальная рефракция на один-два порядка больше нормальной [77].

Авторами статьи [40] установлено, что на угловые величины рефракции влияют не средние высоты луча над земной поверхностью, а средние весовые. Ими было введено понятие эквивалентной высоты  $h_{\text{экв}}$ , зная которую, можно определить  $\gamma$ -градиент температуры на любой высоте по формуле (1.8) [40]:

$$\gamma = \frac{\gamma_1}{h_{\text{экв}}}, \quad (1.8)$$

где  $\gamma_1$  - градиент температуры на высоте 1 м, который всегда можно измерить.

Казалось бы, проблема определения  $\gamma$  во множестве точек решена, но в один и тот же момент градиент температуры над различными подстилающими поверхностями – разный, а значит формулы А.А. Изотова и Л.П. Пеллинина [40] дают приблизительный результат [77].

Более 50 лет львовская школа рефракции вела исследования в этой области и достигла определенных успехов, прежде всего, изучая именно турбулентные колебания фазы визирных целей. К львовской школе рефракции относятся следующие ученые: Моторный А. Д., Мигаль М. К., Маслич Д. И., Островский А. Л., Дрок М. К., Мороз А. И. и др.

Ниже приведены некоторые результаты натурных исследований по определению коэффициента рефракции и поправки за рефракцию:

– суточное колебание коэффициента рефракции (от +0,12 до +0,28) во время прохождения луча над полем аэропорта на высоте 160 м и примерно такие же результаты (от +0,16 до +0,26) на высоте 650 м над травой и кустарниками [3];

– положительные ошибки за рефракцию достигают наибольшей величины при восходе и заходе солнца, а отрицательные - в близполуденные часы. Амплитудные колебания ошибок рефракционного происхождения в отдельные дни достигает величины 40 – 45" [35];

– ошибки за рефракцию по своей абсолютной величине больше при ясной погоде, чем при пасмурной, однако при увеличении облачности ошибки за рефракцию, а, следовательно, и коэффициенты рефракции уменьшаются по абсолютной величине лишь на 10 - 20% [35];

– коэффициенты рефракции в течение дня изменяется в больших пределах как при ясной, так и при пасмурной погоде, и в течение большей части дня имеет знак минус [35];

– при поднятии штатива с высоты 1,5 м на 3 м уменьшаются ошибки за рефракцию приблизительно на 20 - 30% [35].

Из выполненного анализа влияния внешних условий при выполнении тригонометрического нивелирования в приземном слое атмосферы можно сделать следующие выводы:

– желательно делать высоту визирного луча над подстилающей поверхностью как можно больше, путем повышения высоты инструмента (не ниже 1,5м), визированием на высокие цели и грамотным проектированием ходов;

– считать благоприятным временем измерений в течение дня периоды с отчетливым изображением и когда Солнце находится на высоте около  $15^\circ$  над горизонтом. На этой высоте Солнце бывает в летнее время примерно за 3 часа до захода и через 3 часа после восхода. В летнее время в средних широтах лучшее время (с 9 до 17 часов) для измерения вертикальных углов.

– разделять приёмы измерения вертикальных углов промежутками времени около 0,5-1ч, это необходимо сделать для того, чтобы приблизить измерения к некоторым средним условиям дня. Такая методика призвана компенсировать в известной мере погрешности, получающиеся из-за изменений коэффициента рефракции;

– считать благоприятными условиями для наблюдений периоды сплошной облачности и пасмурную погоду.

В заключение можно сказать, что исследований по учету вертикальной рефракции – основного фактора, влияющего на точность тригонометрического нивелирования на длинные расстояния достаточно, а на короткие расстояния для условий строительства и эксплуатации объектов не много.

#### 1.4 Выводы по главе 1

1. Рассмотрена характеристика особо опасных и технически сложных объектов, показано, что АЭС относятся к этой группе объектов. Кратко описаны общие сведения об атомных электростанциях: классификация, принцип работы, преимущества и недостатки.

2. Анализ требований к точности геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ЛАЭС-2 показал: а) при создании разбивочной сети величины средних квадратических погрешностей принимались: при измерении углов – 3", при измерении линий –  $\frac{1}{25000}$ ; б) при выносе в натуру основных или главных разбивочных осей средние квадратические погрешности составляли: измерения углов – 20", измерения линий –  $\frac{1}{5000}$ . Погрешность измерений в процессе геодезического контроля точности геометрических параметров сооружений не превышала допуска по строительным нормам и правилам, а именно 0,2 величины отклонений. А так как ЛАЭС-2 строился на глинистых грунтах и учитывая, что эксплуатация современных АЭС около 50 лет, то можно заключить, что это II класс точности при измерении и контроле деформаций на данном объекте.

3. Проанализирован состав проекта производства геодезических работ (ППГР), который необходим при строительстве особо опасных и технически сложных объектов (например, АЭС). Однако, в действующих нормативных

документах в составе ППГР нет такого пункта, как проектирование разбивочных сетей.

4. Приведен анализ геодезических работ при строительстве ЛАЭС-2, а именно создание разбивочной сети, разбивочные работы, контроль качества строительства, контроль деформаций сооружений и его частей.

При разбивочных работах представлена методика способов выноса в натуру с помощью электронного тахеометра (полярный способ, обратная засечка, метод свободного стационарирования).

В производстве геодезических работ в строительстве широко применяется способ свободного стационарирования, который состоит из определения положения точки стояния прибора обратной засечкой, а затем нахождение координат определяемой точки полярным способом. Этот способ имеет ряд преимуществ, а именно:

- установкой прибора в любом месте, удобном для дальнейшего наблюдения;
- исключением ошибок за центрирование, так как нет необходимости закреплять точку стояния прибора на местности;
- отсутствием необходимости обеспечения видимости между станциями наблюдения.

Таким образом, можно сделать вывод, что способ свободного стационарирования для создания внешней и внутренней разбивочных сетей, проведения разбивочных работ, наблюдениями за осадками наверняка является самым распространенным в геодезическом производстве. Однако, при этом следует отметить, что требования к проведению перечисленных работ способом свободного стационарирования в нормативных документах отсутствуют.

5. Выполнен анализ методов переноса в плане разбивочной сети с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты (в том числе и с помощью приборов вертикального проектирования).

Метод вертикального проектирования при использовании приборов вертикального проектирования (в том числе, лазерных). Однако, следует заметить, что через технологические отверстия в условиях строительной площадки

проникает много мусора, что затрудняет выполнение работ, а также наличие технологических отверстий ведут к ослабеванию плит перекрытия.

6. Исследован вопрос применения спутниковой аппаратуры для создания геодезической разбивочной основы при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. В связи с загруженностью строительной площадки при построении геодезической разбивочной основы возникают ситуации, когда невозможно установить спутниковую аппаратуру над центром пункта. А также, в условиях строительства практически невозможно работать спутниковой аппаратурой (в связи с полным или частичным скрыванием небесной сферы и поэтому, отсутствием сигнала), поэтому возникает задача приведения спутниковых измерений к центрам пунктов.

7. Проанализированы вопросы определения деформаций тригонометрическим нивелированием. При внедрении электронных тахеометров в геодезическое производство они стали основными приборами для геодезического сопровождения строительства. Эти приборы используются, в том числе, и для определения превышений тригонометрическим нивелированием и при определении осадок для строительства и эксплуатации зданий и сооружений. При определении вертикальных перемещений используется тригонометрическое нивелирование с длиной визирного луча до 100 м, но в практике используют и длины визирного луча и более 100 м, поэтому необходимо оценить применение тригонометрического нивелирования для определения вертикальных перемещений при длине луча 200 м.

8. Выполнен анализ учета влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования. Учет вертикальной рефракции выполняется путем введения в память электронного тахеометра коэффициента рефракции, который может изменяться от  $-6$  до  $+6$ . Поэтому необходимо проанализировать определение коэффициента рефракции геодезическими методами и его учета для расстояний от электронного тахеометра до визирных целей до 200 м.

## ГЛАВА 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1 Постановка задачи

На основе проведенного анализа современного состояния производства геодезических работ при строительстве и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов, выполним постановку основных задач исследований, которые будут рассмотрены в данной работе:

- обосновать требования к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты;

- усовершенствовать способы проектирования внешней и внутренней разбивочной сети при строительстве АЭС;

- модернизировать методы создания внутренней плановой разбивочной сети перенесением на монтажные горизонты особо опасных и технически сложных объектов способом свободного стационарирования;

- разработать алгоритм выполнения оценки точности точки стояния электронного тахеометра способом свободного стационарирования;

- предложить методику приведения спутниковых измерений к центрам пунктов с оценкой точности координат и элементов центрировки;

- оценить возможность введения поправок за уклонение отвесной линии в угловые и высотные измерения при приведении спутниковых измерений к центрам пунктов;

- предложить способ создания вертикального базиса для определения коэффициента вертикальной рефракции в условиях «реального времени»;

- обобщить способы определения коэффициента вертикальной рефракции геодезическими методами;

- разработать методику определения коэффициента рефракции на вертикальном базисе.

## **2.2 Обоснование требований к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты**

На стадии строительства точность исходной геодезической основы определяется требованиями нормативных документов системы геометрической точности в строительстве [87 - 91, 93]. При создании разбивочной основы существенную роль играет точность взаимного положения ее пунктов и значительно меньшую роль – точность определения координат относительно исходной геодезической основы. Это объясняется тем, что точность взаимного положения пунктов плановой геодезической основы определяет точность взаимного расположения отдельных сооружений на строительной площадке.

С 25.04.2018 г. для выполнения геодезических работ в строительстве действуют СП 126.13330.2017 [89], в данном документе предполагается следующий состав работ: создание геодезической разбивочной основы для строительства, создание внутренней разбивочной сети, разбивочные работы, геодезический контроль точности геометрических параметров возводимых конструкций зданий (сооружений) и мониторинг деформаций. В данном составе нет четкого разделения разбивочных сетей на внешнюю и внутреннюю как в предыдущем нормативном документе [92], но в пункте 4.11.3 [89] есть только упоминание о размещении знаков внешней геодезической основы. В СП 126.13330.2012 предлагалось создавать внешнюю разбивочную сеть здания (сооружения) в виде геодезической сети, пункты которой закрепляют на местности основные (главные) разбивочные оси, а также углы здания (сооружения), образованные пересечением основных разбивочных осей. Автор диссертационной работы предлагает создавать внешнюю разбивочную сеть для построения внутренней разбивочной сети.

Хотя в действующем нормативном документе [89] утверждается, что внутренняя разбивочная сеть должна создаваться на каждом последующем монтажном горизонте для возведения зданий и сооружений от знаков разбивочной сети на исходном горизонте, но соблюсти такое требование не всегда возможно.

Передачу точек плановой внутренней разбивочной сети здания (сооружения) с исходного на монтажный горизонт следует выполнять методами наклонного, вертикального проектирования (проецирования) или с использованием приборно-инструментальных комплексов *ГЛОНАСС/GPS* в зависимости от высоты здания (сооружения) и его конструктивных особенностей.

Так при строительстве реакторного блока ЛАЭС-2 не было предусмотрено наличие технологических отверстий для использования метода вертикального проектирования при передачи внутренней разбивочной сети с исходного на монтажные горизонты, а спутниковой аппаратурой не всегда возможно пользоваться в связи с трудностями получения сигналов на застроенной территории.

Местоположение пунктов внешней разбивочной сети следует выбирать с учетом сохранности и устойчивости его знаков на весь период строительства. Тип знаков приводится в СП 126.13330.2017 в Приложение Г.

В данной работе ниже будет предложен способ создания внутренней разбивочной сети для возведения сооружения на примере реакторного блока АЭС без переноса ее с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты на основе использования способа свободного стационарирования, но в начале необходимо выполнить предрасчет точности построения внешней разбивочной сети, исходя из требований построения внутренних разбивочных сетей.

В нормативном документе [89 таблица 7.1] для построения внутренней разбивочной сети дана предельная погрешность взаимного положения габаритных осей, выносимых в натуру зданий и сооружений в плане  $\Delta = 5$  мм.

Представим обобщенную таблицу алгоритма обоснования требований к точности геодезических работ (рисунок 2.1).

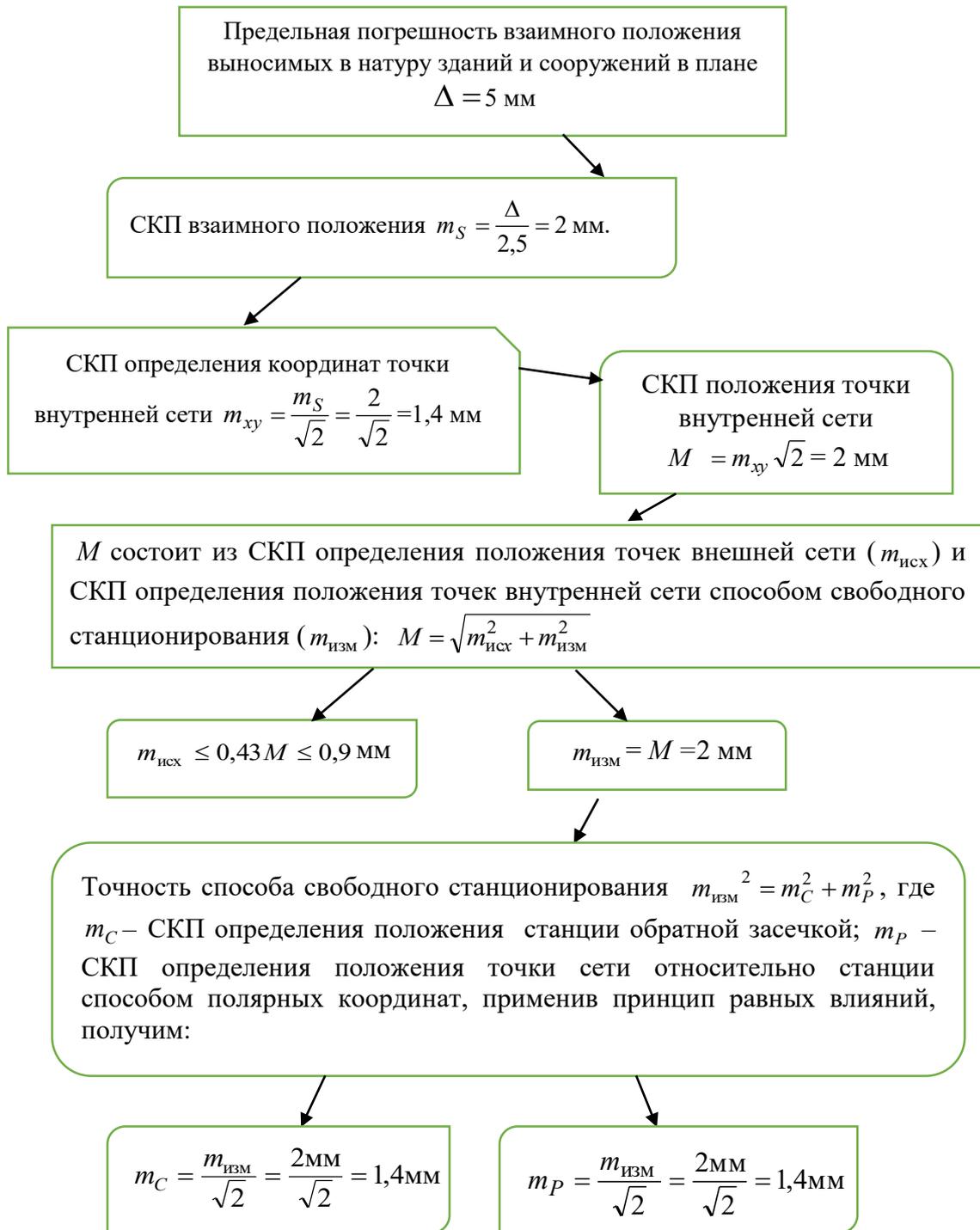


Рисунок 2.1 – Алгоритм обоснования требований к точности производства геодезических работ

Раскроем особенности данного алгоритма (рисунок 2.1) ниже.

### Переход от предельной погрешности к СКП взаимного положения точек

Перейдем от предельной погрешности к средней квадратической погрешности взаимного положения выносимых в натуру зданий и сооружений в

плане ( $m_s$ ), применив коэффициент 2,5, тогда  $m_s = \frac{\Delta}{2,5} = 2$  мм.

### Вычисление СКП положения точки внутренней сети

СКП взаимного положение точек выражается формулой (2.1) [49]:

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (2.1)$$

В общем виде СКП взаимного положения точек можно представить (2.2):

$$m_s = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial x_1}\right)^2 m_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial x_2}\right)^2 m_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y_1}\right)^2 m_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y_2}\right)^2 m_{y_2}^2}. \quad (2.2)$$

Найдем частные производные по всем аргументам функции (2.3):

$$\left(\frac{\partial S}{\partial x_1}\right) = -\frac{x_2 - x_1}{S}; \quad \left(\frac{\partial S}{\partial x_2}\right) = \frac{x_2 - x_1}{S}; \quad \left(\frac{\partial S}{\partial y_1}\right) = -\frac{y_2 - y_1}{S}; \quad \left(\frac{\partial S}{\partial y_2}\right) = \frac{y_2 - y_1}{S}. \quad (2.3)$$

Подставив значения частных производных в (2.2) и считая измерения равноточными, а значит  $m_{x_1} = m_{x_2} = m_{y_1} = m_{y_2} = m_{xy}$ , получим СКП взаимного положения точек внутренней сети  $m_s = m_{xy} \sqrt{2}$ , следовательно, СКП определения координат точки  $m_{xy} = \frac{m_s}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1,4$  мм. Далее найдем погрешность положения точки как  $M = m_{xy} \sqrt{2} = 2$  мм.

### Вычисление СКП определения положения точек внешней сети и СКП определения положения точек внутренней сети способом свободного стационарирования

Создание внутренней разбивочной сети предполагается вести от пунктов внешней разбивочной сети способом свободного стационарирования, значит погрешности пунктов внутренней разбивочной сети определяются относительно исходных пунктов внешней сети. Тогда СКП положения точек внутренней сети ( $M$ ) с учетом СКП определения положения точек внешней сети ( $m_{исх}$ ) и СКП

определения положения точек внутренней сети способом свободного стационарирования ( $m_{\text{изм}}$ ) примет вид (2.4) [45]:

$$M = \sqrt{m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{изм}}^2}. \quad (2.4)$$

Принято считать, что если доля в общей погрешности не превышает 5-10 %, то ей можно пренебречь [49]. Поэтому можно принять, что погрешности исходных пунктов не учитывать, если разность  $M$  и  $m_{\text{изм}}$  будет меньше или равна  $\varepsilon M$  (2.5), где  $\varepsilon = 0,05 - 0,1$ , т.е.

$$M - m_{\text{изм}} \leq \varepsilon M. \quad (2.5)$$

Преобразуем формулу (2.5) и найдем  $m_{\text{исх}}$  по формуле (2.6) [49]:

$$m_{\text{исх}}^2 \leq \varepsilon(2 - \varepsilon)M^2. \quad (2.6)$$

При  $\varepsilon = 0,1$  будем иметь  $m_{\text{исх}} \leq 0,43M$ , т. е.  $m_{\text{исх}} \leq 0,86$  мм, а это пренебрегаемо мало по сравнению с погрешностями измерений, тогда будем считать  $m_{\text{изм}} = M = 2$  мм, т. е. положение пунктов внешней разбивочной сети необходимо получать с точностью 2 мм. И положение пунктов внутренней разбивочной сети, как было обосновано ранее тоже с точностью 2 мм.

Так как предложено внутренние разбивочные сети создавать способом свободного стационарирования, то точность этого способа будет определяется по формуле (2.7):

$$m_{\text{изм}}^2 = m_C^2 + m_P^2, \quad (2.7)$$

где  $m_C$  – СКП определения положения станции обратной засечкой;  $m_P$  – СКП определения положения точки сети относительно станции способом полярных координат.

### **Вычисление СКП положения электронного тахеометра**

Применим принцип равных влияний на основе формулы (2.7), тогда

$$m_C = m_P = \frac{m_{\text{изм}}}{\sqrt{2}} \quad \text{или} \quad m_C = m_P = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1,4 \text{ мм.}$$

Значит, можно сделать вывод, что определение положения станции обратной засечкой и точки сети относительно

станции способом полярных координат необходимо определять с СКП не более 1,4 мм.

В способе свободного стационарирования положение точки стояния электронного тахеометра может быть вычислено как по необходимому составу измерений, так и по методу наименьших квадратов.

Рассмотрим различные варианты оценки точности. Для этого создадим схему (рисунок 2.1) способа свободного стационарирования, в которой точки 1, 2, 3 - пункты внешней сети; положение станции (т. С) может быть определено прямой угловой, обратной угловой, линейной и другими засечками, а положение (т. Р) определяемой точки (точка внутренней сети) – полярным методом. Объединим схемы засечек и представим их в обобщенном виде на рисунке 2.2.

### 1. Оценка точности по необходимому составу измерений

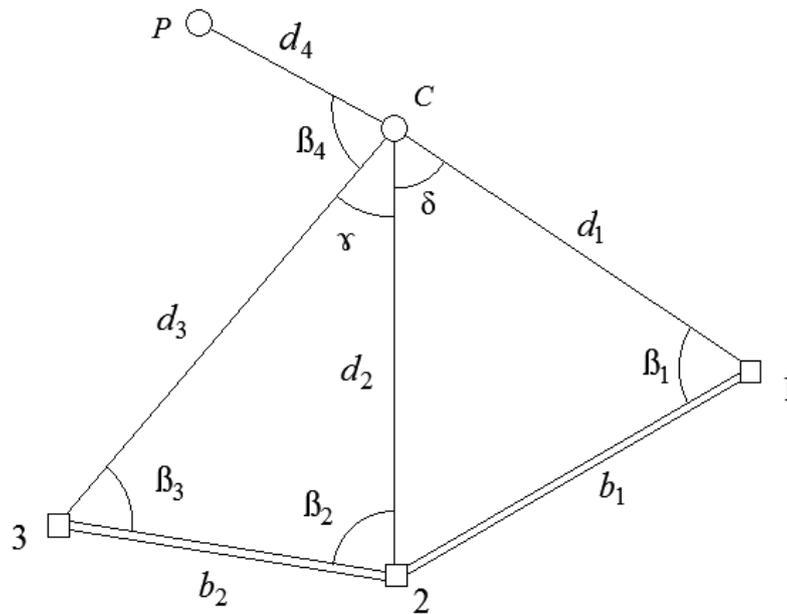


Рисунок 2.2 – Схема засечек

Известные формулы оценки точности [47] и числовые примеры приведены ниже.

1. *Прямая угловая засечка.* Исходными являются пункты 2 и 3, измерены углы  $\beta_2$  и  $\beta_3$ , тогда  $m_C = \frac{m_\beta}{\rho \sin \gamma} \sqrt{d_2^2 + d_3^2}$ , где  $m_\beta$  – СКП измерения угла;  $\rho = 206265''$  – число секунд в одном радиане;  $\gamma$  – угол засечки;  $d_2, d_3$  –

горизонтальные проложения от исходных пунктов до точки стояния  $C$ . При  $m_\beta = 1''$  и  $\gamma = 79^\circ 15' 25''$ ,  $d_2 = 168,672$  м,  $d_3 = 190,343$  м, получим  $m_C = 1,2$  мм.

2. *Обратная угловая засечка.* Исходными являются пункты 1, 2, 3, измерены углы  $\delta$  и  $\gamma$ , тогда  $m_C = \frac{m_\beta}{\rho \cdot \sin(\beta_1 + \beta_3)} \sqrt{\left(\frac{d_1 d_2}{b_1}\right)^2 + \left(\frac{d_2 d_3}{b_2}\right)^2}$ , где  $b_1$  и  $b_2$  – расстояния между пунктами 1-2 и 2-3. При  $m_\beta = 1''$ ,  $\beta_1 = 46^\circ 12' 10''$ ,  $\beta_3 = 44^\circ 00' 32''$ ,  $d_1 = 241,105$  м,  $d_2 = 168,672$  м,  $d_3 = 190,343$  м,  $b_1 = 193,164$  м,  $b_2 = 229,589$  м, получим  $m_C = 1,2$  мм.

3. *Линейная засечка.* Исходными являются пункты 2 и 3, измерены расстояния  $d_2$ ,  $d_3$ , тогда  $m_C = \frac{m_d \sqrt{2}}{\sin \gamma}$ , где  $m_d$  – СКП измерения расстояний. При  $m_d = 1,5$  мм,  $\gamma = 79^\circ 15' 25''$ , получим  $m_C = 2,1$  мм. Полученная СКП положения станции больше, чем 1,4 мм, поэтому предлагается расстояние измерять три раза, тогда  $m_d = \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 0,9$  мм. Повторный расчет показывает  $m_C = 1,3$  мм.

Выполненные расчеты показывают, что положение станции при использовании высокоточных электронных тахеометров можно определять с ошибкой  $\leq 1,4$  мм даже при необходимом составе измерений.

## 2. Оценка точности положения станции на основе параметрического способа уравнивания

Как известно, уравнивание геодезических измерений выполняется преимущественно по методу наименьших квадратов параметрическим способом, при этом составляются уравнения поправок вида (2.8) [49]:

$$B\delta x + L = V, \quad (2.8)$$

где  $B$  – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок размера  $n \times k$  ( $n$  – число измеренных величин,  $k$  – количество параметров, в данном случае – это число координат пункта, равное 2) ;  $\delta x$  – вектор поправок к приближенным значениям координат станции электронного тахеометра размера  $2 \times 1$ ,  $L$  – вектор

свободных членов параметрических уравнений поправок размера  $n \times 1$ ,  $V$  – вектор поправок к результатам измерений размера  $n \times 1$ .

В формуле (2.8) элементы матрицы  $B$  – это частные производные от измеренных величин по координатам станции. Формулы для их вычисления представлены в таблице 2.1. Измеренными величинами выступают горизонтальные проложения, дирекционные углы, направления, углы и приращения плоских прямоугольных координат.

Элементы вектора свободных членов  $L$  в формуле (2.8) – это разности между измеренными величинами, которые вычислены по приближенным координатам станции и результатами измерений [49].

Таблица 2.1 – Коэффициенты параметрических уравнений поправок

Измерения	$a$	$b$
Горизонтальные проложения $d$	$\Delta x / d = \cos \alpha$	$\Delta y / d = \sin \alpha$
Дирекционные углы $\alpha$	$-\sin \alpha / d$	$\cos \alpha / d$
Горизонтальные углы $\beta = \alpha_{\text{П}} - \alpha_{\text{Л}}$	$-\sin \alpha_{\text{П}} / d_{\text{П}} + \sin \alpha_{\text{Л}} / d_{\text{Л}}$	$\cos \alpha_{\text{П}} / d_{\text{П}} - \cos \alpha_{\text{Л}} / d_{\text{Л}}$
Направления	$-\sin \alpha / d$	$\cos \alpha / d$
Приращения координат	+1	-1

Решение системы уравнений (2.8) выполняется на основе принципа наименьших квадратов  $V^T P V = \min$ , где  $P$  – весовая матрица.

Системе уравнений (2.8) соответствует система нормальных уравнений неизвестных вида (2.9) [49]:

$$B^T P B \delta x + B^T P L = 0. \quad (2.9)$$

Решение системы (2.9) позволяет найти вектор поправок (2.10) [49]:

$$\delta x = -Q_{xy} B^T P L. \quad (2.10)$$

Обратим внимание, что матрица  $Q_{xy} = (B^T P B)^{-1}$  размера  $2 \times 2$  – это есть обратная весовая матрица уравненных координат пункта. С помощью нее можно

найти средние квадратические погрешности координат точки стояния геодезического прибора по формулам  $m_x = \mu\sqrt{Q_x}$  и  $m_y = \mu\sqrt{Q_y}$ . Тогда СКП положения станции может быть вычислено по формуле  $m_c = \mu\sqrt{Q_x + Q_y}$ . При этом СКП единицы веса  $\mu$  определяется по известной формуле (2.11) [49]:

$$\mu = \sqrt{V^T P V / (n - k)}, \quad (2.11)$$

где  $(n - k)$  – число избыточных измерений.

### 3. Оценка точности с учетом погрешностей исходных данных

Когда встает задача построения геодезических сетей в несколько стадий, или при построении сети путем присоединения к уравненной сети новых участков, необходимо выполнять уравнивание с учетом ошибок исходных данных. При этом для корректного уравнивания важно верно определить весовую матрицу  $P$  по формуле (2.12). Она, как известно [49], равна обратной ковариационной матрице  $K_\Delta$  ошибок  $\Delta_i$  измеряемых величин и равна ковариационной матрице  $K_L$  свободных членов  $K_L$  (2.13) [49]:

$$P = K_\Delta^{-1} = K_L^{-1}. \quad (2.12)$$

$$K_L = K_{\Delta_{\text{изм}}} + \Phi K_E \Phi^T, \quad (2.13)$$

где  $K_E$  – ковариационная матрица ошибок исходных данных,  $\Phi$  – матрица влияния ошибок исходных данных на результаты измерений (она является матрицей частных производных и приведена в таблице 2.2).

Таблица 2.2 – Матрица  $\Phi$  частных производных

Измеряемая величина	$\frac{\partial u}{\partial x_1}$	$\frac{\partial u}{\partial y_1}$	$\frac{\partial u}{\partial x_2}$	$\frac{\partial u}{\partial y_2}$
Направление с определяемого пункта $O$ на твердый пункт $T$	$-\frac{\sin \alpha_{OT}}{d}$	$\frac{\cos \alpha_{OT}}{d}$	–	–
Угол на определяемом пункте $O$ между двумя твердыми: «правым» 1 и «левым» 2	$-\frac{\sin \alpha_{O1}}{d_1}$	$\frac{\cos \alpha_{O1}}{d_1}$	$\frac{\sin \alpha_{O2}}{d_2}$	$-\frac{\cos \alpha_{O2}}{d_2}$
Расстояние от определяемого пункта $O$ до твердого пункта $T$	$\cos \alpha_{OT}$	$\sin \alpha_{OT}$	–	–

Уравнивание и оценка точности выполняются по алгоритму, приведенному выше. Надо отметить, что в результате уравнивания поправки получают и исходные пункты, но ими можно и пренебрегать.

#### 4. Примеры расчета оценки точности положения точки стояния электронного тахеометра по результатам уравнивания

Для определения СКП положения точки стояния тахеометра ( $m_C$ ), координаты которой получены способом линейно-угловой засечки, были проведены полевые экспериментальные исследования [103]. Измерения горизонтальных углов и расстояний выполнялись электронным тахеометром Leica Viva TS 16 M R500 с СКП измерения углов  $1''$  и расстояний  $(2 \text{ мм} + 2 \times 10^{-6} \times d)$ , где  $d$  – измеренное расстояние в мм.

На схеме (рисунок 2.3) представлены результаты измерений и координаты исходных пунктов для определения положения точки  $C$ .

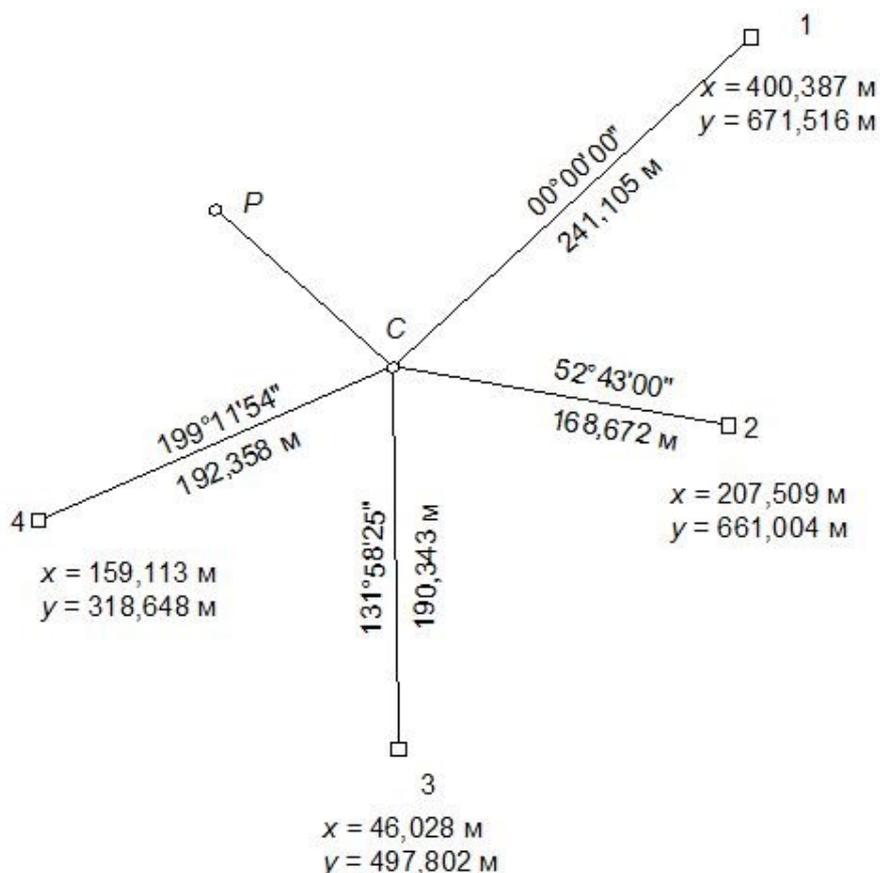


Рисунок 2.3 – Схема сети

*Оценка точности без учета ошибок исходных данных*

При определении координат определяемой точки  $C$  (рисунок 2.3) без учёта ошибок исходных данных после уравнивания параметрическим способом по формулам (2.8 – 2.10) получены координаты  $x_C = 236,349$  м;  $y_C = 494,817$  м.

Положение искомого пункта  $C$  характеризуется ошибками  $m_{x_C} = 0,4$  мм;  $m_{y_C} = 0,5$  мм;  $m_C = 0,6$  мм.

*Оценка точности с учетом ошибок исходных данных*

При определении координат параметрическим способом точки  $C$  (рисунок 2.3) рассмотрен случай наличия корреляционных связей между погрешностями координат  $x$  и  $y$  каждого исходного пункта (при этом корреляционные связи между погрешностями исходных пунктов отсутствуют). Погрешности в положении исходных пунктов характеризуются ковариационной матрицей  $K_E$ :

$$K_E = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 3 \end{bmatrix} \text{ мм.}$$

В соответствии со значениями  $m_\beta = 1''$ ,  $m_d = 2$  мм получена ковариационная матрица результатов измерений  $K_{\text{дизм}}$ , которая имеет размер  $8 \times 8$ .

После того, как была найдена ковариационная матрица свободных членов по формуле (2.13) и обращена по формуле (2.12), получена весовая матрица  $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} 0,327 & 0 & 0 & 0 & 0,022 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,147 & 0 & 0 & 0 & 0,019 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,225 & 0 & 0 & 0 & 0,069 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,212 & 0 & 0 & 0 & -0,025 \\ 0,022 & 0 & 0 & 0 & 0,184 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,019 & 0 & 0 & 0 & 0,177 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,069 & 0 & 0 & 0 & 0,163 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,025 & 0 & 0 & 0 & 0,162 \end{bmatrix}.$$

Выполнено уравнивание параметрическим способом с учетом ошибок исходных данных.

Получена обратная весовая матрица уравненных координат:

$$Q_{xy} = \begin{bmatrix} 0,783 & -0,012 \\ -0,012 & 0,824 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,278 & 0,019 \\ 0,019 & 1,214 \end{bmatrix}.$$

Так же рассчитаны  $\mu = 0,5$ ;  $m_{x_C} = 0,6$  мм;  $m_{y_C} = 0,6$  мм;  $m_C = 0,8$  мм.

### **Вычисление СКП определения положения определяемой точки полярным способом относительно точки стояния прибора**

Отметим, что при выполнении геодезических работ средние квадратические погрешности координат точки стояния тахеометра высвечиваются на панели тахеометра, но при этом не приводятся ошибки координат определяемой точки полярным способом. При вычислении СКП определения положения т. P относительно станции в данном случае (рисунок 2.2) исходными пунктами являются точки 3 и C, расстояние  $d_4$  и угол  $\beta_4$  – измерены, тогда

$$m_P = \sqrt{m_d^2 + d_4^2 \cdot \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}. \text{ При } m_\beta = 1'', m_d = \left(\frac{1,5}{\sqrt{2}}\right) = 1,1 \text{ мм (для повышения точности}$$

линии необходимо измерять 2 раза),  $d_4 = 40$  м, получим  $m_P = 1,1$  мм.

### **Вычисление СКП определения положения точек внутренней сети способом свободного стационарирования**

Как было сказано ранее, если внутреннюю разбивочную сеть создавать способом свободного стационарирования, тогда точность этого способа

определяется по формуле (2.7). Выше были найдены  $m_C$  и  $m_p$ , для удобства вычисления  $m_{изм}$  приведем таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Вычисление СКП  $m_{изм}$

Наименование	$m_C$ (мм)	$m_p$ (мм)	$m_{изм}$ (мм)
Прямая угловая засечка + полярный засечка (при необходимом числе измерений)	1,2	1,1	1,6
Обратная угловая засечка + полярный метод (при необходимом числе измерений)	1,2	1,1	1,6
Линейная засечка + полярный метод (при необходимом числе измерений)	1,1	1,1	1,5
Способ свободного стационарирования (без учета погрешностей исходных данных) + полярная засечка	0,6	1,1	1,2
Способ свободного стационарирования (с учетом погрешностей исходных данных) + полярная засечка	0,8	1,1	1,4

В таблице 2.3 видно, что все вычисленные величины имеют допустимые значения, полученные ранее ( $m_C \leq 1,4$  мм;  $m_p \leq 1,4$  мм, а  $m_{изм} \leq 2$  мм).

Таким образом расчет показал, что при использовании современных высокоточных электронных тахеометров внутренняя разбивочная сеть может быть построена с точностью обоснования 2 мм. При этом, положение станции обратной засечкой и точки сети относительно станции способом полярных координат необходимо определять с СКП не более 1,4 мм.

В дальнейшем в данной работе будем руководствоваться этими расчетами. Выполненный эксперимент показал, что при построении разбивочных сетей способом свободного стационарирования с использованием современных электронных тахеометров возможно достичь заявленную выше точность положения точек сети.

А теперь обратимся к созданию проекта внешней разбивочной сети.

## 2.3 Проектирование внешней разбивочной сети при строительстве реакторного блока АЭС

### 2.3.1 Основные этапы проектирования и развития внешней разбивочной сети

Целью проектирования геодезической сети является выбор такой схемы сети и состава измерений, которая при наименьших затратах труда, денежных средств и времени обеспечит требуемую точность определения уравненных элементов сети.

Последовательность оценки проектов состоит из следующих этапов:

- составление электронной схемы сети с определением исходных и определяемых пунктов и состава измерений;
- назначение средних квадратических погрешностей окончательных значений результатов измерений;
- определение средних квадратических погрешностей оцениваемых величин по методу наименьших квадратов;
- анализ проекта и внесение изменений в необходимых случаях в схему сети, состав измеряемых величин и их СКП.

#### *Составление электронной схемы сети*

Электронная схема сети составляется для того, чтобы определить приближенные координаты пунктов. В связи с этим на схему наносятся исходные и определяемые пункты, а также измеряемые элементы такие как горизонтальные направления (углы), длины сторон, приращения координат и другие. При выборе схемы размещения определяемых пунктов необходимо обратить внимание на удобство выполнения последующих работ.

#### *Назначение СКП окончательных значений результатов измерений*

Для того, чтобы определить веса результатов измерений необходимо назначить СКП тех величин, которые предполагается измерить.

Известно, что вес каждой измеряемой величины вычисляется по формуле  $p = c / m^2$ , где  $c$  можно взять равной квадрату СКП единицы веса  $\mu$ .

Пусть  $\mu = m_\beta$ , где  $m_\beta$  - СКП измерения угла. Так как в используемую компьютерную программу вводятся горизонтальные направления (предполагается, что они являются равноточными измерениями), то  $\mu = m_N$  ( $m_N$  - СКП измерения горизонтального направления).

Тогда в проектируемой сети веса горизонтальных направлений и расстояний, которые планируется измерить, можно вычислить по формулам  $p_N = m_N^2 / m_\beta^2 = 1$ ;  $p_S = m_N^2 / m_S^2$ . СКП измерения направления находится как  $m_N = m_\beta / \sqrt{2}$ .

Если каждую линию измерять прямо и обратно, то погрешность будет находиться как среднее арифметическое из двух измерений, то есть в  $\sqrt{2}$  раз меньше. Например, если взять электронный тахеометр с СКП измерений длин сторон 1,5 мм, то погрешность среднего из двух измерений составит 1,1 мм.

Если предположить независимость результатов измерений, то матрица весов будет иметь диагональный вид (2.14) [49]:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & p_n \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

#### *Определение СКП оцениваемых величин по методу наименьших квадратов*

В первую очередь, вычисляются  $\beta$  и  $d$ , при этом используются координаты исходных пунктов и приближенные координаты определяемых пунктов.

Далее составляются уравнения поправок для каждой измеренной величины. Коэффициенты уравнений поправок представлены в таблице 2.1, а свободные члены будут равны нулю.

В матричном виде при параметрическом способе уравнения поправок находятся по формуле (2.8).

Если матрицу коэффициентов нормальных уравнений найти как  $N = B^T P B$ , а обратную весовую матрицу уравненных координат пунктов вычислить из

соотношения  $Q_{\delta x} = N^{-1} = (B^T P B)^{-1}$ , то обратная весовая матрица уравненных значений измеренных величин выражается как  $Q_{\beta, d} = B(B^T P B)^{-1} B^T$ .

Известно, что диагональными элементами любой обратной весовой матрицы являются обратные веса, поэтому взяв их, и задав априорное значение СКП единицы веса, можно определить СКП уравненных элементов (уравненных координат, уравненных значений измеренных величин) сети, применяя известную формулу (2.15) [49]:

$$m_{\beta, c} = \mu \sqrt{\frac{1}{p_{\beta, c}}}. \quad (2.15)$$

### *Анализ проекта*

Анализ проекта – это сравнение полученных СКП всех элементов сети с погрешностями, которые определены нормативными документами или ППГР. Если эта точность не удовлетворяет заявленным условиям, то необходимо брать геодезический прибор с более высокими точностными характеристиками, либо изменяют геометрию сети, а именно выполнить корректировку числа определяемых пунктов и их местоположения. Это можно достичь такими действиями как увеличение количества измеряемых длин сторон, установки дополнительных связей между пунктами спутниковыми измерениями, введением новых горизонтальных направлений и т.п.

## **2.4 Построение внутренней разбивочной сети способом свободного стационарирования на примере реакторного блока АЭС**

### **2.4.1 Основные этапы проектирования и развития внутренней разбивочной сети**

Как было сказано ранее для построения внутренней разбивочной сети используют способы: микротриангуляции, теодолитных ходов, линейно-угловых измерений.

Самым удобным и распространенным является координатный метод. Это современный вариант линейно-угловых построений с применением электронных тахеометров (включая вычислительные функции прибора). Данный метод может быть применен на всех этапах геодезических работ в строительстве.

При строительстве реакторного блока на ЛАЭС-2 после устройства железобетонной фундаментной плиты, на ее поверхности закрепляются точки пересечения осей строительной сетки (рисунок 2.4).

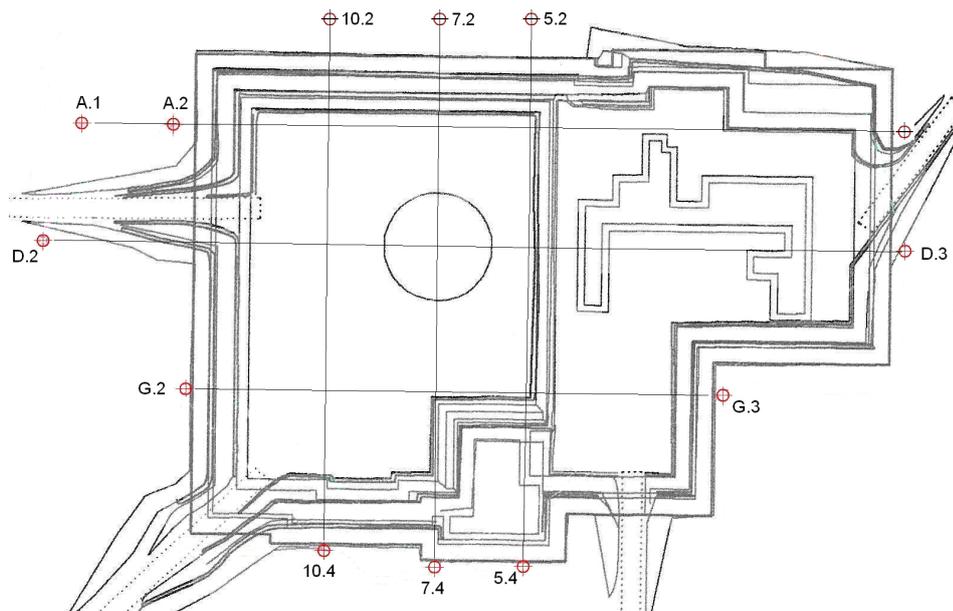


Рисунок 2.4 – Схема создания разбивочной основы нулевого цикла

При создании внутренней разбивочной сети за исходные принимают пункты строительной сетки. На всех вынесенных точках от исходных пунктов, выполняют линейно-угловые измерения. После уравнивания полученных результатов находят окончательные координаты точек.

По мере возведения стен на них крепят отражательные пленки (ОП) в местах, где в дальнейшем будет возможность визирования на них (то есть они не будут перекрыты оборудованием). На каждой стене предлагается крепить ОП примерно на высоте прибора (примерно на высоте  $\geq 1,5$  м). Координаты точек на ОП определяют линейно-угловыми измерениями, выполненными электронным тахеометром.

В дальнейшем на каждом монтажном горизонте создается своя внутренняя сеть, которая будет опираться на пункты внешней сети.

Этапы проектирования и алгоритм оценки проекта выполняется также как и для внешней разбивочной сети, описанные в параграфе 2.3.1. Конкретные данные и анализ проекта внутренней сети будет рассмотрен в главе 3.

#### **2.4.2 Рекомендации по созданию внутренней разбивочной сети без переноса ее с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты**

Ранее было сказано, что передачу плановой сети с исходного на верхние монтажные горизонты производится методом наклонного проектирования через лифтовые шахты или технологические отверстия. Создание этих отверстий приводит к ослаблению плит перекрытия. А также иногда в плитах перекрытия не предусмотрены технологические отверстия. В связи с этим предлагается присвоить внешней сети другой функционал, а именно выполнять передачу плановой сети с исходного на монтажные горизонты от внешних пунктов разбивочной сети, а далее на каждом монтажном горизонте создавать свою сеть способом свободного stationирования с помощью электронного тахеометра.

Для этого пункты внешней сети закрепляют вокруг строительной площадки. Прежде чем приступить к закреплению, необходимо учесть ряд правил, а именно:

1. Пункты внешней сети должны располагаться достаточно равномерно вокруг здания.
2. Для создания внутренней сети на каждом монтажном горизонте пункты внешней сети должны быть видны с самого верхнего монтажного горизонта.
3. Пункты внешней сети должны располагаться в местах, где не будет угрозы их уничтожения строительной техникой.
4. Для выполнения обратной линейно-угловой засечки со всех монтажных горизонтов количество пунктов внешней сети должно быть достаточно.

Место расположения тахеометра выбирается произвольно в соответствии с условиями видимости. Точность обратной линейно-угловой засечки зависит не только от применяемого прибора, но и от конфигурации расположения определяемой точки и исходных пунктов. Поэтому при использовании способа

свободного стационарирования важное значение имеет выбор комбинации опорных пунктов.

Для выноса проектного положения пунктов внутренней разбивочной сети использовать способ полярных координат.

## **.5 Приведение результатов спутниковых измерений к центрам пунктов с использованием элементов центрировки**

### **2.5.1 Приведение внецентренных спутниковых измерений к центрам пунктов на основе использования элементов центрировки и взаимнообратных координатных преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами**

*Определение элементов центрировки при построении плановых геодезических сетей*

При построении сетей определяются линейный  $\ell$  (расстояние между проекциями вертикальной оси геодезического прибора и центра пункта) и угловой  $\theta$  (угол с вершиной в точке  $I$ , измеряемый по ходу часовой стрелки от направления на центр пункта до начального направления) элементы центрировки.

При этом определение элементов центрировки можно выполнять графическим и аналитическим способами [23].

Для определения элементов центрировки можно использовать возможности современных электронных тахеометров [16, 37]. В этом случае на незначительном удалении от центра пункта  $C$  (рисунок 2.5) в точке  $A$  устанавливается электронный тахеометр и с его помощью измеряются горизонтальные проложения  $d_C$ ,  $d_I$  и горизонтальные углы  $\alpha_I$ ,  $\gamma$ . Если установить систему координат с началом в точке  $A$ , а ось  $x$  направить в точку  $C$ , то координаты точек  $C$  и  $I$  будут:  $x_C = d_C$ ,  $y_C = 0$ ,  $x_I = d_I \cos \alpha_I$ ,  $y_I = d_I \sin \alpha_I$ . Очевидно, что линейный элемент центрировки  $\ell = \sqrt{(x_I - x_C)^2 + (y_I - y_C)^2}$ , а угловой  $\theta = 360^\circ - \varepsilon + \alpha_I - \gamma$ , где  $\varepsilon = \arctg(y_I - y_C)/(x_I - x_C)$ . При двухкратных определениях элементов центрировки

с помощью электронного тахеометра СКП  $m_\ell$  и  $m_\theta$  будут:  $m_\ell = m_d$ ,  $m_\theta = (m_d / \ell)\rho$ , где  $m_d$  – СКП измерения расстояния,  $\rho = 206265''$ .

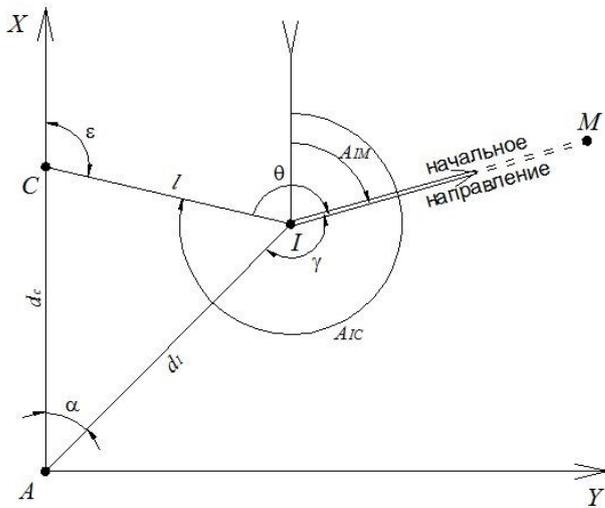


Рисунок 2.5 – Определение элементов центрировки аналитическим путем

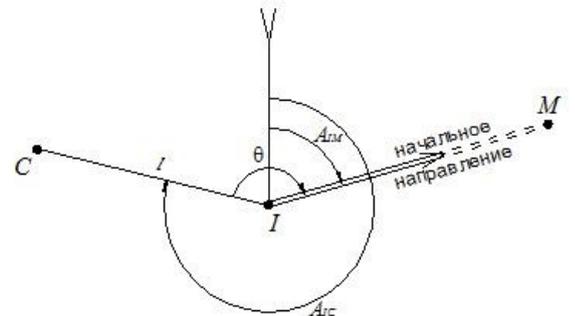


Рисунок 2.6 – Измерение элементов центрировки

Определение элементов центрировки также можно выполнить непосредственно [16, 37], в этом случае электронным тахеометром измеряют с точки  $I$  элементы центрировки: линейный  $l$  и угловой  $\theta$ .

*Приведение к центрам пунктов спутниковых измерений на основе преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами*

Пусть выполнены спутниковые измерения в точках  $I$  и  $M$  (рисунок 2.6) и определены их пространственные геоцентрические экваториальные прямоугольные координаты  $X_I, Y_I, Z_I$  и  $X_M, Y_M, Z_M$ . Это позволит определить геодезический азимут направления  $IM$  по формуле  $\text{tg}A_{IM} = \frac{Y'_M}{X'_M}$  [4], где топоцентрические горизонтные пространственные прямоугольные координаты  $X'_M, Y'_M, Z'_M$  точки  $M$  относительно точки  $I$  находятся по формуле (2.16):

$$\begin{bmatrix} X'_M \\ Y'_M \\ Z'_M \end{bmatrix} = R_I^T \begin{bmatrix} X_M - X_I \\ Y_M - Y_I \\ Z_M - Z_I \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

В формуле (2.16)  $R_I^T$  – транспонированная матрица  $R_I$ . В свою очередь матрица  $R_I$  перехода от топоцентрических к геоцентрическим координатам является функцией (2.17) эллипсоидальных координат  $B_I, L_I$  [4]:

$$R_I = \begin{bmatrix} -\sin B_I \cos L_I & -\sin L_I & \cos B_I \cos L_I \\ -\sin B_I \sin L_I & \cos L_I & \cos B_I \sin L_I \\ \cos B_I & 0 & \sin B_I \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Имея геодезический азимут направления  $IM$  и угловой элемент центрировки  $\theta$  можно вычислить геодезический азимут направления  $IC$  по формуле  $A_{IC} = A_{IM} + 360^\circ - \theta$ .

Перейдем к вычислению топоцентрических пространственных прямоугольных координат точки  $C$  относительно точки  $I$  по известным элементам центрировки.

Для этого используем формулу (2.18) [64]:

$$\begin{bmatrix} X'_C \\ Y'_C \\ Z'_C \end{bmatrix} = s_{IC} \begin{bmatrix} \sin z_{IC} \cos A_{IC} \\ \sin z_{IC} \sin A_{IC} \\ \cos z_{IC} \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Очевидно, что  $s_{IC} \sin z_{IC} = \ell$  и  $s_{IC} \cos z_{IC} = h_{IC}$ .

Тогда получим (2.19):

$$\begin{bmatrix} X'_C \\ Y'_C \\ Z'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell \cos A_{IC} \\ \ell \sin A_{IC} \\ h_{IC} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Окончательно, геоцентрические экваториальные пространственные прямоугольные координаты центра  $C$  геодезического пункта находится как (2.20) [64]:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} + R_I \begin{bmatrix} X'_C \\ Y'_C \\ Z'_C \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Покажем теперь возможность определения по элементам центрировки разностей координат спутниковых измерений. Определяемые по формуле (2.19) величины – это по сути поправки за центрировку в топоцентрической системе

координат, обозначим их  $\nu_{X'}$ ,  $\nu_{Y'}$ ,  $\nu_{Z'}$ . И тогда с учетом того, что  $\Delta X_{IC} = X_C - X_I$ ,  $\Delta Y_{IC} = Y_C - Y_I$ ,  $\Delta Z_{IC} = Z_C - Z_I$  из формулы (2.20) получим разности координат спутниковых измерений (2.21):

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{IC} \\ \Delta Y_{IC} \\ \Delta Z_{IC} \end{bmatrix} = R_I \begin{bmatrix} \nu_{X'} \\ \nu_{Y'} \\ \nu_{Z'} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

На наш взгляд, приведенная методика пригодна для большинства геодезических приложений. Однако для решения ряда задач требуются дополнительные исследования, а именно:

- для вычисления поправок за центрировку в измеренные спутниковым методом координаты и приращения координат;
- по необходимости учета поправок за уклонение отвесной линии в измеренный горизонтальный угол и превышение.

### **2.5.2 Оценка точности вычисления координат центра геодезического пункта на основе элементов центрировки при внецентренных спутниковых измерениях**

#### Оценка точности определения координат и положения центра пункта

Раскроем формулу (2.20), в результате получим (2.22):

$$\left. \begin{aligned} X_C &= X_I - l \sin B_I \cos L_I \cos A_{IC} - l \sin L_I \sin A_{IC} + \cos B_I \cos L_I h_{IC}; \\ Y_C &= Y_I - l \sin B_I \sin L_I \cos A_{IC} + l \cos L_I \sin A_{IC} + \cos B_I \sin L_I h_{IC}; \\ Z_C &= Z_I + l \cos B_I \cos A_{IC} + \sin B_I h_{IC}. \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

Продифференцируем полученные уравнения по аргументам  $l, A_{IC}, h_{IC}$  и будем иметь (2.23):

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial X_C}{\partial l} &= -\sin B_I \cos L_I \cos A_{IC} - \sin L_I \sin A_I; \\
 \frac{\partial X_C}{\partial A_{IC}} &= l \sin B_I \cos L_I \sin A_{IC} - l \sin L_I \cos A_{IC}; \quad \frac{\partial X_C}{\partial h_{IC}} = \cos B_I \cos L_I; \\
 \frac{\partial Y_C}{\partial l} &= -\sin B_I \sin L_I \cos A_{IC} + \cos L_I \sin A_{IC}; \\
 \frac{\partial Y_C}{\partial A_{IC}} &= l \sin B_I \sin L_I \sin A_{IC} + l \cos L_I \cos A_{IC}; \quad \frac{\partial Y_C}{\partial h_{IC}} = \cos B_I \sin L_I; \\
 \frac{\partial Z_C}{\partial l} &= \cos B_I \cos A_{IC}; \quad \frac{\partial Z_C}{\partial A_{IC}} = -l \cos B_I \sin A_{IC}; \quad \frac{\partial Z_C}{\partial h_{IC}} = \sin B_I.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Вычислим СКП определения координат, получим (2.24):

$$\left. \begin{aligned}
 m_{X_C}^2 &= (-\sin B_I \cos L_I \cos A_{IC} - \sin L_I \sin A_{IC})^2 m_l^2 + \\
 &(\sin B_I \cos L_I \sin A_{IC} - \sin L_I \cos A_{IC})^2 \frac{l^2 m_{A_{IC}}^2}{\rho^2} + (\cos B_I \cos L_I)^2 m_h^2; \\
 m_{Y_C}^2 &= (-\sin B_I \sin L_I \cos A_{IC} + \cos L_I \sin A_{IC})^2 m_l^2 + (\sin B_I \sin L_I \sin A_{IC} + \\
 &+ \cos L_I \cos A_{IC})^2 \frac{l^2 m_{A_{IC}}^2}{\rho^2} + (\cos B_I \sin L_I)^2 m_h^2; \\
 m_{Z_C}^2 &= (\cos B_I \cos A_{IC})^2 m_l^2 + (-\cos B_I \sin A_{IC})^2 \frac{l^2 m_{A_{IC}}^2}{\rho^2} + (\sin B_I)^2 m_h^2.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

В формулах (2.24) в качестве погрешностей аргументов выступают погрешности  $l$ ,  $A_{IC}$ ,  $h_{IC}$ , при этом погрешность геодезического азимута  $A_{IC}$  состоит из погрешностей определения геодезического азимута  $A_{IM}$  начального направления и углового элемента центрировки  $\theta$ . К требуемой точности их определения обратимся чуть позже.

Примем  $m_l = 2$  мм,  $m_{A_{IC}} = 5''$ ,  $m_{h_{IC}} = 1$  мм, тогда при разных значениях  $B$ ,  $L$ ,  $l$ ,  $A_{IC}$  подставив их в формулу (2.24), получим  $m_{X_C}$ ,  $m_{Y_C}$ ,  $m_{Z_C}$ . Погрешность положения точки  $C$  найдем по формуле (2.25):

$$M_C = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_Z^2}. \quad (2.25)$$

Полученные результаты представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Вычисление СКП координат и пространственного положения точки  $C$

$l =$	1 м			10 м			50 м			100 м		
$A_{IC} =$	$0^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$									
$B = 0^\circ, L = 0^\circ$												
$m_{X_c}$ (мм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$m_{Y_c}$ (мм)	0,0	1,7	2,0	0,2	1,7	2,0	1,2	1,8	2,0	2,4	2,1	2,0
$m_{Z_c}$ (мм)	2,0	1,0	0,0	2,0	1,0	0,2	2,0	1,4	1,2	2,0	2,3	2,4
$M_C$ (мм)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,5	2,5	2,5	3,3	3,3	3,3
$B = 0^\circ, L = 90^\circ$												
$m_{X_c}$ (мм)	0,0	1,7	2,0	0,2	1,7	2,0	1,2	1,8	2,0	2,4	2,1	2,0
$m_{Y_c}$ (мм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$m_{Z_c}$ (мм)	2,0	1,0	0,0	2,0	1,0	0,2	2,0	1,4	1,2	2,0	2,3	2,4
$M_C$ (мм)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,5	2,5	2,5	3,3	3,3	3,3
$B = 60^\circ, L = 30^\circ$												
$m_{X_c}$ (мм)	1,6	1,7	1,1	1,6	1,7	1,1	1,7	1,7	1,4	2,0	1,9	2,1
$m_{Y_c}$ (мм)	0,9	1,1	1,8	0,9	1,1	1,8	1,4	1,5	1,8	2,3	2,2	2,0
$m_{Z_c}$ (мм)	1,3	1,0	0,9	1,3	1,0	0,9	1,3	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5
$M_C$ (мм)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,5	2,5	2,5	3,3	3,3	3,3
$B = 90^\circ, L = 0^\circ$												
$m_{X_c}$ (мм)	2,0	1,0	0,0	2,0	1,0	0,2	2,0	1,4	1,2	2,0	2,3	2,4
$m_{Y_c}$ (мм)	0,0	1,7	2,0	0,2	1,7	2,0	1,2	1,8	2,0	2,4	2,1	2,0
$m_{Z_c}$ (мм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$M_C$ (мм)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,5	2,5	2,5	3,3	3,3	3,3
$B = 90^\circ, L = 90^\circ$												
$m_{X_c}$ (мм)	0,0	1,7	2,0	0,2	1,7	2,0	1,2	1,8	2,0	2,4	2,1	2,0
$m_{Y_c}$ (мм)	2,0	1,0	0,0	2,0	1,0	0,2	2,0	1,4	1,2	2,0	2,3	2,4
$m_{Z_c}$ (мм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$M_C$ (мм)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,5	2,5	2,5	3,3	3,3	3,3

Анализ таблицы 2.4 показывает:

- при увеличении значений  $l$  увеличиваются значения погрешностей  $m_{X_c}$ ,  $m_{Y_c}$ ,  $m_{Z_c}$ ;

– при заданном значении  $l$  и неизменяющихся  $m_l, m_{A_{IC}}, m_{h_{IC}}$  СКП положения точки  $C$  не зависит от  $B$  и  $L$  точки наблюдения и от геодезического азимута направления с точки  $I$  на точку  $C$ ;

– значения погрешностей пространственного положения точки  $C$  при увеличении  $l$  изменяются от 2,2 мм (при  $l = 1-10$  м) до 3,3 мм (при  $l = 100$  м).

Далее найдем погрешность положения точки  $C$  по формуле (2.23), для этого подставим в нее выведенную формулу (2.25) и упростим выражение, в результате получим (2.26):

$$M_C = \sqrt{m_l^2 + \frac{l^2 m_{A_{IC}}^2}{\rho^2} + m_{h_{IC}}^2}. \quad (2.26)$$

Анализ формулы (2.26) подтверждает ранее сделанный вывод, что погрешность пространственного положения точки  $C$  не зависит от величин широты и долготы точки наблюдения, геодезического азимута направления  $IC$ , а на ее величину влияет значение линейного элемента центрировки  $l$  и погрешности  $m_l, m_{A_{IC}}, m_{h_{IC}}$ .

#### Оценка требуемой точности определения элементов центрировки

Полагая, что СКП аргументов ( $m_l, m_{A_{IC}}, m_{h_{IC}}$ ) одинаково влияют на СКП функции ( $M_C$ ), получим (2.27):

$$\frac{M_C^2}{3} = m_l^2 = \frac{l^2 m_{A_{IC}}^2}{\rho^2} = m_{h_{IC}}^2. \quad (2.27)$$

Найдем с какими погрешностями надо определять  $l, A_{IC}, h_{IC}$ .

Из формулы (2.27) имеем (2.28):

$$m_l = \frac{M_C}{\sqrt{3}}; \quad m_{A_{IC}} = \frac{\rho M_C}{l\sqrt{3}}; \quad m_{h_{IC}} = \frac{M_C}{\sqrt{3}}. \quad (2.28)$$

Зададим  $M_C$ , равными 3 мм и 5 мм, а также  $l = 1$  м, 10 м, 50 м, 100 м и вычислим погрешности  $l, A_{IC}, h_{IC}$ , в результате получим данные, приведенные в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Вычисление СКП  $l$ ,  $A_{IC}$ ,  $h_{IC}$ 

Обозначения	$M_C = 3 \text{ мм}$				$M_C = 5 \text{ мм}$			
	1 м	10 м	50 м	100 м	1 м	10 м	50 м	100 м
$l =$	1,7	1,7	1,7	1,7	2,9	2,9	2,9	2,9
$m_l$ (мм)	1,7	1,7	1,7	1,7	2,9	2,9	2,9	2,9
$m''_{A_{IC}}$	357	36	7	4	595	60	12	6
$m_{h_{IC}}$ (мм)	1,7	1,7	1,7	1,7	2,9	2,9	2,9	2,9

Анализ данных таблицы 2.5 и формул (2.28) показывает:

– линейный  $l$  и высотный  $h_{IC}$  элемент центрировки надо определять с погрешностями в корень из трех раз меньше, чем погрешность  $M_C$  определения положения центра пункта; при этом, если  $M_C = 3 \text{ мм}$  получим  $m_l = 1,7 \text{ мм}$ ,  $m_{h_{IC}} = 1,7 \text{ мм}$ , а при  $M_C = 5 \text{ мм}$  будем иметь  $m_l = 2,9 \text{ мм}$ ,  $m_{h_{IC}} = 2,9 \text{ мм}$ ;

– погрешность определения  $A_{IC}$ , исходя из формул (2.28) еще зависит от длины  $l$  значит, чем больше величина  $l$ , тем точнее надо определять азимут  $A_{IC}$ .

Перейдем теперь к нахождению СКП углового элемента центрировки  $\theta$ .

Для вычисления  $\theta$  найдем производную функции  $A_{IM} = \text{arctg} \left( \frac{Y'_M}{X'_M} \right)$  по аргументам  $X'_M$  и  $Y'_M$ , получим (2.29):

$$\frac{\partial A_{IM}}{\partial X'_M} = -\frac{Y'_M}{X'^2_M \left(1 + \frac{Y'^2_M}{X'^2_M}\right)}; \quad \frac{\partial A_{IM}}{\partial Y'_M} = \frac{1}{X'_M \left(1 + \frac{Y'^2_M}{X'^2_M}\right)}. \quad (2.29)$$

И найдем СКП  $A_{IM}$  по формуле (2.30):

$$m_{A_{IM}} = \frac{\rho \sqrt{Y'^2_M m^2_{X'_M} + X'^2_M m^2_{Y'_M}}}{X'^2_M + Y'^2_M}. \quad (2.30)$$

Примем (исходя из полевого эксперимента в работе [16])  $X'_M = -106,241 \text{ м}$ ;  
 $Y'_M = 10,466 \text{ м}$ ;  $m_{X'_M} = 2 \text{ мм}$ ;  $m_{Y'_M} = 2 \text{ мм}$ , тогда  $m_{A_{IM}} = 3,8''$ .

Имея требуемую СКП определения геодезического азимута направления  $IC$ , вычислим требуемую СКП определения  $\theta$ . Опираясь на рисунок 2.10, где  $A_{IC} = A_{IM} + 360^\circ - \theta$ , будем иметь (2.31):

$$m_{A_{IC}} = \sqrt{m_{A_{IM}}^2 + m_\theta^2}. \quad (2.31)$$

Применив принцип равных влияний, получим (2.32):

$$m_\theta = \frac{m_{A_{IC}}}{\sqrt{2}}. \quad (2.32)$$

В таблице 2.6 выполним расчеты  $m_\theta$  для разных длин  $l$  и заданных значениях погрешностей положения точки  $C$ .

Таблица 2.6 – Вычисление  $m_\theta$

Обозначения	$M_C = 3 \text{ мм}$				$M_C = 5 \text{ мм}$			
	1 м	10 м	50 м	100 м	1 м	10 м	50 м	100 м
$l =$								
$m''_{A_{IC}}$	357	36	7	4	595	60	12	6
$m''_\theta$	252	25	5	3	421	42	8	4

Анализ таблицы 2.6 показывает:

- чем больше расстояние  $l$ , тем точнее необходимо определять угловой элемент центрировки  $\theta$ ;
- если принять  $M_C = 3 \text{ мм}$ , то в обобщенном виде погрешности определения  $\theta$  не должны превышать  $4'$  (при  $l$  до 1 м),  $25''$  (при  $l$  от 1 до 10 м),  $3''$  (при  $l$  от 10 до 100 м).

### 2.5.3 Учет поправок за уклонение отвесной линии в измеренное горизонтальное направление и в измеренное превышение

Т.к. угловой элемент центрировки измеряется (либо транспортиром при графическом определении элементов центрировки, либо электронным тахеометром при непосредственном их измерении), то возникает задача оценки необходимости учета поправки за уклонение отвесной линии в измеренные горизонтальные направления.

Рассмотрим вопрос учета поправки за уклонение отвесной линии в измеренное направление и в измеренное превышение, полученное геометрическим нивелированием.

1. *Учет поправки за уклонение отвесной линии в измеренное направление IC*

Согласно [15, 76, 96, 105] поправка в измеренное направление за уклонение отвесной линии вычисляется по формуле (2.33):

$$\Delta l = v \operatorname{ctg} z, \quad (2.33)$$

где  $v$  – уклонение отвесной линии,  $z$  – зенитное расстояние.

Обычно на поверхности Земли уклонение  $v$  не превышает  $3-4''$  [13], но может достигать нескольких десятков секунд в районах с большой аномалией силы тяжести (горных районах).

Исследуем при каких зенитных расстояниях  $z$  необходимо вводить поправки за уклонение отвесной линии в измеренное направление  $IC$ , результаты представим в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Вычисление поправки  $\Delta l$  в измеренные горизонтальные направления

При $v = 4''$										
$z$	$90^\circ$	$85^\circ$	$80^\circ$	$70^\circ$	$60^\circ$	$50^\circ$	$40^\circ$	$30^\circ$	$20^\circ$	$10^\circ$
$\Delta l''$	0	0,4	0,7	1,5	2,3	3,4	4,8	6,9	11,0	22,7

Из анализа таблиц 2.6 и 2.7 можно сделать следующие обобщенные выводы:

– поправка в горизонтальное направление увеличивается при уменьшении зенитного расстояния;

– при визировании луча с точки  $I$  на точку  $C$  в пределах горизонта ( $z = 90^\circ - 70^\circ$ ) вводить поправку за уклонение отвесной линии необязательно;

– в результаты угловых измерений следует вводить поправку за уклонение отвесной линии при  $z$  в пределах  $60^\circ - 10^\circ$  и при  $l$  больше 10 м.

2. *Учет поправки за уклонение отвесных линий в измеренное превышение, полученное из геометрического нивелирования*

Ранее, в таблице 2.5 была вычислена требуемая погрешность ( $m_{h_c}$ ) определения высотного элемента центрировки, которая равняется 1,7 мм при  $M_C = 3$  мм и 2,9 мм при  $M_C = 5$  мм.

Для вычисления влияния уклонения отвесных линий на результаты геометрического нивелирования воспользуемся формулой (2.34) [15, 76, 96]:

$$\Delta h = S \sin \nu \cdot \sin z, \quad (2.34)$$

где  $\Delta h$  – поправка в измеренное превышение за уклонение отвесной линии,  $z$  – зенитное расстояние,  $S$  – измеренное расстояние,  $\nu$  – уклонение отвесной линии.

По малости  $\nu$  (около нескольких секунд) примем  $\sin \nu = \nu$ , а  $S \sin z = l$  – это есть горизонтальное проложение (линейный элемент центрировки), тогда получим выражение (2.35):

$$\Delta h = \nu \cdot l / \rho. \quad (2.35)$$

Результаты вычисления  $\Delta h$  представим ниже (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Вычисление поправки  $\Delta h$  в превышения по результатам геометрического нивелирования

$\nu = 4''$					
$l =$	1 м	10 м	30 м	50 м	100 м
$\Delta h$ , мм	0	0,2	0,6	1	2

В соответствии с таблицей 2.8, чтобы пренебречь этой поправкой она должна быть в 3 раза меньше погрешности измерения превышения, т.е. 0,6 мм, а значит при  $\nu = 4''$  и линейном элементе центрировки  $l \geq 30$  м необходимо вводить поправку в измеренное превышение за уклонение отвесной линии.

В заключение заметим, что все выводы по оценке точности определения элементов центрировки и учета уклонения отвесной линии носят обобщенный характер. В зависимости от требований к точности положения точки  $C$ , элементов центрировки, поправок за уклонение отвесной линии необходимо проводить специальные расчеты по методике, изложенной выше.

## 2.6 Определение и учет вертикальной рефракции на основе построения вертикального базиса на строительной площадке

Согласно нормативному документу [27] измерение вертикальных перемещений методом тригонометрического нивелирования рекомендуется проводить короткими визирными лучами до 100 м. Однако, как показывает практика, при проведении работ на строительной площадке расстояния от тахеометра до визирных целей часто превышают 100 м, используется при этом, как правило, одностороннее тригонометрическое нивелирование. Поэтому необходимо провести оценку точности полученных результатов при длине визирного луча до 200 м. Также можно заметить, что исследований по учету вертикальной рефракции – основного фактора, ограничивающего точность тригонометрического нивелирования, на короткие расстояния (до 200 м) для условий реального производства крайне мало.

### 2.6.1 Предрасчет точности определения превышения из одностороннего тригонометрического нивелирования

При одностороннем тригонометрическом нивелировании превышение  $h$  между пунктами, как было сказано выше, вычисляется по формулам (1.1) или (1.2), в зависимости от того, что измеряют (зенитные расстояния или углы наклона).

Выполним предрасчет точности превышений, полученного из одностороннего тригонометрического нивелирования, для этого применим формулу (2.36) определения СКП  $m_h$  превышения, используя формулу (1.1):

$$m_h^2 = \operatorname{ctg}^2 z \cdot m_d^2 + \frac{d^2}{\sin^2 z} \cdot \frac{m_z^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_l^2 + m_f^2, \quad (2.36)$$

где  $m_d$  – погрешность горизонтального проложения  $d$ ;  $m_z$  – погрешность измерения зенитного расстояния  $z$ ;  $m_i$  – погрешность измерения высоты прибора;  $m_l$  – погрешность измерения высоты визирования;  $m_f$  – погрешность определения поправки за кривизну Земли и рефракцию;  $\rho = 206265''$ . Совместная

поправка  $f$  состоит из двух поправок: поправки за кривизну Земли и поправки за рефракцию (формулы для их определения были приведены в главе 1).

*Предрасчет точности определения превышения без учета  $m_f$*

Для того чтобы оценить точность определения превышения  $m_h$  без учета погрешности за кривизну Земли и рефракцию в формуле (2.36) примем  $m_i = 1$  мм,  $m_l = 0$  (т.к. визирование, как правило, проводится на отражающие пленки), а  $m_f$  пока не будем учитывать.

Исходя из вышесказанного, СКП превышения будет вычисляться по формуле (2.37):

$$m_h^2 = \operatorname{ctg}^2 z \cdot m_d^2 + \frac{d^2}{\sin^2 z} \cdot \frac{m_z^2}{\rho^2} + m_i^2. \quad (2.37)$$

Ниже (таблица 2.9) приводится предрасчет точности  $h$  из одностороннего тригонометрического нивелирования при условии  $m_z = 1''$ ,  $m_d = 2$  мм.

Таблица 2.9 – Определения СКП превышения

$d$ (м) \ $z$	85°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
40	1,03	1,08	1,15	1,54	1,97	2,60	3,63
50	1,04	1,09	1,16	1,55	1,98	2,61	3,64
60	1,06	1,10	1,28	1,56	1,99	2,62	3,65
70	1,07	1,11	1,29	1,58	2,00	2,64	3,67
80	1,09	1,13	1,30	1,59	2,02	2,65	3,69
90	1,11	1,15	1,32	1,61	2,03	2,67	3,71
100	1,13	1,17	1,34	1,63	2,05	2,69	3,73
150	1,25	1,29	1,46	1,74	2,17	2,82	3,89
180	1,34	1,38	1,55	1,83	2,26	2,92	4,01
190	1,37	1,41	1,58	1,86	2,29	2,96	4,05
200	1,41	1,45	1,61	1,89	2,33	2,99	4,09

Результаты таблицы 2.9 показывают, что при уменьшении зенитных расстояний с 85° до 30° СКП определения превышения увеличивается примерно в 3 раза, а при увеличении расстояний с 40 до 200 м  $m_h$  увеличивается максимально в 1,4 раза. Поэтому, следует рекомендовать для измерения вертикальных

перемещений использование одностороннего тригонометрического нивелирования при зенитных расстояниях более  $60^\circ$ .

*Предрасчет точности определения превышения с учетом  $m_f$*

Чтобы оценить влияние  $m_f$  на результаты вычисления превышения из тригонометрического одностороннего нивелирования, необходимо отдельно проанализировать поправки за кривизну Земли и рефракцию. Т. к. расстояния на строительной площадке сравнительно небольшие (мы принимаем до 200 м), то влияние поправки за кривизну Земли при  $d = 200$  м можно вычислить по формуле

$$(1.4): K = \frac{d^2}{2R} = 3 \text{ мм.}$$

Это значит, что поправку за кривизну Земли необходимо

вводить в зависимости от длины визирного луча. Более сложно оценить влияние поправки за рефракцию на результаты измерений, т. к. она зависит от многих факторов (анализ был проведен в главе 1).

В работе [27] рекомендуется использовать тригонометрическое нивелирование при определении вертикальных перемещений при II – IV классах точности измерений. При II, III и IV классах точности допускаемые погрешности ( $m_h$ ) при измерении вертикальных перемещений составляют соответственно 2, 5 и 10 мм. Значит, если принять  $m_h = 2$  мм, тогда влияние рефракции, чтобы оно было пренебрегаемо мало, должно быть в три раза меньше СКП конечной величины, а именно, на уровне 0,7 мм.

Как правило, задача влияния вертикальной рефракции на результаты измерений решается путем введения в память электронного тахеометра коэффициента рефракции, который может изменяться от  $-6$  до  $+6$  [77, 111]. Значит, вычисление вертикальной рефракции сводится к определению коэффициента рефракции геодезическими методами и его учета для расстояний от электронного тахеометра до визирных целей до 200 м.

Вычислим, каким изменением коэффициента рефракции можно пренебречь. Из формулы (1.7) выразим  $k = \frac{2Rr}{d^2}$ . При полученном ранее пренебрегаемо малом влиянии рефракции  $r = 0,7$  мм и  $d = 200$  м, получим  $k = 0,2$ .

### 2.6.2 Обобщение способов определения коэффициента рефракции геодезическими методами

Перейдем теперь к обобщению способов определения коэффициента рефракции. По результатам одностороннего тригонометрического нивелирования из формулы (1.1) легко получить формулу (2.38):

$$k = 1 - \frac{2R}{d^2}(h - d \operatorname{ctg} z - i + l). \quad (2.38)$$

Допустим, что измерения электронным тахеометром выполняются на ОП, поэтому примем  $l = 0$ . Подставив в формулу (2.37) вместо  $h$  значение превышения  $h_{\text{теор}}$  на вертикальном базисе, получим (2.39):

$$k = 1 - \frac{2R}{d} \left( \frac{h_{\text{теор}}}{d} - \operatorname{ctg} z - \frac{i}{d} \right). \quad (2.39)$$

Отметим, что под *вертикальным базисом* будем понимать геодезическое построение, состоящее из закрепленных на вертикальной поверхности точек на одной отвесной линии и точек на местности, превышения между которыми определены с высокой точностью.

Для определения коэффициента рефракции могут использоваться также измеренные зенитные расстояния и их теоретические значения  $z_{\text{теор}}$  [81]. При  $l = 0$  из формулы (1.1) получим (2.40):

$$\operatorname{ctg} z_{\text{теор}} = \frac{h_{\text{теор}} - i}{d} - \frac{d}{2R}. \quad (2.40)$$

Для вычисления коэффициента рефракции найдем  $\Delta z = z_{\text{изм}} - z_{\text{теор}}$ . Считая, что влияние рефракции можно с одной стороны, вычислить по формуле [77]

$r = \frac{d\Delta z}{\rho''}$ , а с другой стороны, по формуле (1.7), получим  $\frac{d\Delta z}{\rho''} = \frac{kd^2}{2R}$ . И

окончательно будем иметь (2.41):

$$k = \frac{2R\Delta z}{d\rho''}. \quad (2.41)$$

Третий способ определения коэффициента рефракции получим, приняв значение превышения из геометрического нивелирования ( $h_{\text{теор}}$ ) за безошибочное значение и связав его с превышением из тригонометрического нивелирования

( $h_{\text{триг.н.}}$ ) без учета поправки за кривизну Земли:  $h_{\text{теор}} = h_{\text{триг.н.}} - \frac{kd^2}{2R}$ .

Окончательно имеем формулу (2.42):

$$k = \frac{2R(h_{\text{триг.н.}} - h_{\text{теор}})}{d^2} = \frac{2R\Delta h}{d^2}, \quad (2.42)$$

где  $\Delta h = h_{\text{триг.н.}} - h_{\text{теор}}$ .

### **2.6.3 Методика построения вертикального базиса «во всех комбинациях» для определения коэффициента рефракции и алгоритм выполнения оценки точности**

Очевидно, что при построении вертикального базиса необходимо принимать меры для определения превышения как можно с меньшей СКП. Для реальных условий строительной площадки эту погрешность можно принять равной 0,5 – 0,7 мм. Покажем примерную схему вертикального базиса (рисунок 2.7).

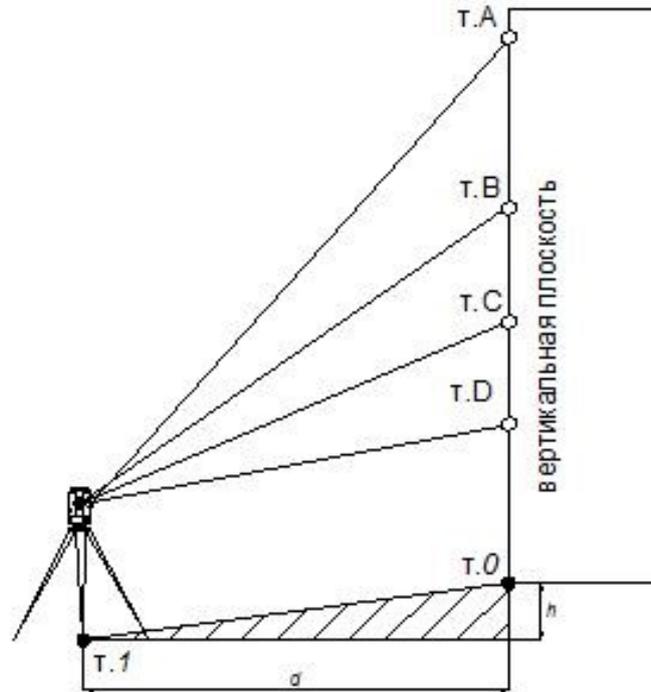


Рисунок 2.7 – Вертикальный базис

Для создания вертикального базиса на одной отвесной линии закрепляют необходимое количество точек отражающими пленками ОП, в данном случае это точки  $A, B, C, D$ , а на поверхности земли –  $T.0$  и  $T.1$ .

В  $T.1$  устанавливается электронный тахеометр и разными способами измеряются расстояния:

1. с помощью диагональной насадки – расстояния  $A-B, A-C, A-D, B-C, B-D, C-D$ ;
2. непосредственно компарированной рулеткой – расстояния  $A-B, B-C, C-D, D-T.1$ .

Горизонтальное проложение  $d$  измеряется электронным тахеометром, а превышение  $h$  определяется геометрическим нивелированием.

Окончательные значения превышений между всеми точками можно получить после уравнивания коррелятным способом. Для этого составляются условных уравнения связи. Далее записываются условные уравнения поправок в матричном виде (2.43) [49]:

$$AV + W = 0, \quad (2.43)$$

где  $A$  – матрица коэффициентов условных уравнений поправок,  $V$  – вектор поправок к результатам измерений;  $W$  – вектор невязок.

После реализации формул коррелятного способа имеем (2.44) [49]:

$$NK + W = 0, \quad (2.44)$$

где  $N$  – матрица коэффициентов нормальных уравнений, которая выражается соотношением  $N = AQA^T$ . Далее получаем  $V$  по формуле (2.45) [49]:

$$V = QA^T K. \quad (2.45)$$

Для оценки точности полученных результатов [65] вычисляется СКП единицы веса по формуле (2.46) [49]:

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T Q^{-1} V}{r}}, \quad (2.46)$$

А далее находится обратная весовая матрица уравненных значений измеренных величин (2.47) [49]:

$$Q_d = Q_A \cdot Q, \quad (2.47)$$

где  $Q_A = E - QA^T (AQA^T)^{-1} A$ .

Для того, чтобы определить погрешности превышений точек 1, 2, 3, 4 над точкой  $A$ , составляется вектор-функция [49] и находится обратная весовая матрица вектор-функции по формуле (2.48):

$$Q_\phi = FQ_d F^T, \quad (2.48)$$

где  $F$  – матрица частных производных.

## 2.7 Выводы по главе 2

1. Обоснованы требования к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты. Эти требования сформированы на основе заявленной в нормативной документации предельной погрешности взаимного положения выносимых в натуру зданий и сооружений в плане (5 мм). Далее были рассчитаны:

- СКП взаимного положения точек (2 мм);

– СКП положения точек внутренней сети (2 мм), которая состоит из СКП определения положения точек внешней сети ( $\leq 0,9$  мм) и СКП определения положения точек внутренней сети способом свободного стационарирования (2 мм);

– точность способа свободного стационарирования (2 мм), которая складывается из СКП определения положения станции обратной засечкой (1,4 мм) и СКП определения положения точки сети относительно станции способом полярных координат (1,4 мм).

2. Приведены формулы оценки точности положения определяемой точки способом свободного стационарирования по необходимому составу измерений, а также при условиях, что положение станции определяется прямой и обратной угловыми засечками, линейной засечкой, а положение определяемой точки – полярным способом. Предложены алгоритмы оценки точности положения определяемых точек способом свободного стационарирования на основе параметрического способа уравнивания. При этом в алгоритмах предусмотрено уравнивание как без учета ошибок исходных данных, так и с их учетом. Так же представлены численные примеры оценки точности. Совпадение результатов уравнивания и СКП подтверждает корректность предложенных алгоритмов и достоверность проведенных исследований.

3. Усовершенствована методика проектирования внешней разбивочной сети при строительстве АЭС. Представлены и обоснованы этапы проектирования.

4. Усовершенствована методика создания внутренней разбивочной сети при строительстве АЭС. Обосновано и предложено выполнять передачу плановой сети с исходного на монтажные горизонты от внешних пунктов разбивочной сети и на каждом монтажном горизонте создавать свою сеть способом свободного стационарирования.

Для решения этой задачи целесообразно использовать возможности электронного тахеометра, который устанавливается на местности произвольно в соответствии с условиями видимости. Точность обратной линейно-угловой засечки зависит не только от точности измеренных углов и расстояний, но и от взаимного расположения определяемой точки и исходных пунктов. Для выноса проектного

положения пунктов внутренней разбивочной сети использовать способ полярных координат.

5. Разработана методика приведения к центрам пунктов результатов спутниковых измерений, основанная на использовании преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами. К линейному и угловому элементам центрировки, как это выполняется при построении плановых геодезических сетей, предложено добавить еще превышение между точкой стояния прибора и центром пункта. Разработанная методика позволяет приводить к центрам пунктов как геоцентрические координаты, так и разности координат.

6. Выполнена оценка точности определения координат центра геодезического пункта на основе определения элементов центрировки и сформулированы требования к точности определения элементов центрировки:

- при увеличении значений линейного элемента центрировки  $l$  увеличиваются значения погрешностей координат точки  $C$ :  $m_{x_c}$ ,  $m_{y_c}$ ,  $m_{z_c}$ ;

- при заданном значении линейного элемента центрировки  $l$  и неизменяющихся погрешностях линейного элемента центрировки, геодезического азимута и превышения  $(m_l, m_{A_{IC}}, m_{h_{IC}})$  СКП положения точки  $C$  не зависит от геодезических координат  $B$  и  $L$  точки наблюдения и геодезического азимута направления  $IC$ ;

- требуемые погрешности определения  $l$ ,  $h_{IC}$  должны быть в корень из трех раз меньше, чем погрешность положения точки  $C$ . Тогда при  $M_C = 3$  мм получим  $m_l = 1,7$  мм,  $m_{h_{IC}} = 1,7$  мм;

- чем больше величина  $l$ , тем точнее надо определять азимут  $A_{IC}$  и угловой элемент центрировки  $\theta$ ;

- если принять  $M_C = 3$  мм, то в обобщенном виде погрешности определения  $\theta$  не должны превышать  $4'$  (при  $l$  до 1 м),  $25''$  (при  $l$  от 1 до 10 м),  $3''$  (при  $l$  от 10 до 100 м), при других условиях требуется проводить дополнительные расчеты.

7. Даны рекомендации по введению поправок за уклонения отвесных линий при измерении горизонтальных направлений и определении высотного элемента центрировки. В результате исследований получили, что необходимо вводить поправку за уклонение отвесной линии:

- поправка в горизонтальное направление увеличивается при уменьшении зенитного расстояния;
- при визировании луча с точки  $I$  на точку  $C$  в пределах горизонта ( $z = 90^\circ - 70^\circ$ ) вводить поправку за уклонение отвесной линии необязательно;
- в результаты угловых измерений следует вводить поправку за уклонение отвесной линии при  $z$  в пределах  $60^\circ - 10^\circ$  и при  $l$  больше 10 м;
- при уклонение отвесной линии  $\nu = 4''$  и линейном элементе центрировки  $l \geq 30$  м необходимо вводить поправку в измеренное превышение за уклонение отвесной линии.

8. Выполнен предрасчет точности определения превышения, полученного из тригонометрического нивелирования. Результаты предрасчета показали, что при уменьшении зенитных расстояний с  $85^\circ$  до  $30^\circ$  СКП определения превышения увеличивается примерно в 3 раза, а при увеличении расстояний с 40 до 200 м  $m_h$  увеличивается максимально в 1,4 раза. Рекомендовано использование тригонометрического нивелирования при зенитных расстояниях более  $60^\circ$ , а влияние рефракции, чтобы оно было пренебрегаемо мало, должно быть на уровне 0,7 мм. А также рассчитано каким изменением коэффициента рефракции можно пренебречь, оно получилось равное 0,2.

9. Обобщены формулы определения коэффициентов рефракции по результатам измерений на вертикальном базисе, по измеренным и известным зенитным расстояниям, по разностям измеренных тригонометрическим нивелированием и известным из геометрического нивелирования превышений. Корректность формул подтверждена натурными исследованиями.

10. Предложена методика создания вертикального базиса, в основу которого положена идея выполнения измерений «во всех комбинациях». Под вертикальным базисом принято понимать геодезическое построение, состоящее из закрепленных на вертикальной поверхности точек на одной отвесной линии и точек на местности, превышения между которыми определены с высокой точностью. Предложен алгоритм уравнивания результатов измерений на вертикальном базисе коррелятным способом.

## ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

### 3.1 Проектирование внешней разбивочной сети реакторного блока АЭС

Порядок и схема проведения проектирования были даны в главе 2, в данном параграфе рассмотрим на конкретном примере создание проекта внешней разбивочной сети реакторного блока АЭС.

#### 3.1.1 Составление электронной схемы сети в программе *AutoCad*

Для проектирования была создана модель внешней разбивочной сети реакторного блока АЭС (рисунок 3.1), где 7.2-7.4 и D.2-D.3 – главные оси реакторного блока; исходные пункты 7.2, 7.4, D.2, D.3 закреплены на местности постоянными знаками; T1, T2, T3 – точки стояния тахеометра; 1, 2, 3, 4 – точки внешней разбивочной сети.

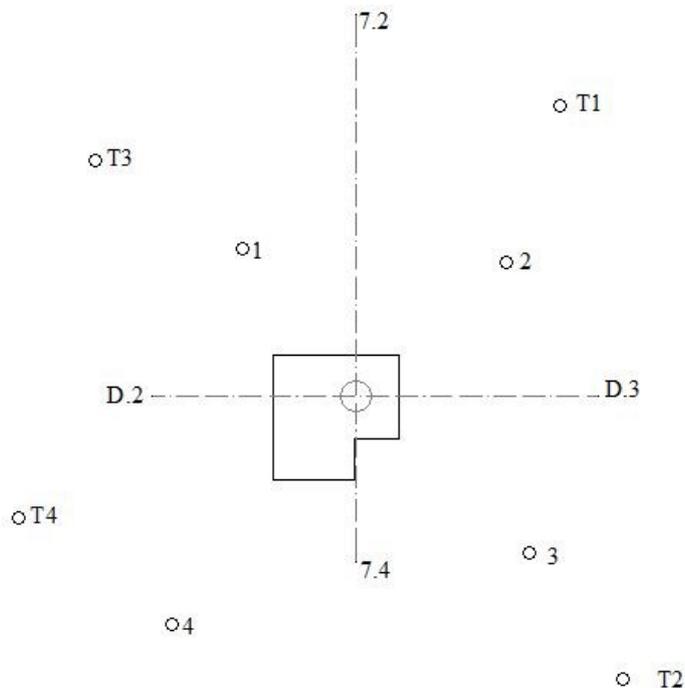


Рисунок 3.1 – Проект создания внешней сети реакторного блока АЭС

*Исходные данные и приближенные значения величин сети*

Исходными точками для создания сети для всех вариантов являются точки, закрепленные на главных осях здания, координаты которых приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Координаты исходных точек сети

Название пункта	x (м)	y (м)
7.2	2130,000	1475,000
D.3	1800,000	1682,373
7.4	1657,526	1475,000
D.2	1800,000	1299,992

Приближенные координаты точек внешней сети приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Список проектируемых пунктов внешней разбивочной сети

Название пункта	x (м)	y (м)
1	1927	1377
2	1915	1603
3	1665	1623
4	1603,5	1316,5

Было принято, что тахеометр устанавливается в точках Т1, Т2, Т3, Т4 (рисунок 3.1), а приближенные координаты этих точек приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Приближенные координаты точек стояния прибора

Название пункта	x (м)	y (м)
T1	2050	1648
T2	1555	1702
T3	2003	1250
T4	1694	1185

### 3.1.2 Моделирование результатов измерений при создании внешней разбивочной сети

Рассмотрим 3 варианта создания внешней разбивочной сети различными способами (рисунок 3.2 а, б, в).

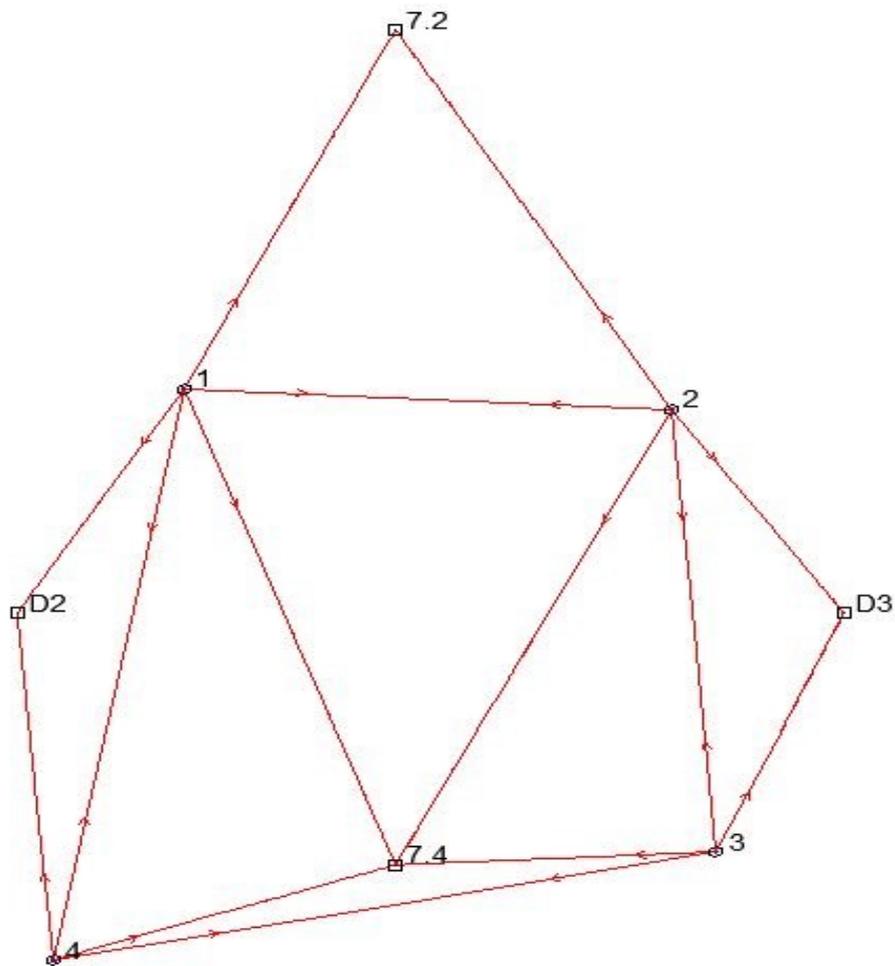


Рисунок 3.2 а – Создание внешней сети (линейно – угловая сеть)

1. Линейно - угловая сеть. Прибор устанавливают поочередно на точки внешней сети 1, 2, 3, 4 и с них выполняют линейно-угловые измерения на все видимые направления.

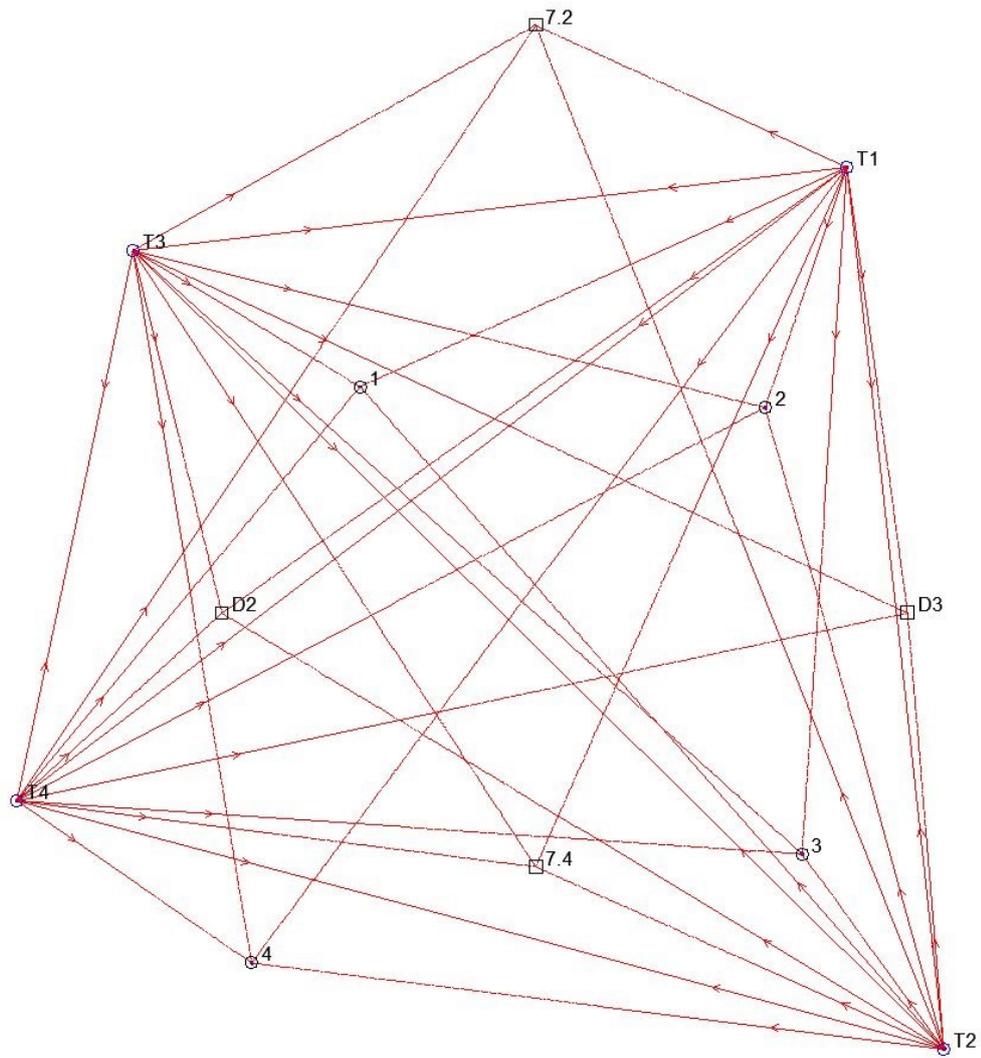


Рисунок 3.2 б – Создание внешней сети (способ свободного стационарирования)

2. Способ свободного стационарирования. Выбирают на местности точки стояния тахеометра (это T1, T2, T3, T4) и с них наблюдают все видимые направления, включая в сеть и сами точки стояния прибора.

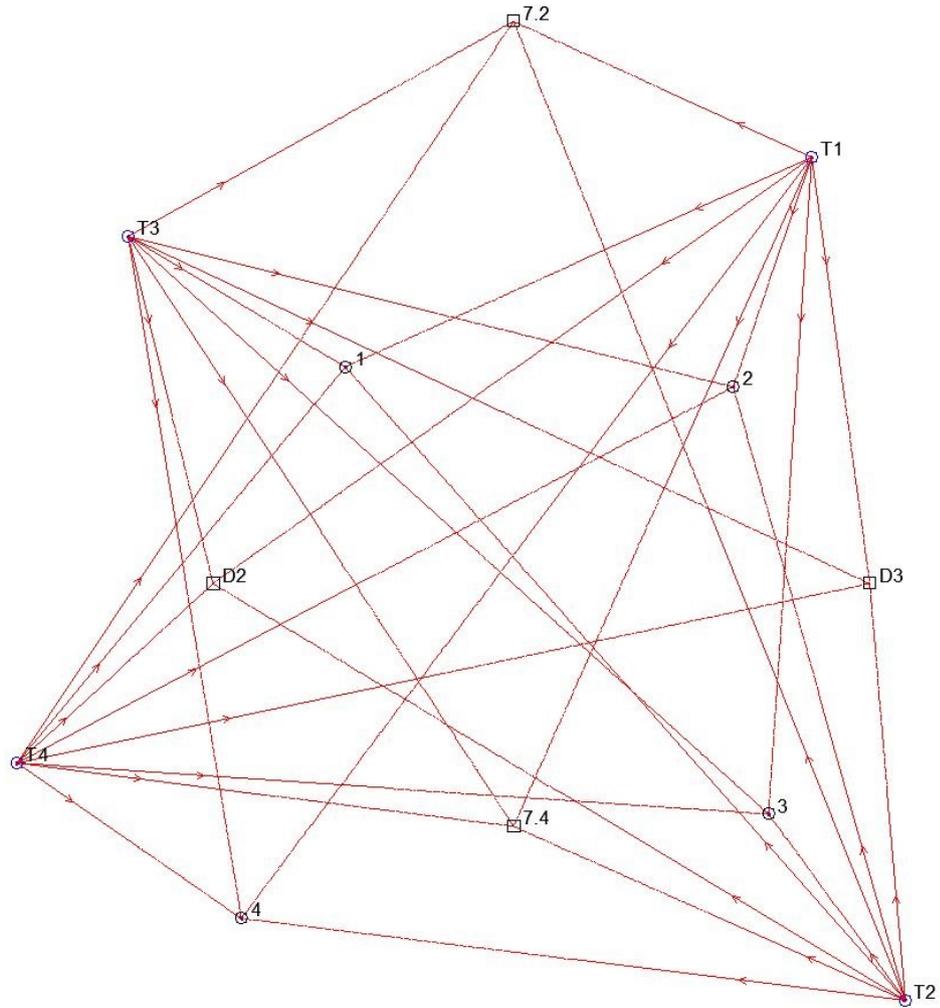


Рисунок 3.2 в – Создание внешней сети (способ свободного станционирования без связей станций)

3. Способ свободного станционирования (без связей станций). Выбирают на местности точки (это T1, T2, T3, T4) стояния тахеометра без закрепления их на местности и с них наблюдают все видимые направления.

Для всех трех вариантов сетей, представленных выше, выполнен расчет точности, при этом координаты исходных пунктов приняты безошибочными.

Чтобы оценить проектируемую сеть по точности была составлена модель измерений, которая примерно отражает измеряемые величины в проектируемой сети. Ниже представлены результаты расчета.

### 3.1.3 Предрасчет точности внешней разбивочной сети в компьютерной программе *Credo*

Чтобы произвести расчет точности сети, необходимо было вычислить горизонтальные углы и расстояния по координатам исходных пунктов и приближенным координатам точек стояния тахеометра. Эти параметры представляют собой модель измерений, которые должны быть измерены в проектируемой сети. Результаты расчета приведены в таблицах 3.4 и 3.5 (в таблице 3.4 для первого варианта сети, а в таблице 3.5 – для второго варианта сети).

В этих таблицах объединены модели результатов тахеометрических измерений в одноименных точках стояния тахеометра с названием точек Т1, Т2, Т3, Т4. Каждый блок в таблице 3.4 имеет 5 столбцов, в которые занесены значения: 1 – названия пунктов визирования, 2 – градусы, 3 – минуты, 4 – секунды горизонтальных направлений и 5 – горизонтальные расстояния.

Таблица 3.4 – Модель результатов измерений для 1 варианта построения внешней разбивочной сети

$$T1 = \begin{bmatrix} 7.2 & 0 & 00 & 46 & 225,286 \\ 2 & 67 & 12 & 19 & 226,235 \\ 7.4 & 134 & 15 & 49 & 286,858 \\ 4 & 164 & 49 & 29 & 329,191 \\ D2 & 185 & 26 & 38 & 148,659 \end{bmatrix} \quad T2 = \begin{bmatrix} 7.4 & 0 & 01 & 25 & 287,882 \\ 1 & 66 & 36 & 17 & 226,235 \\ 7.2 & 122 & 49 & 38 & 249,845 \\ D3 & 299 & 05 & 47 & 140,084 \\ 3 & 328 & 56 & 53 & 251,509 \end{bmatrix}$$

$$T3 = \begin{bmatrix} D3 & 0 & 04 & 29 & 147,530 \\ 4 & 235 & 16 & 55 & 313,015 \\ 7.4 & 243 & 46 & 27 & 148,678 \\ 2 & 331 & 52 & 09 & 251,509 \end{bmatrix} \quad T4 = \begin{bmatrix} D2 & 0 & 00 & 55 & 197,133 \\ 1 & 15 & 24 & 56 & 329,191 \\ 7.4 & 76 & 01 & 00 & 167,414 \\ 3 & 83 & 33 & 09 & 313,015 \end{bmatrix}$$

Таблица 3.5 – Модель результатов измерений внешней сети для 2 варианта построения внешней разбивочной сети

$T1 =$	$T2 =$																																																																																																														
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>D3</td><td>0</td><td>00</td><td>53</td><td>252,653</td></tr> <tr><td>T2</td><td>1</td><td>26</td><td>27</td><td>498,039</td></tr> <tr><td>3</td><td>11</td><td>25</td><td>10</td><td>386,479</td></tr> <tr><td>2</td><td>26</td><td>22</td><td>53</td><td>142,506</td></tr> <tr><td>7.4</td><td>31</td><td>32</td><td>05</td><td>429,528</td></tr> <tr><td>4</td><td>44</td><td>18</td><td>45</td><td>556,741</td></tr> <tr><td>T4</td><td>60</td><td>08</td><td>17</td><td>583,927</td></tr> <tr><td>D2</td><td>62</td><td>00</td><td>14</td><td>429,236</td></tr> <tr><td>1</td><td>73</td><td>16</td><td>53</td><td>298,257</td></tr> <tr><td>T3</td><td>90</td><td>58</td><td>58</td><td>400,722</td></tr> <tr><td>7.2</td><td>122</td><td>19</td><td>24</td><td>190,995</td></tr> </table>	D3	0	00	53	252,653	T2	1	26	27	498,039	3	11	25	10	386,479	2	26	22	53	142,506	7.4	31	32	05	429,528	4	44	18	45	556,741	T4	60	08	17	583,927	D2	62	00	14	429,236	1	73	16	53	298,257	T3	90	58	58	400,722	7.2	122	19	24	190,995	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>D2</td><td>0</td><td>00</td><td>16</td><td>471,338</td></tr> <tr><td>T3</td><td>13</td><td>28</td><td>52</td><td>636,734</td></tr> <tr><td>1</td><td>17</td><td>30</td><td>14</td><td>494,378</td></tr> <tr><td>3</td><td>22</td><td>46</td><td>51</td><td>135,163</td></tr> <tr><td>7.2</td><td>37</td><td>06</td><td>19</td><td>618,201</td></tr> <tr><td>2</td><td>43</td><td>13</td><td>38</td><td>373,685</td></tr> <tr><td>T1</td><td>52</td><td>28</td><td>52</td><td>498,039</td></tr> <tr><td>D3</td><td>53</td><td>56</td><td>55</td><td>245,544</td></tr> <tr><td>4</td><td>335</td><td>50</td><td>56</td><td>389,331</td></tr> <tr><td>T4</td><td>343</td><td>47</td><td>38</td><td>535,554</td></tr> <tr><td>7.4</td><td>352</td><td>53</td><td>28</td><td>249,730</td></tr> </table>	D2	0	00	16	471,338	T3	13	28	52	636,734	1	17	30	14	494,378	3	22	46	51	135,163	7.2	37	06	19	618,201	2	43	13	38	373,685	T1	52	28	52	498,039	D3	53	56	55	245,544	4	335	50	56	389,331	T4	343	47	38	535,554	7.4	352	53	28	249,730
D3	0	00	53	252,653																																																																																																											
T2	1	26	27	498,039																																																																																																											
3	11	25	10	386,479																																																																																																											
2	26	22	53	142,506																																																																																																											
7.4	31	32	05	429,528																																																																																																											
4	44	18	45	556,741																																																																																																											
T4	60	08	17	583,927																																																																																																											
D2	62	00	14	429,236																																																																																																											
1	73	16	53	298,257																																																																																																											
T3	90	58	58	400,722																																																																																																											
7.2	122	19	24	190,995																																																																																																											
D2	0	00	16	471,338																																																																																																											
T3	13	28	52	636,734																																																																																																											
1	17	30	14	494,378																																																																																																											
3	22	46	51	135,163																																																																																																											
7.2	37	06	19	618,201																																																																																																											
2	43	13	38	373,685																																																																																																											
T1	52	28	52	498,039																																																																																																											
D3	53	56	55	245,544																																																																																																											
4	335	50	56	389,331																																																																																																											
T4	343	47	38	535,554																																																																																																											
7.4	352	53	28	249,730																																																																																																											

$T3 =$	$T4 =$																																																																																																														
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>7.2</td><td>0</td><td>00</td><td>06</td><td>257,527</td></tr> <tr><td>T1</td><td>22</td><td>41</td><td>32</td><td>400,722</td></tr> <tr><td>2</td><td>43</td><td>27</td><td>09</td><td>363,180</td></tr> <tr><td>D3</td><td>54</td><td>38</td><td>47</td><td>477,319</td></tr> <tr><td>1</td><td>60</td><td>34</td><td>11</td><td>147,705</td></tr> <tr><td>3</td><td>71</td><td>39</td><td>56</td><td>503,821</td></tr> <tr><td>T2</td><td>74</td><td>09</td><td>01</td><td>636,734</td></tr> <tr><td>7.4</td><td>86</td><td>26</td><td>44</td><td>412,417</td></tr> <tr><td>4</td><td>110</td><td>02</td><td>59</td><td>405,415</td></tr> <tr><td>D2</td><td>105</td><td>46</td><td>32</td><td>209,484</td></tr> <tr><td>T4</td><td>131</td><td>16</td><td>04</td><td>315,842</td></tr> </table>	7.2	0	00	06	257,527	T1	22	41	32	400,722	2	43	27	09	363,180	D3	54	38	47	477,319	1	60	34	11	147,705	3	71	39	56	503,821	T2	74	09	01	636,734	7.4	86	26	44	412,417	4	110	02	59	405,415	D2	105	46	32	209,484	T4	131	16	04	315,842	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>T3</td><td>0</td><td>00</td><td>03</td><td>315.842</td></tr> <tr><td>7.2</td><td>21</td><td>43</td><td>49</td><td>522.848</td></tr> <tr><td>1</td><td>27</td><td>34</td><td>06</td><td>301.218</td></tr> <tr><td>D2</td><td>35</td><td>25</td><td>30</td><td>155.548</td></tr> <tr><td>T1</td><td>40</td><td>34</td><td>49</td><td>583.927</td></tr> <tr><td>2</td><td>50</td><td>14</td><td>08</td><td>472.135</td></tr> <tr><td>D3</td><td>66</td><td>08</td><td>24</td><td>507.764</td></tr> <tr><td>3</td><td>82</td><td>01</td><td>19</td><td>438.811</td></tr> <tr><td>7.4</td><td>85</td><td>24</td><td>55</td><td>219.650</td></tr> <tr><td>T2</td><td>93</td><td>11</td><td>45</td><td>535.554</td></tr> <tr><td>4</td><td>112</td><td>56</td><td>14</td><td>159.323</td></tr> </table>	T3	0	00	03	315.842	7.2	21	43	49	522.848	1	27	34	06	301.218	D2	35	25	30	155.548	T1	40	34	49	583.927	2	50	14	08	472.135	D3	66	08	24	507.764	3	82	01	19	438.811	7.4	85	24	55	219.650	T2	93	11	45	535.554	4	112	56	14	159.323
7.2	0	00	06	257,527																																																																																																											
T1	22	41	32	400,722																																																																																																											
2	43	27	09	363,180																																																																																																											
D3	54	38	47	477,319																																																																																																											
1	60	34	11	147,705																																																																																																											
3	71	39	56	503,821																																																																																																											
T2	74	09	01	636,734																																																																																																											
7.4	86	26	44	412,417																																																																																																											
4	110	02	59	405,415																																																																																																											
D2	105	46	32	209,484																																																																																																											
T4	131	16	04	315,842																																																																																																											
T3	0	00	03	315.842																																																																																																											
7.2	21	43	49	522.848																																																																																																											
1	27	34	06	301.218																																																																																																											
D2	35	25	30	155.548																																																																																																											
T1	40	34	49	583.927																																																																																																											
2	50	14	08	472.135																																																																																																											
D3	66	08	24	507.764																																																																																																											
3	82	01	19	438.811																																																																																																											
7.4	85	24	55	219.650																																																																																																											
T2	93	11	45	535.554																																																																																																											
4	112	56	14	159.323																																																																																																											

Модель результатов измерений внешней сети для 3 варианта построения внешней разбивочной сети имеет такие же значения, как и для 2 варианта (таблица 3.5), только отсутствуют визирования с каждой точки на точки стояния тахеометра, т.е. без связи между точками стояния тахеометра.

Далее был выполнен предрасчет точности элементов сети параметрическим способом для всех вариантов с помощью программы *Credo* и проведен анализ результатов. Основные параметры точности после предрасчета точности сетей приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Сведения о точности элементов сетей

Критерии оценивания	Варианты создания сетей		
	1	2	3
<i>Оценка точности взаимного планового положения пунктов сети</i>			
СКП расстояния (max), мм	1,0 (3-4)	0,8 (Т1-4)	0,8 (Т1-4)
СКП угла (max), сек	0,7	0,6	0,5
Относительная ошибка (max)	1/159000	1/454000	1/420000
<i>Оценка точности положения пунктов по результатам предрасчета точности</i>			
$m_{исх}$ (min), мм	1,0 (2)	1,0 (Т4)	1,0 (Т4)
$m_{исх}$ (max), мм (название наиболее слабого пункта сети)	1,2 (4)	1,4 (4)	1,3 (Т2)

Из сводной таблицы 3.6 видно, что СКП определения положения пунктов сети во всех вариантах не превышают 1,4 мм, как и было рассчитано выше. Наиболее слабым пунктом внешней сети оказался пункт Т4 для второго и первого вариантов, а в третьем варианте – Т2. СКП координат Т4, получены равными для всех вариантов, а именно:  $m_x = 0,9$  мм,  $m_y = 1,1$  мм. Наиболее слабой стороной сети оказалась Т1-4 длиной 556,74 м. Точность этой стороны во втором и третьем вариантах характеризуются СКП: вдоль стороны – 1 мм, поперек стороны – 0 мм в обоих вариантах, относительной погрешностью 1:68300 во втором варианте и 1:69400 – в третьем варианте.

Расчет показывает, что все три варианта отвечают заявленной точности построения внешней разбивочной сети. А предложенная технология создания внешней разбивочной сети способом свободного стационарирования, приводит благодаря минимизации погрешностей центрирования приборов к созданию сети высокой точности.

Таким образом, моделирование внешней разбивочной сети в программе *Credo* с использованием разных вариантов ее построения (в виде линейно-угловой сети, способом свободного стационарирования со связями между точками стояния и без них) показало, что все варианты отвечают заявленной точности. Делаем вывод, что созданная модель отвечает требованиям точности построения сетей и способ свободного стационарирования может быть использован для построения

внешней сети. Но перед полевыми работами необходимо выполнять проектирование с предрасчетом точности сети.

## 3.2 Проектирование внутренней разбивочной сети реакторного блока АЭС

### 3.2.1 Исходные данные

Проектирование внутренней разбивочной сети рассмотрим на следующем примере. За исходные пункты в этой сети примем осевые пункты D.2, D.3, 7.4, 7.2 (таблица 3.1).

В данном примере запроектировано восемь пунктов внутренней разбивочной сети: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8 (рисунок 3.3). Необходимо определить положение этих пунктов.

При закреплении на стенах марок (используют пластиковые отражатели), необходимо помнить, что их наклеивают в удобных местах для измерения (примерно на высоте 1.5 м) и надежных местах для сохранности. Для расчета точности проектируемой сети со схемы были взяты приближенные координаты марок (они приведены в таблице 3.7).

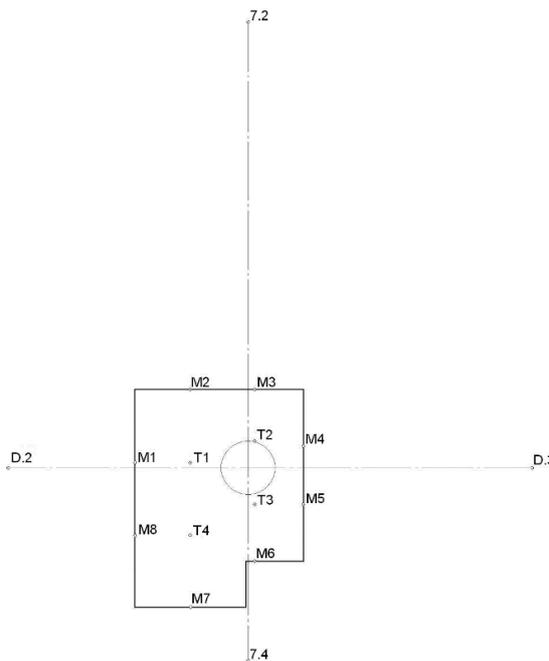


Рисунок 3.3 – Схема внутренней геодезической разбивочной сети

Таблица 3.7 – Список проектируемых пунктов внутренней разбивочной сети

Названия точек	x, м	y, м
M1	1804	1392,5
M2	1858	1433
M3	1858	1480
M4	1816	1515,5
M5	1773	1515,5
M6	1731	1480
M7	1697	1433
M8	1750	1392,5

Для определения координат пунктов проектируемой внутренней разбивочной сети используется электронный тахеометр и применяется способ свободного стационарирования. Измерения будут выполнены с четырех пунктов стояния тахеометра T1, T2, T3, T4. Ниже выполнен расчет точности проектируемой сети. Для расчета составлена модель измерений, примерно отражающая измеряемые величины в проектируемой сети.

При расчете принято, что тахеометр был установлен в точках T1, T2, T3, T4 (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Координаты точек стояния электронного тахеометра

Названия	x, м	y, м
T1	1804	1433
T2	1804	1480
T3	1773	1480
T4	1750	1433

### **3.2.2 Моделирование результатов измерений при создании внутренней разбивочной сети в программе *NW* профессора Коугия В. А.**

При создании внутренней разбивочной сети необходимо знать значения горизонтальных углов и расстояний, которые должны быть измерены в проектируемой сети. Для того, чтобы найти эти параметры, используют координаты исходных пунктов, приближенные координаты точек стояния тахеометров и наклеенные марки. Результаты расчета точности приведены ниже в таблице 3.9.

В этой таблице есть 4 блока с названиями Tah1, Tah2, Tah3, Tah4. В этих блоках представлена модель результатов тахеометрических измерений в точках стояния Т1, Т2, Т3, Т4 соответственно. В каждом блоке есть 5 столбцов, в которых представлены значения идентично, как и для внешней сети.

Таблица 3.9 – Модель результатов измерений

Tah1 =	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>"M2"</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>54</td></tr> <tr><td>"7.2"</td><td>7</td><td>20</td><td>38.993</td><td>328.697</td></tr> <tr><td>"D.2"</td><td>268</td><td>16</td><td>38.789</td><td>133.068</td></tr> <tr><td>"D.3"</td><td>90</td><td>55</td><td>8.251</td><td>249.405</td></tr> <tr><td>"7.4"</td><td>164</td><td>0</td><td>17.884</td><td>152.373</td></tr> <tr><td>"M1"</td><td>270</td><td>0</td><td>0</td><td>40.5</td></tr> <tr><td>"M3"</td><td>41</td><td>2</td><td>7.243</td><td>71.589</td></tr> <tr><td>"M4"</td><td>81</td><td>43</td><td>26.786</td><td>83.368</td></tr> <tr><td>"M5"</td><td>110</td><td>35</td><td>38.725</td><td>88.132</td></tr> <tr><td>"M6"</td><td>147</td><td>13</td><td>30.442</td><td>86.822</td></tr> <tr><td>"M7"</td><td>180</td><td>0</td><td>0</td><td>107</td></tr> <tr><td>"M8"</td><td>216</td><td>52</td><td>11.632</td><td>67.5</td></tr> </table>	"M2"	0	0	0	54	"7.2"	7	20	38.993	328.697	"D.2"	268	16	38.789	133.068	"D.3"	90	55	8.251	249.405	"7.4"	164	0	17.884	152.373	"M1"	270	0	0	40.5	"M3"	41	2	7.243	71.589	"M4"	81	43	26.786	83.368	"M5"	110	35	38.725	88.132	"M6"	147	13	30.442	86.822	"M7"	180	0	0	107	"M8"	216	52	11.632	67.5	Tah2 =	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>"M3"</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>38</td></tr> <tr><td>"7.2"</td><td>359</td><td>4</td><td>44.745</td><td>310.04</td></tr> <tr><td>"D.2"</td><td>263</td><td>39</td><td>36.316</td><td>181.116</td></tr> <tr><td>"D.3"</td><td>95</td><td>38</td><td>38.639</td><td>203.359</td></tr> <tr><td>"7.4"</td><td>181</td><td>46</td><td>2.111</td><td>162.551</td></tr> <tr><td>"M1"</td><td>259</td><td>38</td><td>15.147</td><td>88.951</td></tr> <tr><td>"M2"</td><td>308</td><td>57</td><td>21.268</td><td>60.44</td></tr> <tr><td>"M4"</td><td>96</td><td>25</td><td>43.492</td><td>35.725</td></tr> <tr><td>"M5"</td><td>142</td><td>56</td><td>7.981</td><td>58.9</td></tr> <tr><td>"M6"</td><td>180</td><td>0</td><td>0</td><td>89</td></tr> <tr><td>"M7"</td><td>200</td><td>54</td><td>45.172</td><td>131.674</td></tr> <tr><td>"M8"</td><td>231</td><td>20</td><td>24.69</td><td>112.055</td></tr> </table>	"M3"	0	0	0	38	"7.2"	359	4	44.745	310.04	"D.2"	263	39	36.316	181.116	"D.3"	95	38	38.639	203.359	"7.4"	181	46	2.111	162.551	"M1"	259	38	15.147	88.951	"M2"	308	57	21.268	60.44	"M4"	96	25	43.492	35.725	"M5"	142	56	7.981	58.9	"M6"	180	0	0	89	"M7"	200	54	45.172	131.674	"M8"	231	20	24.69	112.055
"M2"	0	0	0	54																																																																																																																							
"7.2"	7	20	38.993	328.697																																																																																																																							
"D.2"	268	16	38.789	133.068																																																																																																																							
"D.3"	90	55	8.251	249.405																																																																																																																							
"7.4"	164	0	17.884	152.373																																																																																																																							
"M1"	270	0	0	40.5																																																																																																																							
"M3"	41	2	7.243	71.589																																																																																																																							
"M4"	81	43	26.786	83.368																																																																																																																							
"M5"	110	35	38.725	88.132																																																																																																																							
"M6"	147	13	30.442	86.822																																																																																																																							
"M7"	180	0	0	107																																																																																																																							
"M8"	216	52	11.632	67.5																																																																																																																							
"M3"	0	0	0	38																																																																																																																							
"7.2"	359	4	44.745	310.04																																																																																																																							
"D.2"	263	39	36.316	181.116																																																																																																																							
"D.3"	95	38	38.639	203.359																																																																																																																							
"7.4"	181	46	2.111	162.551																																																																																																																							
"M1"	259	38	15.147	88.951																																																																																																																							
"M2"	308	57	21.268	60.44																																																																																																																							
"M4"	96	25	43.492	35.725																																																																																																																							
"M5"	142	56	7.981	58.9																																																																																																																							
"M6"	180	0	0	89																																																																																																																							
"M7"	200	54	45.172	131.674																																																																																																																							
"M8"	231	20	24.69	112.055																																																																																																																							
Tah3 =	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>"M3"</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>85</td></tr> <tr><td>"7.2"</td><td>359</td><td>12</td><td>1.146</td><td>357.035</td></tr> <tr><td>"D.2"</td><td>278</td><td>31</td><td>49.411</td><td>182.022</td></tr> <tr><td>"D.3"</td><td>82</td><td>24</td><td>2.327</td><td>204.166</td></tr> <tr><td>"7.4"</td><td>182</td><td>29</td><td>8.825</td><td>115.583</td></tr> <tr><td>"M1"</td><td>289</td><td>30</td><td>30.632</td><td>92.829</td></tr> <tr><td>"M2"</td><td>331</td><td>3</td><td>35.954</td><td>97.129</td></tr> <tr><td>"M4"</td><td>39</td><td>32</td><td>32.807</td><td>55.761</td></tr> <tr><td>"M5"</td><td>90</td><td>0</td><td>0</td><td>35.5</td></tr> <tr><td>"M6"</td><td>180</td><td>0</td><td>0</td><td>42</td></tr> <tr><td>"M7"</td><td>211</td><td>44</td><td>0.669</td><td>89.359</td></tr> <tr><td>"M8"</td><td>255</td><td>16</td><td>21.195</td><td>90.472</td></tr> </table>	"M3"	0	0	0	85	"7.2"	359	12	1.146	357.035	"D.2"	278	31	49.411	182.022	"D.3"	82	24	2.327	204.166	"7.4"	182	29	8.825	115.583	"M1"	289	30	30.632	92.829	"M2"	331	3	35.954	97.129	"M4"	39	32	32.807	55.761	"M5"	90	0	0	35.5	"M6"	180	0	0	42	"M7"	211	44	0.669	89.359	"M8"	255	16	21.195	90.472	Tah4 =	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>"M2"</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>108</td></tr> <tr><td>"7.2"</td><td>6</td><td>18</td><td>34.647</td><td>382.316</td></tr> <tr><td>"D.2"</td><td>290</td><td>36</td><td>7.581</td><td>142.095</td></tr> <tr><td>"D.3"</td><td>78</td><td>39</td><td>44.52</td><td>254.336</td></tr> <tr><td>"7.4"</td><td>155</td><td>34</td><td>47.99</td><td>101.56</td></tr> <tr><td>"M1"</td><td>323</td><td>7</td><td>48.368</td><td>67.5</td></tr> <tr><td>"M3"</td><td>23</td><td>31</td><td>4.662</td><td>117.784</td></tr> <tr><td>"M4"</td><td>51</td><td>20</td><td>24.69</td><td>105.652</td></tr> <tr><td>"M5"</td><td>74</td><td>25</td><td>19.827</td><td>85.646</td></tr> <tr><td>"M6"</td><td>112</td><td>0</td><td>40.62</td><td>50.695</td></tr> <tr><td>"M7"</td><td>180</td><td>0</td><td>0</td><td>53</td></tr> <tr><td>"M8"</td><td>270</td><td>0</td><td>0</td><td>40.5</td></tr> </table>	"M2"	0	0	0	108	"7.2"	6	18	34.647	382.316	"D.2"	290	36	7.581	142.095	"D.3"	78	39	44.52	254.336	"7.4"	155	34	47.99	101.56	"M1"	323	7	48.368	67.5	"M3"	23	31	4.662	117.784	"M4"	51	20	24.69	105.652	"M5"	74	25	19.827	85.646	"M6"	112	0	40.62	50.695	"M7"	180	0	0	53	"M8"	270	0	0	40.5
"M3"	0	0	0	85																																																																																																																							
"7.2"	359	12	1.146	357.035																																																																																																																							
"D.2"	278	31	49.411	182.022																																																																																																																							
"D.3"	82	24	2.327	204.166																																																																																																																							
"7.4"	182	29	8.825	115.583																																																																																																																							
"M1"	289	30	30.632	92.829																																																																																																																							
"M2"	331	3	35.954	97.129																																																																																																																							
"M4"	39	32	32.807	55.761																																																																																																																							
"M5"	90	0	0	35.5																																																																																																																							
"M6"	180	0	0	42																																																																																																																							
"M7"	211	44	0.669	89.359																																																																																																																							
"M8"	255	16	21.195	90.472																																																																																																																							
"M2"	0	0	0	108																																																																																																																							
"7.2"	6	18	34.647	382.316																																																																																																																							
"D.2"	290	36	7.581	142.095																																																																																																																							
"D.3"	78	39	44.52	254.336																																																																																																																							
"7.4"	155	34	47.99	101.56																																																																																																																							
"M1"	323	7	48.368	67.5																																																																																																																							
"M3"	23	31	4.662	117.784																																																																																																																							
"M4"	51	20	24.69	105.652																																																																																																																							
"M5"	74	25	19.827	85.646																																																																																																																							
"M6"	112	0	40.62	50.695																																																																																																																							
"M7"	180	0	0	53																																																																																																																							
"M8"	270	0	0	40.5																																																																																																																							

### 3.2.3 Предрасчет точности внутренней разбивочной сети

После создания сети по предложенной проектируемой технологии, где координаты исходных пунктов были приняты безошибочными, выполнен расчет точности в компьютерной программе *NW* профессора В. А. Коугия. Для расчета были взяты паспортные характеристики электронного тахеометра с СКП равными: для направлений – 2", для расстояний – 2 мм. Результаты расчета следующие.

СКП определения координат всех пунктов проектируемой сети не превышают 1 мм. Наиболее слабым пунктом сети оказался пункт М7. СКП его координат не превышают 1 мм и тогда  $m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = 1 \text{ мм}$ . Относительная погрешность наиболее слабой стороны сети МЗ–Т2 составляет 1/42700, а СКП направления – 1,9".

Анализируя результаты расчета точности, можно сделать вывод, что при создании внутренней разбивочной сети с использованием способа свободного стационарирования предложенная технология очень проста в исполнении. А благодаря минимизации погрешностей центрирования приборов (так как прибор устанавливается в любом удобном для измерений месте) и отсутствии редуций визирных целей (так как визирование идет на ОП), приводит к созданию сети высокой точности.

Фрагмент распечатки результатов вычислений по компьютерной программе *NW* профессора Коугия В. А. показан в Приложении А.

### **3.3 Экспериментальные исследования по приведению внецентренных спутниковых измерений к центрам пунктов**

Предложенная в главе 2 методика по *приведению к центрам пунктов спутниковых измерений на основе преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами* прошла экспериментальные исследования. Для этого на местности с благоприятными условиями радиовидимости на различных удалениях между центром пункта *С* и точкой установки спутникового приемника *І* выполнены спутниковые измерения приемниками *Sokkia GRX2* в течение 2-х часов в точках *С*, *І* и *М*. С помощью электронного тахеометра *Sokkia CX105* непосредственным измерением определены элементы центрировки  $l$  и  $\theta$ , а нивелиром *Dini 0.3* – превышение  $h_{IC}$ . Используя пространственные геоцентрические экваториальные прямоугольные координаты точки *І* (рисунок 2.6 и формулы (2.16), (2.17) и элементы приведения вычислены аналогичные координаты точки *С* по формулам (2.19) и (2.20), которые сравнены с

непосредственно измеренными координатами. К центрам пунктов по элементам центрировки приведены также результаты разностно-координатных измерений, которые также сравнены с непосредственно измеренными разностями координат.

Результаты представлены ниже в таблицах 3.10 и 3.11.

Таблица 3.10 – Приведение координат к центрам пунктов

пункт	Измеренные координаты		$\ell$ , м $\theta$ $h_{IC}$ , м	Вычисленные	Измеренные	$\Delta =$ (5) – (6), м
	$X_I$ $Y_I$ , м $Z_I$	$X_M$ $Y_M$ , м $Z_M$		координаты	координаты	
1	2	3	4	5	6	7
C1	2766335,593	2766453,759	29,654	2766316,425	2766316,425	0,000
	1617356,873	1617444,936	101°07'04"	1617378,578	1617378,579	– 0,001
	5496256,194	5496171,078	3,507	5496263,484	5496263,483	0,001
C2	2766335,593	2766453,759	119,547	2766443,031	2766443,027	0,004
	1617356,873	1617444,936	221°42'40"	1617344,743	1617344,738	0,005
	5496256,194	5496171,078	– 0,731	5496205,186	5496205,177	0,009

Таблица 3.11 – Приведение к центрам пунктов разностей координат

пункт	Измеренные	$\ell$ , м $\theta$ $h_{IC}$ , м	Вычисленные	Измеренные	$\Delta = (4) – (5)$ м
	разности координат		разности координат	разности координат	
1	$X_M - X_I$ $Y_M - Y_I$ , м $Z_M - Z_I$	3	$\Delta X_{IC}$ $\Delta Y_{IC}$ , м $\Delta Z_{IC}$	$\Delta X_{IC}$ $\Delta Y_{IC}$ , м $\Delta Z_{IC}$	6
C1	118,166	29,654	– 19,168	– 19,168	0,000
	88,063	101°07'04"	21,705	21,706	– 0,001
	–85,116	3,507	7,290	7,289	0,001
C2	118,166	119,547	107,438	107,434	0,004
	88,063	221°42'40"	– 12,130	–12,135	0,005
	–85,116	–0,731	– 51,008	–51,017	0,009

Если предположить, что средняя квадратическая погрешность определения планового положения базовой линии составляет 5 мм, а высотного положения –

10 мм, то можно заключить, что экспериментальные исследования подтвердили корректность предложенной методики.

### Оценка точности определения координат и положения центра пункта

По результатам проведенного эксперимента была выполнена оценка точности определения координат и положения центра пункта  $C$ . Для решения задачи:

– находим геодезические координаты точки стояния тахеометра  $B_I = 59^\circ 55' 29,8617''$  и  $L_I = 30^\circ 18' 57,4341''$ ;

– зная геодезический азимут направления  $IM$   $A_{IM} = 174^\circ 28' 43''$  и угловые элементы центрировки  $\theta$  вычисляем геодезические азимуты направлений  $IC_1$  и  $IC_2$  по формуле  $A_{IC} = A_{IM} + 360^\circ - \theta$ , получаем  $A_{IC_1} = 73^\circ 21' 39''$  и  $A_{IC_2} = 212^\circ 46' 03''$ ;

– принимаем  $m_l = 2$  мм,  $m_{A_{IC}} = 5''$ ,  $m_{h_{IC}} = 1$  мм, тогда при  $l_1 = 29,654$  м и  $l_2 = 119,547$  м, а также используя полученные выше значения  $B$ ,  $L$ ,  $l$ ,  $A_{IC}$  подставим их в формулу (2.24), получим  $m_{X_C}$ ,  $m_{Y_C}$ ,  $m_{Z_C}$ . Погрешность положения точки  $C$  найдем по формуле (2.25).

Полученные результаты представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Вычисление СКП координат и пространственного положения точки  $C$

$l$ , м	29,654	119,547
$A_{IC}$	$73^\circ 21' 39''$	$212^\circ 46' 03''$
$m_{X_C}$ , мм	1,6	2,2
$m_{Y_C}$ , мм	1,4	2,4
$m_{Z_C}$ , мм	1,0	1,7
$M_C$ , мм	2,35	3,66

Анализ таблицы 3.12 показал, что все приведенные формулы в главе 2 и выполнение полевых измерений выполнены корректно. А также подтверждается

вывод, что при увеличении значений  $l$  увеличиваются значения погрешностей  $m_{X_c}$ ,  $m_{Y_c}$ ,  $m_{Z_c}$ .

### **3.4 Натурные исследования по влиянию вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования при коротких расстояниях (200 м)**

#### **3.4.1 Построение вертикального базиса с оценкой точности для определения коэффициента рефракции**

Очевидно, что при построении вертикального базиса необходимо принимать меры для определения превышения между точками вертикального базиса как можно с меньшей СКП. Как было сказано в главе 2, под *вертикальным базисом* будем понимать геодезическое построение, состоящее из закрепленных на вертикальной поверхности точек на одной отвесной линии и точек на местности, превышения между которыми определены с высокой точностью.

Для реальных условий строительной площадки эту погрешность можно принять равной 0,5 – 0,7 мм. Предлагается для создания базиса использовать идею определения превышений "во всех комбинациях". Пример вертикального базиса приведен на рисунок 3.4.

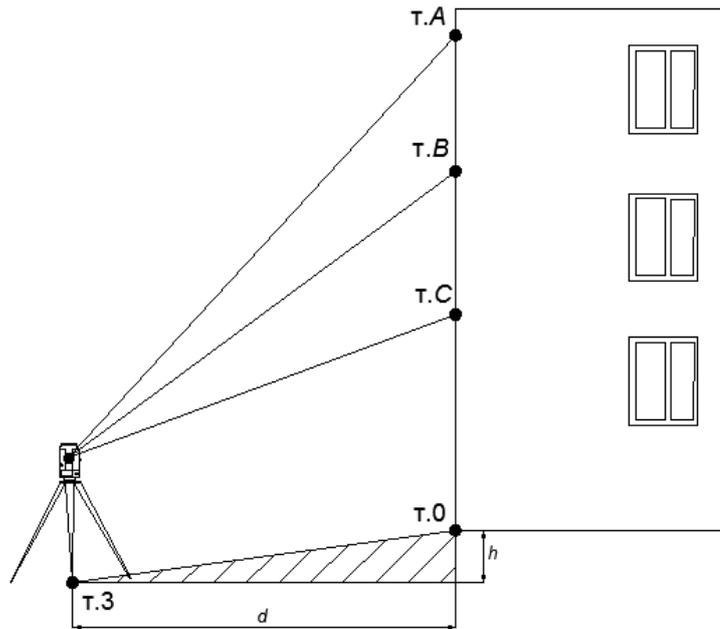


Рисунок 3.4 – Схема вертикального базиса

Для создания базиса на стене здания на одной отвесной линии в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$  были закреплены три отражающие пленки ОП, а на поверхности земли закреплена  $t$ .  $O$  (рисунок 3.4), и разными способами измерены расстояния  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_7$  (рисунок 3.5), а превышение  $h$  определено геометрическим нивелированием.

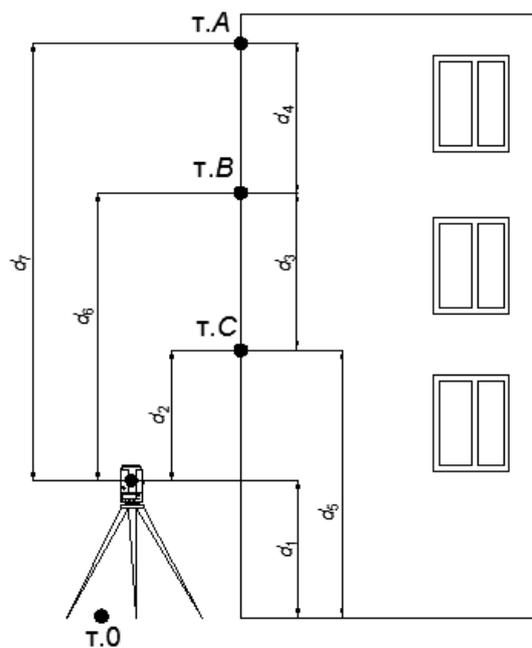


Рисунок 3.5 – Схема измерения вертикальных расстояний

Высота прибора  $d_1$  измерена 3 раза способом передачи отметки с помощью нивелира с СКП 0,1 мм (здесь и далее СКП вычислены по формуле Бесселя);  $d_2$  – расстояние от визирной оси прибора до т.  $C$  (измерено 9 раз электронным тахеометром с насадкой диагонального проектирования с СКП 0,5 мм);  $d_3$  – расстояние от т.  $C$  до т.  $B$ ;  $d_4$  – расстояние от т.  $B$  до т.  $A$  (расстояния  $d_3$  и  $d_4$  измерены по 5 раз каждое компарированной рулеткой с СКП 0,3 мм);  $d_5$  – расстояние от т.  $O$  до т.  $C$  измерено 4 раза компарированной рулеткой с СКП 0,6 мм; а расстояния  $d_6$ ,  $d_7$  – от визирной оси прибора до точек  $B$ ,  $A$  измерены по 9 раз электронным тахеометром с насадкой вертикального проектирования с СКП 0,5 и 0,3 мм соответственно. Измерения расстояний до уравнивания получились следующие:  $d_1 = 1,7739$  м;  $d_2 = 8,8295$  м;  $d_3 = 8,5640$  м;  $d_4 = 8,3283$  м;  $d_5 = 10,6053$  м;  $d_6 = 17,3936$  м;  $d_7 = 25,7198$  м.

Превышения между точкой т.  $O$  и точками  $A$ ,  $B$ ,  $C$  получены после уравнивания коррелятным способом (алгоритм описан в главе 2). Для этого были составлены три условных уравнения связи:

$$d'_1 + d'_2 - d'_5 = 0,$$

$$d'_2 + d'_3 - d'_6 = 0,$$

$$d'_2 + d'_3 + d'_4 - d'_7 = 0,$$

где  $d'_i$  – уравненные значения измеренных величин.

Запишем условные уравнения поправок в матричном виде (формула (2.43)) и

найдем  $A$  и  $W$ :  $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ ,  $W^T = [-1,0 \quad -0,1 \quad 2,0]$  мм.

После реализации формул (2.44), вычислили вектор коррелят  $K$  и далее вычислили вектор поправок к результатам измерений по формуле (2.45).

Получили:  $V^T = [0,04 \quad -0,10 \quad -0,03 \quad -1,39 \quad -1,05 \quad -0,23 \quad 0,48]$  мм.

Для оценки точности полученных результатов была вычислена СКП единицы веса по формуле (2.46), она оказалась равной 1,95 мм, дальше находилась обратная весовая матрица уравненных значений измеренных величин по формуле (2.47).

СКП расстояний вычислялись по формуле  $\frac{\mu}{\sqrt{Q_x}}$ . Они составили  $m_{d'_1} = 0,29$ ;  $m_{d'_2} = 0,76$ ;  $m_{d'_3} = 0,24$ ;  $m_{d'_4} = 0,92$ ;  $m_{d'_5} = 0,79$ ;  $m_{d'_6} = 0,76$ ;  $m_{d'_7} = 0,75$  мм.

Для того, чтобы определить погрешности превышений точек  $C$ ,  $B$ ,  $A$  над точкой  $0$ , была составлена вектор-функция [79]:

$$\varphi = \begin{bmatrix} h_C \\ h_B \\ h_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d'_5 \\ d'_1 + d'_6 \\ d'_1 + d'_7 \end{bmatrix}$$

и найдена обратная весовая матрица вектор - функции по формуле (2.48). В результате имеем:

$$Q_\varphi = \begin{bmatrix} 0,10 & 0,10 & 0,03 \\ 0,10 & 0,10 & 0,03 \\ 0,03 & 0,03 & 0,10 \end{bmatrix}.$$

Далее найдена СКП уравненного превышения т.  $C$  над т.  $0$   $m_{h_c} = \mu \cdot \sqrt{Q_{h_c}} = 1,95 \sqrt{0,10} = 0,62$  мм. Аналогично вычислены СКП превышений т.  $B$  и т.  $A$  над точкой  $0$ , которые равняются 0,62 и 0,63 мм соответственно.

Превышение между т.3 и т.0 (рисунок 3.3) определялось геометрическим нивелированием цифровым нивелиром *Trimble DiNi 0.3* с СКП измерения превышений 0,3 мм/км двойного хода. Т.к. длина хода составила 161 м, то СКП этого превышения будет выражаться формулой  $m_h = 0,3 \sqrt{0,161}$  и составит 0,12 мм. И тогда СКП превышения т.  $C$  над т.3 может быть вычислено по формуле  $m_C = \sqrt{m_{h_c}^2 + m_h^2} = \sqrt{0,62^2 + 0,12^2} = 0,63$  мм. Аналогично определяются СКП превышения точек  $B$  и  $A$ :  $m_B = 0,63$  мм,  $m_A = 0,64$  мм.

Таким образом, превышения между т.3 и точками на стене  $A$ ,  $B$ ,  $C$  вертикального базиса определены с СКП на уровне 0,6 мм.

### **3.4.2 Определение коэффициента вертикальной рефракции по результатам геодезических измерений на короткие расстояния (до 200 м) на вертикальном базисе**

В настоящее время для геодезического сопровождения строительства применяют, в основном, электронные тахеометры. Основным фактором, препятствующим реализации точностных возможностей современных электронных тахеометров, является рефракция – неоднородность атмосферы по плотности. Перед полевыми работами необходимо выполнить предрасчет точности влияния разных аргументов на конечный результат, т. е. на определение превышений.

Анализ формулы (1.1) показывает, что на точность определения превышений влияют несколько аргументов, один из которых – зенитные расстояния. Погрешности измерения зенитных расстояний в свою очередь делятся на погрешности нерелракционного и рефракционного происхождения [34].

Величина нерелракционных погрешностей зависит от применяемых приборов и методов измерения. Эта группа достаточно легко поддается изучению. Основными источниками погрешностей нерелракционного происхождения являются погрешности визирования, наклона горизонтальной оси трубы, наклона вертикальной оси вращения прибора, изменение места зенита в результате температурных воздействий и др.

Величина рефракционных погрешностей зависит от условий, в которых проводят измерения и вычисляется, как правило, косвенным путем через измеренные аргументы (температуру, давление, влажность, геодезические измерения и др.).

Ниже описывается эксперимент, который направлен на определение погрешностей рефракционного происхождения по результатам геодезических измерений, а именно определение поправки за влияние рефракции в течении суток.

#### **Экспериментальные исследования (*суточный ход*)**

Для определения суточного хода рефракции на вертикальном базисе были проведены (рисунок 3.4) полевые экспериментальные исследования. Измерение

зенитных расстояний и наклонных расстояний производились электронным тахеометром *Leica Viva TS 16 MR500* с СКП измерения углов 1" и расстояний ( $2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} D$ ), где  $D$  – измеренное расстояние в мм.

Измерения выполнялись с 8:20 ч. 26 июня до 4:40 ч. 27 июня 2019 г. (всего выполнено 19 циклов измерений) при перепаде температуры в  $3^\circ$  (от  $+16^\circ \text{ C}$  до  $+19^\circ \text{ C}$ ). Давление оставалось постоянным (764 мм рт. ст.), а сила ветра – менялась.

В таблице 3.13 представлены значения  $\Delta z = z_{\text{измер}} - z_{\text{теор}}$  и  $\Delta h = h_{\text{триг.н}} - h_{\text{теор}}$ , а результаты значений коэффициентов рефракции получены по различным формулам: (2.39) – значения  $k$ ; (2.41) –  $k(z)$  и (2.42) –  $k(h)$  для точки  $C$ . На графике (рисунок 3.6) представлены значения коэффициентов рефракции, вычисленные в программе для ЭВМ [57] (Приложение В), при выполнении измерений на точку  $C$ .

Таблица 3.13 – Суточные изменения коэффициентов рефракции на т.  $C$   
(высота 10,6423 м)

Номер цикла	Время измерений	$\Delta z''$	$\Delta h$ , мм	$k$	$k(z)$	$k(h)$
1	8:20	1,9	-0,5	0,73	0,73	0,73
2	9:00	3,4	0,7	1,35	1,30	1,34
3	10:30	4,4	1,4	1,66	1,69	1,65
4	12:30	1,9	-0,5	0,75	0,73	0,75
5	13:05	2,4	-0,1	0,95	0,92	0,95
6	15:05	0,9	-1,3	0,34	0,34	0,34
7	16:30	0,4	-1,7	0,17	0,15	0,17
8	17:00	1,9	-0,4	0,77	0,73	0,77
9	18:30	-1,6	-3,2	-0,58	-0,61	-0,58
10	18:50	0,4	-1,7	0,18	0,15	0,17
11	19:30	1,4	-0,9	0,55	0,54	0,54
12	21:05	-0,1	-2,1	-0,03	-0,04	-0,04
13	22:35	-1,6	-3,3	-0,63	-0,61	-0,64
14	0:30	3,4	0,7	1,33	1,30	1,33
15	1:50	1,4	-0,9	0,55	0,54	0,54
16	2:30	0,4	-1,7	0,17	0,15	0,16
17	3:00	3,4	0,8	1,35	1,30	1,35
18	3:20	2,9	0,3	1,13	1,11	1,12
19	4:40	0,9	-1,3	0,35	0,34	0,35

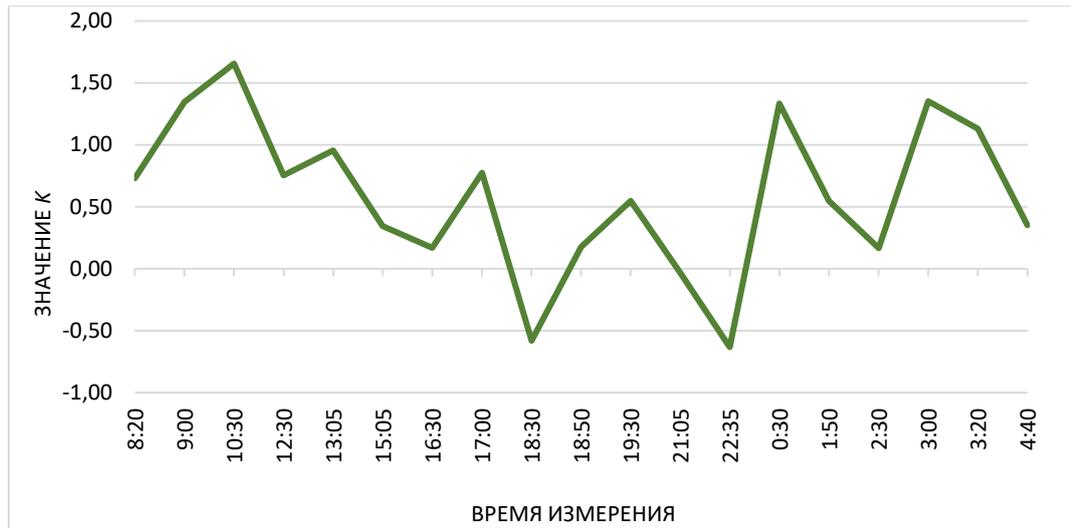


Рисунок 3.6 – График изменения коэффициентов рефракции на т. С

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- значения коэффициентов рефракции, вычисленные по предложенным формулам (2.39), (2.41), (2.42) практически совпадают и значит, все формулы корректны и могут применяться как независимые, так и взаимозаменяемые;
- утром и ночью значения коэффициентов рефракции имеют значения положительные, а днем и вечером – отрицательные.

Проведенные натурные эксперименты показывают изменение коэффициента рефракции, но для обработки результатов полевых измерений необходимо знать значения рефракции. По результатам суточного эксперимента найдем значения поправки за влияние рефракции, которые вычисляются через значения зенитных расстояний.

Вычислив  $r$  по приведенной выше формуле для данных суточного эксперимента (значения  $k$  подставим, которое вычислено по формуле (2.39)).

Полученные результаты представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Вычисление значение поправки за влияние рефракции

Номер цикла	Время измерений	$r$ (мм)	Номер цикла	Время измерений	$r$ (мм)
1	8:20	1,5	11	19:30	1,1
2	9:00	2,7	12	21:05	-0,1
3	10:30	3,4	13	22:35	-1,3
4	12:30	1,5	14	0:30	2,7
5	13:05	1,9	15	1:50	1,1
6	15:05	0,7	16	2:30	0,3
7	16:30	0,3	17	3:00	2,7
8	17:00	1,5	18	3:20	2,3
9	18:30	-1,3	19	4:40	0,7
10	18:50	0,3			

После анализа полученных результатов таблицы 3.14 можно сделать следующие выводы. Величина поправки за рефракцию за сутки не превышает 3,4 мм, а значит если при выполнении геодезических работ поправку за рефракцию вычислять с общепринятым коэффициентом рефракции  $k = 0,14$ , то  $r = 0,3$  мм, а это показывает, что погрешность результатов геодезических измерений составит 3 мм. Поэтому необходимо определять коэффициент рефракции на созданном вертикальном базисе в режиме реального времени и дифференцированно вводить поправки за рефракцию.

В главе 2 было вычислено, каким изменением коэффициента рефракции можно пренебречь (при полученном влиянии рефракции  $r = 0,7$  мм и  $d = 200$  м получили  $k = 0,2$ ). После проведенного эксперимента можно сделать вывод, что на строительной площадке при расстояниях от тахеометра до визирных целей до 200 м для повышения точности результатов определять  $k$  каждые полчаса. Изменение  $\Delta k$  в течении получаса не должно превышать 0,2, тогда изменение значений  $k$  не будет влиять на результаты нивелирования. Если  $k$  будет превышать это значение, то в результаты измерений необходимо будет вводить поправки за рефракцию.

### 3.5 Выводы по главе 3

1. Выполнен предрасчет точности внешней разбивочной сети при строительстве реакторного блока АЭС по трем вариантам построения (в виде

линейно-угловой сети, способом свободного стационарирования со связями между точками стояния и без них) параметрическим способом в программе *Credo*. Расчет показал, что СКП определения положения пунктов сети во всех вариантах не превышают 1,4 мм. Сделан вывод, что созданная модель отвечает требованиям точности построения сетей и способ свободного стационарирования может быть использован для построения внешней сети.

2. Выполнено проектирование внутренней разбивочной сети реакторного блока АЭС способом свободного стационарирования с опорой на точки внешней сети. Выполнен расчет точности сети в компьютерной программе *NW* профессора Коугия В.А. Результаты расчета – следующие.

Для запроектированной сети СКП определения координат всех пунктов не превышают 1 мм. Пункт М7 оказался наиболее слабым пунктом сети и СКП его координат составляют:  $m_x = 1$  мм,  $m_y = 1$  мм и  $m_{xy} = 1$  мм. Сторона сети М3-Т2 длиной 38 м – это наиболее слабая сторона сети и ее точность характеризуется относительной погрешностью  $1/42700$ .

Расчеты показывают, что усовершенствованная методика проектирования внутренней разбивочной сети, благодаря минимизации погрешностей центрирования приборов и редуций визирных целей, приводит к созданию сети высокой точности.

3. По разработанной во 2 главе методике приведения к центрам пунктов результатов спутниковых измерений, основанной на использовании преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами, проведена экспериментальная проверка. Выполненный эксперимент подтвердил корректность предложенной методики, т.к. полученные результаты получились меньше, чем принятые СКП определения планового положения базовой линии – 5 мм, а высотного положения – 10 мм.

4. По предложенной во 2 главе методике, построен вертикальный базис, в основу которого положена идея выполнения измерений «во всех комбинациях». Выполнены измерения на вертикальном базисе и после уравнивания коррелятным способом превышения вертикального базиса определены с СКП на уровне 0,6 мм.

5. Проведен эксперимент по определению коэффициента рефракции в течении суток (с 26 по 27 июня 2019 г.), он показал, что значения коэффициентов рефракции в период проведения эксперимента менялись в пределах:

- на высоте визирного луча 10,642 м от -0,63 до +1,69;
- утром и ночью значения коэффициентов рефракции имеют значения положительные, а днем и вечером – отрицательные.

6. Предложено на строительной площадке на расстояниях от тахеометра до визирных целей до 200 м для повышения точности результатов превышения определять коэффициент рефракции  $k$  каждые полчаса. Изменение  $\Delta k$  в течении полчаса не должно превышать 0,2, тогда изменение значений  $k$  не будет влиять на результаты нивелирования. Если  $k$  будет превышать это значение, то в результаты измерений необходимо будет вводить поправки за рефракцию.

7. По вычисленным значениям поправки за рефракцию  $r$  для данных суточного эксперимента были сделаны следующие выводы, что величина поправки за рефракцию за сутки не превышает 3,4 мм, а значит если при выполнении геодезических работ поправку за рефракцию вычислять с общепринятым коэффициентом рефракции  $k = 0,14$ , то  $r = 0,3$  мм, а это показывает, что погрешность результатов геодезических измерений составит 3 мм. Поэтому необходимо определять коэффициент рефракции на созданном вертикальном базисе в режиме реального времени и дифференцированно вводить поправки за рефракцию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – совершенствование методов производства высокоточных инженерно-геодезических измерений для геодезического обеспечения процесса строительства и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов (на примере АЭС).

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

– усовершенствована методика проектирования внешней разбивочной сети особо опасных и технически сложных объектов. К этапам проектирования отнесены: составление электронной схемы сети в компьютерной программе, назначение СКП окончательных значений результатов измерений, определение по алгоритму параметрического способа уравнивания СКП оцениваемых величин, анализ проекта;

– предложено построение внутренних разбивочных сетей особо опасных и технически сложных объектов выполнять без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты, а использовать способ свободного стационарирования.

– обоснованы требования к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования на основе заявленной в нормативной документации предельной погрешности взаимного положения выносимых в натуру зданий и сооружений в плане (5 мм). Рассчитаны: СКП взаимного положения точек (2 мм); СКП положения точек внутренней сети (2 мм), которая состоит из СКП определения положения точек внешней сети ( $\leq 0,9$  мм) и СКП определения положения точек внутренней сети способом свободного стационарирования;

– рассчитана точность способа свободного стационарирования (2 мм), которая складывается из СКП определения положения станции обратной засечкой (1,4 мм) и СКП определения положения точки сети относительно станции способом полярных координат (1,4 мм).

– предложена методика приведения к центрам пунктов результатов внецентренных спутниковых измерений, основанная на использовании преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами. К

линейному и угловому элементам центрировки, как это выполняется при построении плановых геодезических сетей, предложено добавить еще превышение между точкой стояния прибора и центром пункта. Разработанная методика позволяет приводить к центрам пунктов как геоцентрические координаты, так и разности координат;

– разработан алгоритм оценки точности определения координат центра геодезического пункта на основе определения элементов центрировки и обоснованы требования к точности определения элементов центрировки;

– показано, что при высокоточных спутниковых измерениях необходимо вводить поправки за уклонение отвесных линий (в результаты угловых измерений при  $z$  в пределах  $60^\circ - 10^\circ$  и при  $l$  больше 10 м, а при определении превышения – при длине линии более 30 м);

– предложена методика создания вертикального базиса на основе способа «во всех комбинациях» и на экспериментальном примере показано, что СКП уравненных превышений на построенном вертикальном базисе, равны в среднем 0,6 мм;

– предложена методика определения коэффициента рефракции на вертикальном базисе (применяя геометрическое и тригонометрическое нивелирование);

– обобщены способы определения коэффициента вертикальной рефракции геодезическими методами (по результатам одностороннего тригонометрического нивелирования на эталонном вертикальном базисе, по разностям измеренных и истинных зенитных расстояний и по вычисленным и известным превышениям);

– проведен суточный эксперимент по определению коэффициента вертикальной рефракции, который показал, что на высоте визирного луча 10,642 м  $k$  меняется в пределах от +1,6 до -0,6; утром и ночью значения коэффициентов рефракции имеют значения положительные, а днем и вечером – отрицательные.

Перспективы развития темы диссертации связаны с совершенствованием методов создания геодезических разбивочных сетей, выполнением разбивочных работ и исполнительных съемок на основе сочетания спутниковых и традиционных геодезических измерений, проведением исследований в области автоматизации определения и учета вертикальной рефракции.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авакян, В. В. Прикладная геодезия: Геодезическое обеспечение строительного производства – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Академический проект, 2017. – 588 с.
2. Аврунев, Е. И. Анализ стабильности исходных пунктов на основании спутниковых определений в геодезической сети сгущения / Е. И. Аврунев // Гео-Сибирь – 2010. VI Междунар. науч. конгр.: «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов. – Новосибирск: СГГА, 2010. – Ч. 2. – С. 127–133.
3. Алексеев, А. В. Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы) / А. В. Алексеев, М. В. Кабанов, И. Ф. Кувшин – Новосибирск: Наука, 1982. – 160 с.
4. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т.2. Москва: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 311 с.
5. Афонин, Д. А. Геодезический контроль деформаций при строительстве городских подземных сооружений открытым способом: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Д. А. Афонин. – СПб., 2013. – 24 с.
6. Афонин, Д. А. Оптимизационная модель выбора схемы плановой геодезической разбивочной сети на застроенной территории / Д. А. Афонин // Геодезия и картография. – 2011. – № 9. – С. 16 - 22.
7. Афонин, Д. А. Построение геодезической разбивочной сети, закрепляемой пленочными отражателями /Д. А. Афонин// Записки Горного института. – СПб.: РИЦ Горного ун-та. – 2012. – Т.199. – С. 301 - 308.
8. Белоус, Н. П. Специальная канализация / Н. П. Белоус, П. М. Майборода – М.: Атомиздат, 1972. – 84 с.
9. Беспалов, Ю. И. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами / Ю. И. Беспалов, С. Г. Мирошниченко // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С.12 - 13.

10. Беспалов, Ю. И. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования / Ю. И. Беспалов, Ю. П. Дьяконов, Т. Ю. Терещенко // Геодезия и картография. – 2010. – № 8. – С.8-10.

11. Богомолова, Н. Н. О выборе способа расчета точности геодезических измерений при организации мониторинга тоннелей / Н. Н. Богомолова, М. Я. Брынь, А. А. Никитчин, **Ю. В. Лобанова** // Перспективы будущего в образовательном процессе: сборник тезисов Национальной научно-технической конференции ПГУПС, г Санкт-Петербург. – 2016. – С. 18 - 19.

12. Бойко, Е. Г. Приведение измерений к центрам пунктов в пространственных геодезических сетях / Е. Г. Бойко, Г. А. Смирнов // Геодезия и картография. – 2001. – №10. – С. 7-10.

13. Большаков, В. Д. Справочник геодезиста. / В. Д. Большаков, Г. П. Левчук – М.: Недра, 1985. – 439 с.

14. Брайт, П. И. Геодезические методы определения деформаций и сооружений / П. И. Брайт – М.: Недра, 1965. – 464 с.

15. Бровар, В. В. Гравитационное поле в задачах инженерной геодезии / В. В. Бровар – М.: Недра, 1983. – 112с.

16. Брынь, М. Я. О приведении результатов спутниковых геодезических измерений к центрам пунктов /М. Я. Брынь, Д. А. Афонин, **Ю. В. Лобанова**, А. А. Никитчин // Инженерные изыскания. – 2020. – Т. XIV. Вып. 1 – С.40 - 45.

17. Брынь, М. Я. Оценка точности вычисления координат центра геодезического пункта на основе элементов центрировки при внецентренных спутниковых измерениях /М. Я. Брынь, **Ю. В. Лобанова**, В. В. Симонян // Инженерные изыскания. – 2020. – Т. XIV. – № 4-5 – С.56 - 61.

18. Видуев, Н. Г. Геодезические разбивочные работы / Н. Г. Видуев, П. И. Баран, С. П. Войтенко и др. – М.: Недра, 1973. – 216 с.

19. Вильнер, Д. Г. Геодезический метод учета влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования / Д.В. Вильнер // Геодезия и картография. – 1976. – №11. – С.13 - 17.

20. Власенко, Е. П. Разработка методики создания разбивочной основы на монтажном горизонте высотных зданий: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Е. П. Власенко. – Москва, 2009. – 24 с.

21. Вшивкова, О. В. О комплексном подходе к решению рефракционной проблемы / О. В. Вшивкова // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка –2005. – № 4. – С. 41- 46.

22. Вшивкова, О. В. Учет влияния атмосферы в электронной тахеометрии с использованием геодезического градиентометра / О. В. Вшивкова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 3. – С. 3 - 9.

23. Генике, А. А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии /А. А. Генике, Г. Г. Побединский – Изд. 2-е, перераб. доп. – М: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.

24. Герасимов, А. П. Уравнивание государственной геодезической сети /А. П. Герасимов – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 1996. – 216 с.

25. Герасимов, А. П. Поправки за центрировку спутниковых приемников / А. П. Герасимов, Н. А. Телышев // Геодезия и картография. – 2006. – №6. – С. 17 - 19.

26. Гирнис, В. В. Монтаж оборудования парогенерирующих установок и реакторов АЭС / В. В. Гирнис, В. А. Федулов, Г. В. Филаткин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 328 с.

27. ГОСТ 24846 – 2012. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29. 10. 2012 г. № 599 - ст: дата введения 2013-07-01. –М.: Стандартиформ, 2012. – 29 с.

28. ГОСТ 58942 – 2020. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.07.2020 г. № 425-ст: дата введения 2021-01-01. – М: Стандартиформ, 2020. – 19 с.

29. Градостроительный кодекс РФ: Глава 6. «Архитектурно-строительное проектирование, строительство, реконструкция объектов капитального строительства», статья 48.1. Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты (введена Федеральным законом от 18.12.2006 N 232-ФЗ).

30. Гудков, В. М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений / В. М. Гудков, А. В. Хлебников – М.: Недра, 1990. – 335 с.

31. Дворецкий, Н. П. Исследование точности угловых измерений в условиях строительства АЭС / Н. П. Дворецкий // Энергетическое строительство. –1982. – № 5. – С. 70 - 71.

32. Дементьев, В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение: учебное пособие для ВУЗов / В.Е. Дементьев. – М.: Академический проект, 2008. – 591 с.

33. Дементьев, В. Е. Исследование вертикальной рефракции на горизонтальных трассах в аридной зоне / В. Е. Дементьев // Геодезия и картография. – 2014. – № 2. – С.57 - 64.

34. Дрок, М. К. Исследование точности определения превышений в ходах геодезического нивелирования на короткие расстояния в равнинной местности / М. К. Дрок // Научные записки Львовского политех. ин-та. Сер. Геодезическая. – 1961. – № 6. – С. 183 - 199.

35. Дрок М. К. К вопросу о поправке в превышения за совместное влияние кривизны Земли и вертикальной рефракции при геодезическом нивелировании на малые расстояния /М. К. Дрок // Научные записки Львовского политех. ин-та. Сер. Геодезическая. – 1962. – Вып. 82. – № 7. С. 3 - 30.

36. Дубровский, В. Б. Строительство атомных электростанций: Учебник для ВУЗов / В. Б. Дубровский, А.П. Кириллов, В.С. Конвиз и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 248 с.

37. Елагин, А. В. Приведение ГНСС-измерений к центру пункта посредством решения пространственных геодезических задач / А. В. Елагин, Н. А. Телеганов // Новосибирск: Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2013. – с. 46 - 51.

38. Жуков, Б. Н. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов / Б. Н. Жуков, А. П. Карпик – Новосибирск: СГГА. – 2006. – 148 с.
39. Жуков, Б. Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий: монография / Б. Н. Жуков. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356 с.
40. Изотов, А. А. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования / А. А. Изотов, Л. П. Пеллинен. – Тр. ЦНИГА и К. – 1955 – № 102. – 175с.
41. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов – М.: Картгеоцентр - Геодезиздат, 2004. – 226 с.
42. Интулов, И. П. Инженерная геодезия в строительном производстве: учеб. пособие для ВУЗов / И. П. Интулов. – Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2004. – 329 с.
43. Иордан, В. Руководство по высшей геодезии. Ч.II. Прецизионное и тригонометрическое нивелирование / В. Иордан, О. Эггерт, М. Кнейссль. – М.: Недра, 1963. – 263 с.
44. Карлсон, А. А. Инженерно-геодезические работы для проектирования и строительства энергетических объектов: учебник для техникумов / А. А. Карлсон, Л. И. Пик, О. А. Пономарев, В. И. Сердюков. – М.: Недра, 1986. – 349 с.
45. Карлсон, А. А. О классификации точного нивелирования короткими лучами /А. А. Карлсон // Геодезия и картография. – 1993. – № 6. – С. 11 - 13.
46. Кафтан, В. И. Выявление деформационных аномалий по данным ГНСС наблюдений в связи с подготовкой и разрядкой крупных землетрясений / В. И. Кафтан, А. Ю. Мельников // Физика Земли. – 2018. – №1. – С. 26-36.
47. Климов, О. Д. Практикум по прикладной геодезии. Изыскания, проектирование и возведение инженерных сооружений: учеб. пособие для ВУЗов / О. Д. Климов, В. В. Калугин, В. К. Писаренко. – М.: Недра, 1991. – 271 с.
48. Коугия, В. А. Геодезические работы при строительстве мостов / В. А. Коугия, В. В. Грузинов, О. Н. Малковский, В. Д. Петров. – М.: Недра, 1986. – 248 с.

49. Коугия, В. А. Избранные труды: монография / В. А. Коугия; под ред. М. Я. Брыня. – Спб.: ПГУПС, 2012. – 448 с.

50. Коугия, В. А. Научное сопровождение геодезических работ при строительстве второй очереди Ленинградской АЭС / В. А. Коугия, М. Я. Брынь,....., **Ю. В. Лобанова** и др.// Новые технологии в маркшейдерском деле, геодезии и кадастре: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции Горного университета, г. Санкт-Петербург – 2016. – С.103-105.

51. Левчук, Г. П. Прикладная геодезия: Основные методы и принципы инженерно - геодезических работ / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, В.Г. Конусов. – М.:Недра, 1981. – 438 с.

52. **Лобанова, Ю. В.** Анализ влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования при коротких расстояниях /Ю. В. Лобанова //Бюллетень результатов научных исследований: эл. научный журнал ПГУПС. – 2018. – вып.2. – С.77-84.

53. **Лобанова, Ю. В.** Определение коэффициента рефракции в полевых условиях / Ю. В. Лобанова // Современные проблемы инженерной геодезии: сборник трудов Международной научно-практической конференции ПГУПС, г. Санкт-Петербург. – 2020. – С.110-112.

54. **Лобанова, Ю. В.** Определение коэффициента рефракции на коротких расстояниях / Ю. В. Лобанова, М. Я. Брынь, Д. А. Афонин // Известия ПГУПС. – 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 670 - 676.

55. **Лобанова, Ю. В.** Определение углов рефракции тригонометрическим нивелированием на эталонном базисе /Ю. В. Лобанова // Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург. – С.392-398.

56. **Лобанова, Ю. В.** Отражатели. Современный взгляд /Ю. В. Лобанова// Современные проблемы инженерной геодезии: сборник трудов Международной

научно-практической конференции ПГУПС, г. Санкт-Петербург. – 2020. – С.113 - 116.

57. **Лобанова, Ю. В.** Программа вычисления коэффициента вертикальной рефракции / Ю. В. Лобанова, А. А. Никитчин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.: правообладатель ПГУПС. – рег. № 2020619651 от 30.06.2020г. – М.: Роспатент, 2020.

58. **Лобанова, Ю. В.** Инструментальные исследования по передаче отметок на монтажные горизонты электронным тахеометром / Ю. В. Лобанова, Н. В. Канашин // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVII всероссийской научно-практической конференции ПГУПС 17-24 апреля 2017, г. Санкт-Петербург. – С.113-114.

59. **Лобанова, Ю. В.** Экспериментальные исследования по проложению высотных ходов электронными тахеометрами / Ю. В. Лобанова // Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург. – 2016. – С.342 - 346.

60. Мазуров, Б. Т. Прогнозные модели динамики вантовых мостов по данным ГНСС / Б. Т. Мазуров, Ф. Х. Зарзура, М. Х. Эссаи Али // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. № 4/С – С. 40 - 44.

61. Малков, А. Г. О контроле измерения превышений цифровыми нивелирами / А. Г. Малков // Геодезия и картография. – 2009. – № 9. – С. 14-15.

62. Маркузе, Ю. И. Структурная схема мониторинга и алгоритм анализа деформаций земной коры по результатам спутниковых измерений на пунктах региональных референцных сетей / Ю. И. Маркузе, Х. К. Ямбаев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 6. – С. 30 - 36.

63. Маслич, Д. И. Некоторые общие закономерности влияния вертикальной рефракции на точность геодезического нивелирования / Д. И. Маслич // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. - 1969. – № 9. – С.33 - 41.

64. Машимов, М. М. Геодезия. Теоретическая геодезия: справочное пособие / М. М. Машимов – М.: Недра, 1991. – 268 с.

65. Машимов, М. М. Уравнивание геодезических сетей / М. М. Машимов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 280 с.

66. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. МДС 13-22.2009 / ООО «ТЕКТОПЛАН». – М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 76 с.

67. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформациями зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. СО 153-34.21.322-2003 [утв. приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 30 июня 2003 г. N 283] – М., 2005. – 55 с.

68. Мозжухин, О. А. К анализу путей развития проблемы учета рефракции в нивелировании / О. А. Мозжухин // Геодезия и картография. – 1994. – № 11. – С.16 - 19.

69. Мозжухин, О. А. Определение поправок за влияние рефракции в тригонометрическом нивелировании / О. А. Мозжухин // Геодезия и картография. – 1994. – №6. – С.16 -17.

70. Мозжухин, О. А. Метод учета вертикальной рефракции с использованием метеопараметров атмосферы / О.А. Мозжухин // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1981. – №5. – С. 56 - 63.

71. Мониторинг деформационных процессов строительных и инженерных объектов. – Центр «Геодинамика». МИИГАиК. – Режим доступа: <http://www.geodinamika.ru/main/engineer/deformation-monitoring>.

72. Мустафин, М. Г. Методика передачи отметок на монтажные горизонты с применением спутниковой технологии измерений / М. Г. Мустафин, Чан Шон Тхань // Геодезия и картография. – 2019. – №4. – С. 2 - 8.

73. Никольский, Е. К. Вопросы совершенствования высотного и планового обоснования топографических съемок: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Никольский Евгений Константинович. – М., 1967. – 35 с.

74. Никонов, А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины / А. В. Никонов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 28–34.

75. Никонов, А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики / А. В. Никонов // Вестник СГГА. – 2013. – Вып.4 (24). – С. 12 - 18.

76. Огородова, Л. В. Гравиметрия / Л. В. Огородова, Б. П. Шимбарев, А. П. Юзефович – М.: Недра, 1978. – 321с.

77. Островский, А. Л. Достижения и задачи рефрактометрии / А. Л. Островский // Геопрофи. –2008. – № 1. – С. 6 - 15.

78. Островский, А. Л. Теория и практика флуктуационного метода определения вертикальной рефракции / А. Л. Островский, А. И. Мороз // Изв.вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – № 3. – С. 11 - 29.

79. Островский, А. Л. Учет атмосферных влияний на астрономо - геодезические измерения / А. Л. Островский, Б. М. Джуман, Ф. Д. Заблоцкий, Н. И. Кравцов. - М.: Недра, 1990. - 235 с.

80. Пандул, И. С. О причинах возникновения электрооптической рефракции / И. С. Пандул // Геодезия и картография. – 1998. – № 8. – С. 15 - 18.

81. Пискунов, М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений / М. Е. Пискунов. – М: Недра, 1980. – 248 с.

82. Пискунов, А. М. О точности превышений, полученных из тригонометрического нивелирования короткими лучами / А. М. Пискунов, Н. И. Майоров // Геодезия и картография. –1990. – № 1. – С.12 - 14.

83. Пискунов, М. Е. Метод высокоточного тригонометрического нивелирования короткими (до 100 м) лучами / М. Е. Пискунов, Ван Дау Нгуен // Геодезия и аэрофотосъемка. – 1971. – № 6. – С.37 - 48.

84. Письмо Минстроя России от 20 апреля 1995 года N БЕ-19-9/24.

85. Подшивалов, В. П. Тригонометрическое нивелирование коротким лучом / В. П. Подшивалов, Али Салим // Геодезия и картография. –1994. – № 6. – С. 18 - 19.
86. Померанцев, И. И. Исследование земной рефракции / И. И. Померанцев. – СПб: Записки Имп.Акад. Наук. – 1884. – т.XLVIII, прил. № 3.
87. Пособие по производству геодезических работ в строительстве (к СНиП 3.01.03-84) / ЦНИИОМТП. - М.: Стройиздат, 1985.
88. Свод правил: Геодезические работы в строительстве (СП 126.13330.2017): утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 октября 2017 г. № 1469/пр и введен в действие с 25 апреля 2018 г.
89. Свод правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ (СП 317.1325800.2017): утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 22 декабря 2017 г. N 1702/пр и введен в действие с 23 июня 2018 г.
90. Свод правил: Несущие и ограждающие конструкции (СП 70.13330.2012). Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87: установлены постановлением Правительства Российской Федерации от 19 ноября 2008 г. № 858 "О порядке разработки и утверждения сводов правил" и введен в действие 2013- 07- 01.
91. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности: ГОСТ 21780-2006. – М.: ОАО “Центр метрологии нормирования и стандартизации в строительстве”, 2008.
92. СНиП 3.01.03-84 Геодезические работы в строительстве / Минстрой России. – М: ГП ЦПП, 1995.
93. СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1988.
94. Сытник, В. С. Геодезическое обеспечение строительного-монтажных работ / В. С. Сытник, А. Б. Ключин, Б.Г. Борисенков – М.: Стройиздат, 1982. – 159 с.

95. Сытник, В. С. Строительная геодезия / В. С. Сытник. – М.: Недра, 1974. – 136 с.
96. Торге, В. Г. Гравиметрия / В. Г. Торге. – М.: Мир, 1999. – 428 с.
97. Уставич, Г. А. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации крупных энергетических объектов / Г. А. Уставич, Г. Д. Костина. – М.: Недра, 1983. – 130 с.
98. Уставич, Г. А. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом / Г. А. Уставич, М. Е. Рахымбердина, А. В. Никонов, С. А. Бабасов // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С.17 - 22.
99. Уставич, Г. А. Создание геодезической основы для строительства объектов энергетики / Г. А. Уставич, Г. Г. Китаев, А. В. Никонов, В. Г. Сальников // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 48 - 54.
100. Уставич, Г. А. Технологическая схема геодезических работ при монтаже турбоагрегатов / Г. А. Уставич, В. Г. Сальников, Н. М. Рябова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – №4/С. – С. 45–51.
101. Федеральный закон РФ от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
102. Федеральный закон РФ от 30.03.2016 № 74-ФЗ.
103. Шевченко, Г. Г. Об обработке результатов определения пространственного положения деформационных марок с использованием поискового способа метода наименьших квадратов / Г. Г. Шевченко, Д. А. Гура, **Ю. В. Лобанова** // Известия ПГУПС. – 2018. – Т.15. Вып. 4. – С.653 - 665.
104. Шеховцов Г. А. Об оценке точности обратной линейно-угловой засечки при передаче координат на монтажные горизонты при строительстве зданий повышенной этажности / Г. А. Шеховцов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т.63, № 3. – С. 275 - 281.
105. Яковлев, А. И. Определение составляющих уклонения отвесной линии с использованием аппаратуры потребителей космических навигационных систем / А. И. Яковлев // Записки горного института. – 2004. – Т.156. – С.238 - 241.

106. Ямбаев, Х. К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве / Х. К. Ямбаев. – М.: Недра, 1986. – 264 с.

107. Яндров, И. А. Возможности использования спутниковых методов в процессе строительства / И. А. Яндров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 5. – С. 36 - 43.

108. Яндров, И. А. Некоторые аспекты применения координатного метода разбивочных работ в строительстве / И. А. Яндров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 5. – С. 41 - 47.

109. Al-Kherayef O., Valchinov V., Grebenitcharsky R., Valcheva S., Al-Muslmani B., Al-Rubaia U. (2018) Refraction coefficient determination and modelling for the territory of the Kingdom of Saudi Arabia. In Proceedings of the FIG Congress Embracing our smart world where the continents connect: Enhancing the geospatial maturity of societies, Istanbul, Turkey, 6–11 May. ISBN 978-87-92853-78-3.

110. Angus-Leppan, P. V. Surface effects on refraction in precise levelling / P. V. Angus-Leppan P. V. // Conference on Refraction Effects in Geodesy & Conference on Electronic Distance Measurement, 5–8 Nov. 1968, New South Wales (Australia). Univ. of N. S. W.

111. Bahnert, G. Ergebnisse geodatischer Refraktionsbestimmungen. Vermessungstechnik, 37, 11, 1989. – pp. 381-382.

112. Brunner, F. K. Experimental determination of the coefficients of refraction from heat flux measurements / F. K. Brunner // Proceedings of the Int. Symp. Electromagn. Distance Meas. And Influence Atmos. Refract. Wageningen, 1977, Delft, pp. 245–260.

113. Bryn, M. Ya. About designing the internal layout grid of the main NPP building / M. Ya. Bryn, **Yu. V. Lobanova**, A. A. Nikitchin // - IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 913 (2020) 042040 CATPID-2020. DOI:10.1088/1757-899X/913/4/042040

114. Gaifiliia D. Empirical Modelling of Refraction Error in Trigonometric Heighting Using Meteorological Parameters / Gaifiliia D., Pagounis V., Tsakiri M.,

Zacharis V. // Journal of Geosciences and Geomatics, 4, 1, 2016. – pp. 8-14. DOI: 10.12691/jgg-4-1-2.

115. Erol, Serdar. Assessment of satellite based and terrestrial measurement techniques in monitoring vertical deformation / Erol Serdar, Nurhan Celik Rahmi, Erol Bihter, Ayan Tevfik // TS19 Deformation Measurements and Analysis II. FIG Working Week 2004 Athens. Greece, May 22-27, 2004. –pp. 1-16.

116. **Lobanova, Yulia.** Determining the Refraction Coefficient Based on the Differences of the Measured and Known Zenith Distances in Short-Distance Trigonometric Leveling / Yulia Lobanova, Mikhail Bryn, Evgeniy Svintsov. - Транспортное строительство в холодных регионах: тезисы докладов международной науч.-практ. конф. «Транспортное строительство в холодных регионах» (TRANSOILCOLD 2019), Санкт-Петербург, 20-23 мая 2019 года / Под ред. А.В. Петряева, А.А. Конон. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. – С. 121-122.

117. Mustafin, M. G. Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises / M. G. Mustafin, V. A. Valkov, A. I. Kazantsev // Procedia engineering. – 2017. pp. 729 - 736.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Точностные параметры при строительстве сооружений

Таблица А.1 – Точность построения разбивочной сети строительной площадки

Характеристика объектов строительства	Величины СКП построения разбивочной сети строительной площадки		
	При измерении углов, сек	При измерении линий	превышения на 1 км хода, мм
Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью более 1 кв.км; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки более 100 тыс. кв.м	3	$\frac{1}{25000}$	4
Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью менее 1 кв.км; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки от 10 до 100 тыс.кв.м	5	$\frac{1}{10000}$	6
Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки менее 10 тыс.кв м; дороги, инженерные сети в пределах застраиваемых территорий	10	$\frac{1}{5000}$	10
Дороги, инженерные сети внезастраиваемых территорий; земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка	30	$\frac{1}{2000}$	15

Таблица А.2 – СКП измерения перемещений

Название класса точности измерений	Перемещения и их допустимые погрешности измерения		Характеристика объекта и виды грунтов, на которых проводилось строительство
	вертикальные	горизонтальные	
I	1 мм	2 мм	- для строящихся уникальных зданий и сооружений; - при эксплуатации сооружений длительное время (около 50 лет и более); - для строящихся объектов на скальных или полускальных грунтах
II	2 мм	5 мм	- при строительстве объектов на песчаных и глинистых грунтах
III	5 мм	10 мм	- для строящихся объектов на насыпных грунтах
IV	10 мм	15 мм	- земляные сооружения

Таблица А.3 – Точность выноса основных или главных разбивочных осей

Характеристика	СКП построения внешней и внутренней разбивочных сетей здания (сооружения) и других разбивочных работ				
	$m_d$	$m_{\beta}$ , сек	$m_h$ на станции, мм	определение отметки при передаче с исходного на монтажный горизонт (мм)	передача точек, осей по вертикали (мм)
Металлические конструкции; сооружения высотой свыше 100 до 120 м или с пролетами свыше 30 до 36 м	$\frac{1}{15000}$	5	1	В зависимости от высоты каждого последующего монтажного горизонта назначаются числовые значения погрешностей	
Здания св. 5 до 15 этажей, сооружения высотой св. 15 до 60 м или с пролетами св. 6 до 18 м	$\frac{1}{5000}$	20	2,5		
Здания до 5 этажей, сооружения высотой до 15 м или с пролетами до 6 м	$\frac{1}{3000}$	30	3		
Конструкции из дерева; инженерные сети, дороги, подъездные пути	$\frac{1}{2000}$	30	5		
Земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка	$\frac{1}{1000}$	45	10		

Таблица А.4 – Точность передачи плановых координат пунктов внутренней разбивочной сети на монтажные горизонты

Процессы, условия измерений, тип приборов	Средние квадратические погрешности передачи точек, осей по вертикали, мм			
	2	2,5	3	4
Высота проецирования, м	До 15	Св. 15 до 60	Св. 60 до 100	Св. 100 до 120
Центрирование прибора	Оптическим центриром или нитяным отвесом	Оптическим центриром		
Фиксация точек	Карандашом на палетке (гладкая поверхность)		Керном на исходном горизонте и карандашом по палетке	
Минимальное расстояние от визирного луча до строительной конструкции, м	0,2		0,1	
Количество приемов, не менее	1		2	
Типы приборов или им равноточные	Теодолиты, тахеометры с СКП измерения угла полным приемом равной 30"	Теодолиты, тахеометры с СКП измерения угла полным приемом равной 2",	ПЗЛ	

Таблица А.5 – Допустимые отклонения

Части сооружений	Допустимые отклонения, мм		
	Продольные отклонения	Поперечные отклонения	По высоте
Ось канализации	1/2000	30	-
Бетонная подготовка под каналы	1/2000	20	5
Верх трубопровода	1/2000	20	5
Опоры на трубопроводах	10	10	10
Смотровые колодцы	100	100	10
Планировочные работы	-	-	20

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Фрагмент распечатки результатов вычислений в компьютерной программе *NW* профессора Коугия В. А.

Математическая обработка плановой геодезической сети

Координаты исходных пунктов.

NN	Название	x	y
1	D2	1800.000	1299.992
2	D3	1800.000	1682.373
3	74	1657.526	1474.987
4	72	2130.000	1475.017

Список определяемых пунктов

5. M1; 6. M2; 7. M3; 8. M4; 9. M5; 10. M6; 11. M7; 12. M8  
13. T1; 14. T2; 15. T3; 16. T4

Список горизонтальных направлений

	с пункта	на пункт	гр.мин.сек.
1.	T1	M2	0 0 0.0
2.		72	7 20 39.0
3.		D2	268 16 38.8
4.		D3	90 55 8.3
5.		74	164 0 17.9
6.		M1	270 0 0.0
7.		M3	41 2 7.2
8.		M4	81 43 26.8
9.		M5	110 35 38.7
10.		M6	147 13 30.4
11.		M7	180 0 0.0
12.		M8	216 52 11.6
13.	T2	M3	0 0 0.0
14.		72	359 4 44.7
15.		D2	263 39 36.3
16.		D3	95 38 38.6
17.		74	181 46 2.1
18.		M1	259 38 15.1
19.		M2	308 57 21.3
20.		M4	96 25 43.5
21.		M5	142 56 8.0
22.		M6	180 0 0.0
23.		M7	200 54 45.2
24.		M8	231 20 24.7
25.	T3	M3	0 0 0.0

26.		72	359 12 1.1
27.		D2	278 31 49.4
28.		D3	82 24 2.3
29.		74	182 29 8.8
30.		M1	289 30 30.6
31.		M2	331 3 36.0
32.		M4	39 32 32.8
33.		M5	90 0 0.0
34.		M6	180 0 0.0
35.		M7	211 44 0.7
36.		M8	255 16 21.2
37.	T4	M2	0 0 0.0
38.		72	6 18 34.6
39.		D2	290 36 7.6
40.		D3	78 39 44.5
41.		74	155 34 48.0
42.		M1	323 7 48.4
43.		M3	23 31 4.7
44.		M4	51 20 24.7
45.		M5	74 25 19.8
46.		M6	112 0 40.6
47.		M7	180 0 0.0
48.		M8	270 0 0.0

Средняя квадратическая ошибка измеренного направления = 2.0 сек.

#### Список измеренных расстояний

от пункта	до пункта	расстояние (м)	скп (мм)
1.	T1	M2	54.000 2.0
2.		72	328.697 2.0
3.		D2	133.068 2.0
4.		D3	249.405 2.0
5.		74	152.373 2.0
6.		M1	40.500 2.0
7.		M3	71.589 2.0
8.		M4	83.368 2.0
9.		M5	88.132 2.0
10.		M6	86.822 2.0
11.		M7	107.000 2.0
12.		M8	67.500 2.0
13.	T2	M3	38.000 2.0
14.		72	310.040 2.0
15.		D2	181.116 2.0
16.		D3	203.359 2.0
17.		74	162.551 2.0
18.		M1	88.951 2.0
19.		M2	60.440 2.0
20.		M4	35.725 2.0
21.		M5	58.900 2.0
22.		M6	89.000 2.0

23.	M7	131.674	2.0
24.	M8	112.055	2.0
25. T3	M3	85.000	2.0
26.	72	357.035	2.0
27.	D2	182.022	2.0
28.	D3	204.166	2.0
29.	74	115.583	2.0
30.	M1	92.829	2.0
31.	M2	97.129	2.0
32.	M4	55.761	2.0
33.	M5	35.500	2.0
34.	M6	42.000	2.0
35.	M7	89.359	2.0
36.	M8	90.472	2.0
37. T4	M2	108.000	2.0
38.	72	382.316	2.0
39.	D2	142.095	2.0
40.	D3	254.336	2.0
41.	74	101.560	2.0
42.	M1	67.500	2.0
43.	M3	117.784	2.0
44.	M4	105.652	2.0
45.	M5	85.646	2.0
46.	M6	50.695	2.0
47.	M7	53.000	2.0
48.	M8	40.500	2.0

## Список дирекционных углов и расстояний.

с пункта	на пункт	дир.угол гр.мин.сек.	расстояние м.
1. D2	T1	88 16 38.8	133.068
2.	T2	83 39 36.3	181.116
3.	T3	98 31 49.4	182.022
4.	T4	110 36 7.6	142.095
5. D3	T1	270 55 8.2	249.405
6.	T2	275 38 38.7	203.359
7.	T3	262 24 2.3	204.166
8.	T4	258 39 44.5	254.336
9. 74	T1	344 0 17.9	152.373
10.	T2	1 46 2.2	162.551
11.	T3	2 29 8.9	115.583
12.	T4	335 34 47.9	101.560
13. 72	T1	187 20 39.0	328.697
14.	T2	179 4 44.7	310.040
15.	T3	179 12 1.1	357.035
16.	T4	186 18 34.7	382.316
17. M1	T1	89 59 60.0	40.500
18.	T2	79 38 15.1	88.951
19.	T3	109 30 30.6	92.829

20.		T4	143 7 48.4	67.500
21.	M2	T1	180 0 0.0	54.000
22.		T2	128 57 21.3	60.440
23.		T3	151 3 36.0	97.129
24.		T4	180 0 0.1	108.000
25.	M3	T1	221 2 7.2	71.589
26.		T2	180 0 0.0	38.000
27.		T3	180 0 0.0	85.000
28.		T4	203 31 4.7	117.784
29.	M4	T1	261 43 26.8	83.368
30.		T2	276 25 43.4	35.725
31.		T3	219 32 32.9	55.761
32.		T4	231 20 24.8	105.652
33.	M5	T1	290 35 38.7	88.132
34.		T2	322 56 8.1	58.900
35.		T3	269 59 59.9	35.500
36.		T4	254 25 19.8	85.646
37.	M6	T1	327 13 30.4	86.822
38.		T2	0 0 0.0	89.000
39.		T3	0 0 0.0	42.000
40.		T4	292 0 40.6	50.695
41.	M7	T1	0 0 0.1	107.000
42.		T2	20 54 45.2	131.674
43.		T3	31 44 0.7	89.359
44.		T4	0 0 0.0	53.000
45.	M8	T1	36 52 11.6	67.500
46.		T2	51 20 24.7	112.055
47.		T3	75 16 21.2	90.472
48.		T4	90 0 0.0	40.500

Контрольный список координат пунктов (вычисленных).

NN	Имя	x	y	
1	D2	1800.000	1299.992	исх
2	D3	1800.000	1682.373	исх
3	74	1657.526	1474.987	исх
4	72	2130.000	1475.017	исх
5	M1	1804.000	1392.500	
6	M2	1858.000	1433.000	
7	M3	1858.000	1480.000	
8	M4	1816.000	1515.500	
9	M5	1773.000	1515.500	
10	M6	1731.000	1480.000	
11	M7	1697.000	1433.000	
12	M8	1750.000	1392.500	
13	T1	1804.000	1433.000	
14	T2	1820.000	1480.000	
15	T3	1773.000	1480.000	
16	T4	1750.000	1433.000	

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**Свидетельство о государственной регистрации программы**  
**для ЭВМ № 2020619651 от 30.08.2020**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2020619651**

**Вычисление коэффициента вертикальной рефракции**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС) (RU)*

Авторы: *Лобанова Юлия Васильевна (RU),  
Никитчин Андрей Андреевич (RU)*

Заявка № **2020618433**

Дата поступления **30 июля 2020 г.**

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **20 августа 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Акт внедрения результатов диссертационного исследования



#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Научно-технической продукции

##### 1. Наименование объекта

Методика построения внутренних разбивочных сетей особо опасных и технически сложных объектов без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты с использованием способа свободного стационарирования, а также методики приведения к центрам пунктов результатов вневидимых спутниковых измерений, основанная на использовании преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами разработана старшим преподавателем кафедры «Инженерная геодезия» Петербургского университета путей сообщения Императора Александра I (ПУУПС) Лобановой Ю. В.

##### 2. Краткое описание внедренного объекта (мероприятия)

Разработанная методика определения планового положения пунктов разбивочной сети и переноса разбивочных сетей с исходного горизонта на монтажные горизонты способом свободного стационарирования и методика приведения спутниковых измерений к центрам пунктов при строительстве и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов приводит к повышению качества строительно-монтажных работ и эффективности работы оборудования в процессе эксплуатации объектов, а также использование высокоэффективных методов и средств геодезического обеспечения позволяет достичь необходимой точности сопряжений строительных конструкций и оборудования и дает возможность проводить измерения или зафиксировать с необходимой точностью осадки и динамику сооружений и оборудования в процессе их монтажа и эксплуатации.

##### 3. Дата внедрения 2018-2020 гг

##### 4. Основные характеристики объекта, на котором внедрен объект ООО «Промышленная геодезия»

Генеральный директор  
ООО «Промышленная геодезия», к. т. н.



В. В. Петров