

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор

Брынь Михаил Ярославович

Официальные оппоненты:

Хорошилов Валерий Степанович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра космической и физической геодезии, профессор;

Ознамец Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», кафедра геодезии, заведующий кафедрой.

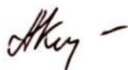
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар.

Защита состоится 27 декабря 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на веб - сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 27 октября 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях повышенного внимания требуют вопросы строительства и безопасной эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов. К таким объектам относятся: объекты использования атомной энергии, гидротехнические сооружения первого и второго классов, портовые гидротехнические сооружения, тепловые электростанции мощностью и др.

Атомная энергетика скрывает большую опасность для всего человечества и окружающей среды, о чем свидетельствуют аварии на АЭС по всему миру. Крупные аварии и катастрофы на радиационно-опасных объектах с каждым годом показывают все большую непредсказуемость таких катастроф. Однако, в условиях безаварийной работы АЭС, атомная энергетика пока самое экономичное и экологически чистое производство энергии, и альтернативы ей в ближайшем будущем не предвидится.

Важную роль в перечне мероприятий занимает повышение качества строительно-монтажных работ и эффективности работы оборудования в процессе эксплуатации энергетических объектов. Это может быть выполнено только при условии использования современных средств геодезического обеспечения и эффективных методов, позволяющих достичь необходимой точности сопряжений строительных конструкций, а также производить измерения с необходимой точностью деформации сооружений в процессе их эксплуатации.

Для эффективного решения указанной задачи широко используются современные приборы: электронные тахеометры, цифровые нивелиры, спутниковые приемники, наземные лазерные сканеры и др.

Однако, разработанной модели проектирования и усовершенствованных на ее основе существующих методов определения планового положения пунктов разбивочной сети и переноса их с исходного горизонта на монтажные горизонты способом свободного stationирования, 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 и исследования. Вопросами разработки и усовершенствования методов производства инженерно-геодезических работ занимались многие отечественные и зарубежные ученые:

Брайт П. И., Визиров Ю.В., Ганьшин В. Н., Гордеев В. А., Гуляев Ю. П., 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., Уставич Г.А., Хорошилов В. С., Ямбаев Х. К., Marcak P., Tarnowski K. и др.

Вопросами влияния вертикальной рефракции на результаты измерения занимались отечественные и зарубежные ученые такие, 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 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 спосо-

бом 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 метода 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 последовательном и 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 методов моделирования геодезических сетей, а также сопоставление полученных результатов с выводами, полученными по традиционным методикам и, таким образом, установлении области применения разработанной методики.

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 и оценкой точности измерений. Полученные результаты согласуются с выводами, полученными другими исследователями и внедрены на строящихся объектах организацией ООО «Промышленная геодезия» в г. Санкт-Петербург.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку 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 натурального 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 госрегистрации 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель, идея и задачи исследований, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследо-

вания, приводится достоверность и обоснованность выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, а также представляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе Выполнен анализ требований к точности геодезического обеспечения строительства и эксплуатации АЭС. Приведен анализ видов геодезических работ при строительстве и эксплуатации АЭС. Дан анализ использования спутниковых технологий на объекте работ. Приведены способы определения деформаций тригонометрическим нивелированием, а также учета влияния вертикальной рефракции при выполнении тригонометрического нивелирования.

Во второй главе обоснованы требования к точности и даны рекомендации по созданию внутренних разбивочных сетей способом свободного стационарирования без переноса их с исходного горизонта на верхние монтажные горизонты. Определены основные этапы проектирования и развития внешней и внутренней разбивочных сетей способом свободного стационарирования на примере реакторного блока АЭС. Разработана методика приведения внецентренных спутниковых измерений к центрам пунктов. Даны рекомендации по учету поправок за уклонение отвесных линий в измеренные горизонтальное направление и превышение при определении элементов центрировки. Выполнен предрасчет точности определения превышения из одностороннего тригонометрического нивелирования, а также обобщены способы определения коэффициента рефракции геодезическими методами. Предложена методика построения вертикального базиса «во всех комбинациях» для определения коэффициента рефракции.

В третьей главе выполнено проектирование и предрасчет точности в программе *Credo* плановой внешней разбивочной сети реакторного блока АЭС. Создана модель и выполнен предрасчет точности в программе *NW* профессора Коугия В. А. построения внутренней разбивочной сети реакторного блока АЭС. Проведены экспериментальные исследования по проведению внецентренных спутниковых измерений к центрам пунктов. Рассмотрена методика построения вертикального базиса для определения коэффициента рефракции и выполнены измерения с оценкой точности результатов измерений на этом базисе. Проведен точный эксперимент на вертикальном базисе по определению коэффициента вертикальной рефракции.

Основные результаты исследований отражены в защищаемых положениях:

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.

Внутренняя разбивочная сеть предназначена для выполнения детальных разбивочных работ и передачи координат на монтажные горизонты. Для построения этих сетей в нормативных документах дана предельная погрешность $\Delta = 5$ мм взаимного положения габаритных осей, выносимых в натуре зданий и сооружений в плане.

Выполнено обоснование требований к точности геодезических работ. В результате показано, что определение положения станции обратной засечкой и точки сети относительно станции способом полярных координат необходимо определять со средней квадратической погрешностью (СКП) не более 1,4 мм.

В работе предложена методика проектирования внутренней разбивочной сети на основе использования способа свободного стационарирования. Оценка проектов состоит из следующих этапов: составление схемы сети; назначение СКП окончательных значений результатов измерений; определение по алгоритму параметрического способа уравнивания СКП оцениваемых величин; анализ проекта.

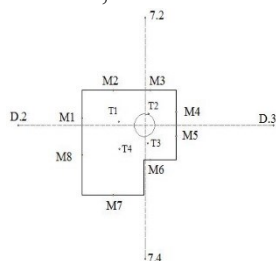


Рисунок 1— Схема внутренней разбивочной сети

По приближенным координатам точек стояния тахеометра Т1-Т4, марок М1-М8 и исходных пунктов 7.2, 7.4, D2, D3 вычислены горизонтальные углы и расстояния, представляющие собой модель измерений, которые должны быть измерены в проектируемой сети (рисунок 1).

Далее выполнен предрасчет точности сети параметрическим способом. При расчете точности координаты исходных пунктов приняты безошибочными. СКП измерений электронным тахеометром приняты равными: для направлений – 2", для расстояний – 2 мм. Расчет выполнен по

компьютерной программе *NW* проф. Коугия В.А. и получены следующие результаты: СКП определения координат всех пунктов сети не превышают 1 мм. Наиболее слабым пунктом сети оказался пункт М7. СКП его координат и положения точки: $m_x = 1$ мм, $m_y = 1$ мм, $M = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = 1$ мм. Точность наиболее слабой стороны сети М3–Т2 длиной 38 м характеризуется СКП: вдоль сторон – 1 мм, поперек стороны – 0 мм, относительной погрешностью в длине стороны 1/42700 и СКП направления 1,9".

Расчеты, приведенные в диссертации, показали, что предложенная технология создания внутренней разбивочной сети, связанная с малыми трудовыми затратами и простотой исполнения, приводит благодаря минимизации погрешностей центрирования приборов и редукций визирных целей к созданию сети высокой точности.

В работе также рассмотрены различные варианты оценки точности сетей способом свободного стационарирования:

Оценка точности по необходимому составу измерений. СКП определяемой точки способом свободного стационарирования выражается известной формулой $m_{xy}^2 = m_c^2 + m_p^2$, где m_c – СКП определения положения станции обратной засечкой; m_p – СКП определения положения точки сети относительно станции способом полярных координат, которая находится по формуле $m_p = \sqrt{m_d^2 + d^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}$, где m_d – СКП измерения расстояний, m_β – СКП измерения угла, $\rho = 206265''$.

Отметим, что СКП координат точки стояния тахеометра высвечиваются на панели тахеометра, но при этом не приводятся ошибки координат определяемой точки полярным способом. Чтобы получить m_{xy} , был создан проект сети и определена СКП определения положения станции прямой угловой, обратной угловой, линейной засечками, а СКП определения положения определяемой точки – полярным способом.

Оценка точности положения станции по методу наименьших квадратов без учета ошибок исходных данных.

Система нормальных уравнений имеет вид $B^T P B \delta x + B^T P L = 0$, тогда $\delta x = -Q_{xy} B^T P L$.

С помощью обратной весовой матрицы $Q_{xy} = (B^T P B)^{-1}$ СКП координат определяются по формулам $m_x = \mu \sqrt{Q_x}$ и $m_y = \mu \sqrt{Q_y}$, тогда $m_c = \mu \sqrt{Q_x + Q_y}$, где СКП единицы веса вычисляется как $\mu = \sqrt{V^T P V / r}$, а r – число избыточных измерений.

В частном случае, при отсутствии коррелированности между измерениями, матрица P будет диагональной. Справедливость вышеприведенных формул и в этом случае останется в силе.

Оценка точности по методу наименьших квадратов с учетом ошибок исходных данных. При построении геодезических сетей в несколько стадий, или при построении сети путем присоединения к уравненной сети новых участков возникает задача уравнивания с учетом ошибок исходных данных. Для корректного выполнения уравнивания существенное значение имеет верное определение весовой матрицы. Весовая матрица P – обратная относительно ковариационной матрицы K_{Δ} ошибок Δ_i измеряемых величин, которая, в свою очередь, равна ковариационной матрице свободных членов (1):

$$K_L: P = K_{\Delta}^{-1} = K_L^{-1}; K_{L_{\text{изм}}} + \Phi K_E \Phi^T, \quad (1)$$

где K_E – ковариационная матрица соответственно ошибок исходных данных, Φ – матрица влияния ошибок исходных данных на результаты измерений.

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.

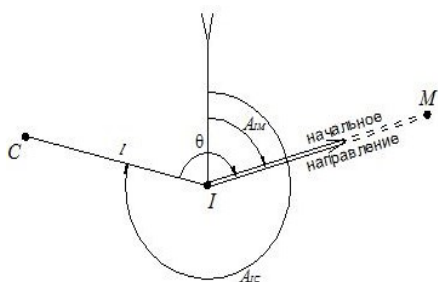


Рисунок 2 – Измерение элементов центрировки

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. Поэтому в таких случаях стоит задача приведения результатов спутниковых измерений, представляемых геоцентрическими пространственными прямоугольными координатами X, Y, Z или разностями координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ к центрам пунктов.

Обеспечивая преемственность в определении элементов центрировки при построении пространственных сетей, отнесем к элементам центрировки, кроме линейного l и углового θ элементов центрировки, превышение h_{IC} центра пункта C над точкой установки спутникового приемника I , которое можно определить любым известным методом, прежде всего, геометрическим нивелированием.

Пусть выполнены спутниковые измерения в точках I и дополнительной точке M (рисунок 2) и определены их геоцентрические экваториальные пространственные прямоугольные координаты X_I, Y_I, Z_I и X_M, Y_M, Z_M . Это позволит определить геодезический азимут направления IM по формуле $\text{tg}A_{IM} = \frac{Y'_M}{X'_M}$, где топоцентрические горизонтные про-

странственные прямоугольные координаты X'_M, Y'_M, Z'_M точки M относительно точки I находятся по формуле (2):

$$\begin{bmatrix} X'_M \\ Y'_M \\ Z'_M \end{bmatrix} = R_I^T \begin{bmatrix} X_M - X_I \\ Y_M - Y_I \\ Z_M - Z_I \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где R_I^T – транспонированная матрица R_I . В свою очередь матрица R_I перехода от топоцентрических к геоцентрическим координатам является функцией эллипсоидальных координат B_I, L_I .

Имея геодезический азимут направления IM и угловой элемент центрировки θ вычисляется геодезический азимут направления IC по формуле $A_{IC} = A_{IM} + 360^\circ - \theta$ (рисунок 2).

Далее вычисляются топоцентрические пространственные прямоугольных координат точки C относительно точки I по известным элементам центрировки.

Для этого используется формула
$$\begin{bmatrix} X'_C \\ Y'_C \\ Z'_C \end{bmatrix} = s_{IC} \begin{bmatrix} \sin z_{IC} \cos A_{IC} \\ \sin z_{IC} \sin A_{IC} \\ \cos z_{IC} \end{bmatrix}$$
. Оче-

видно, что $s_{IC} \sin z_{IC} = l$ и $s_{IC} \cos z_{IC} = h_{IC}$. Тогда окончательно, геоцентрические экваториальные пространственные прямоугольные координаты центра C геодезического пункта находятся по формуле (3):

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} + R_I \begin{bmatrix} \ell \cos A_{IC} \\ \ell \sin A_{IC} \\ h_{IC} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

По предложенной методике, проведены экспериментальные исследования. Для этого на местности на различных удалениях между центром пункта C и точкой установки спутникового приемника I выполнены спутниковые измерения приемниками *Sokkia GRX2* в течение 2-х часов в точках C, I и M . С помощью электронного тахеометра *Sokkia CX105* непосредственным измерением определены элементы центрировки l и θ , а нивелиром *Dini 0.3* – превышения h_{IC} . Результаты представлены в таблицах 1 и 2. Если предположить, что СКП 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. На основе формул СКП функции общего вида получены СКП пространственных координат центра C , а также его положения. Полученные результаты представлены в таблице 3. По этим значениям можно сделать вывод, что СКП положения точки C не зависит от B и L ; 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).

В диссертации получена формула погрешности положения т. C (4):

$$M_C = \sqrt{m_l^2 + \frac{l^2 m_{A_c}^2}{\rho^2} + m_{h_c}^2}. \quad (4)$$

Полагая, что СКП аргументов (m_l, m_{A_c}, m_{h_c}) одинаково влияют на СКП функции (M_C), найдены с какими погрешностями надо определять l, A_{IC}, h_{IC} . Из формулы (4) имеем (5):

$$m_l = \frac{M_C}{\sqrt{3}}; \quad m_{A_c} = \frac{\rho M_C}{l\sqrt{3}}; \quad m_{h_c} = \frac{M_C}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Если задать M_C , равными 3 мм и 5 мм, а также $l = 1$ м, 10 м, 50 м, 100 м и вычислить погрешности l, A_{IC}, h_{IC} , то в результате получим данные, приведенные в таблице 4. Анализ данных таблицы 4 и формул

(5) показал, что линейный l и высотный h_{IC} элемент центрировки необходимо определять с погрешностями в корень из трех раз меньше, чем погрешность M_C определения положения центра пункта; погрешность определения A_{IC} , исходя из формул (5) еще зависит от длины l , при этом, чем больше величина l , тем точнее надо определять азимут A_{IC} .

Опираясь на рисунок 2, где $A_{IC} = A_{IM} + 360^\circ - \theta$, будем иметь $m_{A_{IC}} = \sqrt{m_{A_{IM}}^2 + m_\theta^2}$. Применив принцип равных влияний, получим $m_\theta = \frac{m_{A_{IC}}}{\sqrt{2}}$. При разных длинах l и заданных значениях погрешностей

положения точки C , при вычислении m_θ (таблица 4), можно сделать вывод, что чем больше расстояние l , тем точнее необходимо определять угловой элемент центрировки θ ; если принять $M_C = 3$ мм, то в обобщенном виде погрешности определения θ 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).

Учет поправок за уклонение отвесной линии в измеренное горизонтальное направление и в измеренное превышение. Показано, что поправку в измеренное горизонтальное направление за уклонение отвесных линий следует вводить при z в пределах $60^\circ - 10^\circ$, а также при l больше 10 м.

Обосновано, что при уклонении отвесных линий $v = 4''$ и линейном элементе центрировки $l \geq 30$ м необходимо вводить поправку в измеренное превышение за уклонение отвесной линии.

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.

При одностороннем тригонометрическом нивелировании СКП m_h превышения вычисляется по формуле (6):

$$m_h^2 = \text{ctg}^2 z \cdot m_d^2 + \frac{d^2}{\sin^2 z} \cdot \frac{m_z^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_l^2 + m_f^2, \quad (6)$$

где m_d, m_z, m_i, m_l, m_f – СКП измеренных величин: d – горизонтальное проложение между пунктами; z – зенитное расстояние; i – высота прибора; l – высота визирной цели; f – поправка за совместное влияние кривизны Земли и рефракцию.

Для того чтобы оценить точность определения превышения без учета ошибок за кривизну Земли и рефракцию в формуле (6) было принято $m_i = 1$ мм, $m_l = 0$ (т. к. визирование проводится на отражательные пленки ОП), а m_f – не учитывалось. В таблице 5 приведен предрасчет точности одностороннего тригонометрического нивелирования при условии $m_z = 1''$, $m_d = 2$ мм.

Проведенный анализ показывает, 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 использование тригонометрического нивелирования при зенитных расстояниях более 60° , а влияние рефракции, чтобы оно было пренебрегаемо мало, должно быть в три раза меньше, т.е. на уровне 0,7 мм.

Обосновано каким изменением коэффициента рефракции k можно пренебречь. Исходя из формулы вычисления рефракции выразим

$$k = \frac{2Rr}{d^2}, \text{ тогда при } r = 0,7 \text{ мм и } d = 200 \text{ м получим } k = 0,2.$$

В диссертации выполнено **обобщение формул определения коэффициента рефракции k** :

а) По результатам одностороннего тригонометрического нивелирования на эталонном вертикальном базисе (7):

$$k = 1 - \frac{2R}{d} \left(\frac{h_{\text{теор}}}{d} - \text{ctg } z - \frac{i}{d} \right), \quad (7)$$

где $h_{\text{теор}}$ – превышение, полученное из геометрического нивелирования.

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.

б) По разностям измеренных и истинных зенитных расстояний (8):

$$k = \frac{2R(z_{\text{изм}} - z_{\text{теор}})}{d\rho''}, \quad (8)$$

где $\text{ctg } z_{\text{теор}} = \frac{h_{\text{теор}} - i}{d} - \frac{d}{2R}$,

в) По вычисленным и известным превышениям (9):

$$k = \frac{2R\Delta h}{d^2}, \quad (9)$$

где Δh – разница превышений, полученных из тригонометрического и геометрического нивелирования.

Построение вертикального базиса. 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. Предложено для создания базиса использовать идею определения превышений «во всех комбинациях». Рассмотрим предложенную методику на конкретном примере построения вертикально базиса.

Для создания вертикального базиса на одной отвесной линии закрепляют необходимое число точек отражающими пленками ОП, в данном случае это точки A, B, C (рисунок 4), а на поверхности земли – т. 0 и т. 3.

В т. 0 устанавливается электронный тахеометр (рисунок 5), далее измеряются расстояния с помощью диагональной насадки (d_2, d_6, d_7) и непосредственно компарированной рулеткой (d_1, d_3, d_4, d_5).

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

Окончательные значения превышений между точкой т. 0 и точками A, B, C можно получить после уравнивания коррелятным способом. Для этого составляются условные уравнения связи. Далее записываются условные уравнения поправок в матричном виде $AV + W = 0$.

После реализации формул коррелятного способа $NK + W = 0$, получаем вектор поправок к результатам измерений $V = QA^TK$.

Для оценки точности полученных результатов вычисляется $\mu = \sqrt{\frac{V^T Q^{-1} V}{r}}$, а также обратная весовая матрица уравненных значений измеренных величин $Q_{d'} = Q_A \cdot Q$, где $Q_A = E - QA^T(AQA^T)^{-1}A$.

Для определения СКП превышений точек C, B, A над т. 3, составляется вектор-функция и находится обратная весовая матрица вектор-функции $Q_\phi = FQ_d F^T$, где F – матрица частных производных.

По предложенной методике был проведен эксперимент, в результате было получено, что превышения между т.3 и точками на стене *A, B, C* вертикального базиса определены с СКП на уровне 0,6 мм.

Определение коэффициента рефракции на вертикальном базисе.

Для определения суточного хода рефракции на вертикальном базисе были проведены полевые экспериментальные исследования в 2019 г с 8:20 ч. 26 июня до 4:40 ч. 27 июня (всего выполнено 19 циклов измерений). Измерение зенитных расстояний и наклонных расстояний выполнялось электронным тахеометром *Leica Viva TS 16 M R500* с СКП измерения углов 1" и расстояний ($2\text{мм} + 2D10^{-6}$).

На рисунке 3 представлены вычисленные значения коэффициентов рефракции при измерении на т. С. По графику можно сделать вывод, что утром и ночью значения коэффициентов рефракции имеют значения положительные, а днем и вечером – отрицательные. Значения *k* в период проведения эксперимента менялись в пределах от +1,6 до -0,6.

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 Δk 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.

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 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 stationирования.

– обоснованы требования к точности построения внутренних разбивочных сетей способом свободного stationирования на основе заявленной в нормативной документации предельной погрешности взаимного положения габаритных осей, 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 и внутренней сети способом свободного stationирования;

– рассчитана точность способа свободного stationирования (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 сформулированы требования к точности определения элементов центрировки;

– показано, что при высокоточных 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. *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.

2. *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.

3. *Брынь, М. Я.* Оценка точности определения положения точек способом свободного стационарирования / М. Я. Брынь, **Ю. В. Лобанова**, Д. А. Афонин, Г. Г. Шевченко // Геодезия и картография. – 2021. – № 5 – С.2 - 9.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. **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 //

Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2 Proceedings of TRANSOILCOLD-2019, Lecture Notes in Civil Engineering 50, Springer Nature Singapore Pte. Ltd. 2020, p. 121-122.

5. *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.

Публикации в прочих изданиях:

6. **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.

7. *Шевченко, Г. Г.* Об обработке результатов определения пространственного положения деформационных марок с использованием поискового способа методом наименьших квадратов / Г. Г. Шевченко, Д. А. Гура, **Ю. В. Лобанова** // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 653 - 665.

8. **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, 2018, г. Санкт-Петербург. – С.392-398.

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

10. **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.

Свидетельство:

11. **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 30.06.2020 г. – М.: Роспатент, 2020.

Таблица 1 – Приведение координат к центрам пунктов

пункты	Измеренные координаты		$\ell, \text{ м}$ θ $h_{IC}, \text{ м}$	Вычисленные координаты	Измеренные координаты	$\Delta = (5) - (6), \text{ м}$
	$X_I, \text{ м}$ $Y_I, \text{ м}$ Z_I	$X_M, \text{ м}$ $Y_M, \text{ м}$ Z_M		$X_C, \text{ м}$ $Y_C, \text{ м}$ Z_C	$X_C, \text{ м}$ $Y_C, \text{ м}$ Z_C	
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 2 - Приведение к центрам пунктов разностей координат

пункты	Измеренные разности координат	$\ell, \text{ м}$ θ $h_{IC}, \text{ м}$	Вычисленные разности координат	Измеренные разности координат	$\Delta = (4) - (5), \text{ м}$
	$X_M - X_I, \text{ м}$ $Y_M - Y_I, \text{ м}$ $Z_M - Z_I$		$\Delta X_{IC}, \text{ м}$ $\Delta Y_{IC}, \text{ м}$ ΔZ_{IC}	$\Delta X_{IC}, \text{ м}$ $\Delta Y_{IC}, \text{ м}$ ΔZ_{IC}	
1	2	3	4	5	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

Таблица 3 – СКП координат и погрешность пространственного положения

т. С (при $B = 60^\circ, L = 30^\circ$)

$l =$	1 м			10 м			50 м			100 м		
A_{IC}	0°	60°	90°	0°	60°	90°	0°	60°	90°	0°	60°	90°
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

Таблица 4 – Средние квадратические погрешности величин l, A_{IC}, h_{IC}

$l =$	$M_C = 3 \text{ мм}$				$M_C = 5 \text{ мм}$			
	1 м	10 м	50 м	100 м	1 м	10 м	50 м	100 м
m_l (мм)	1,7	1,7	1,7	1,7	2,9	2,9	2,9	2,9
m_{A_C}''	357	36	7	4	595	60	12	6
m_{h_C} (мм)	1,7	1,7	1,7	1,7	2,9	2,9	2,9	2,9
m_{θ}''	252	25	5	2	421	42	8	4

Таблица 5 – Результаты предрасчета точности коэффициента рефракции

$\begin{matrix} z \\ d \end{matrix}$	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



Рисунок 3 – Изменение k при визировании на т. С

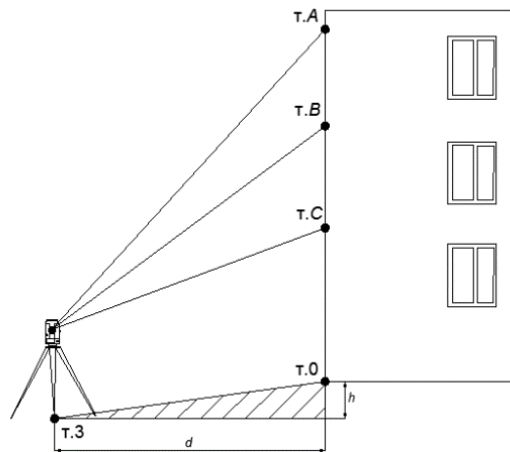


Рисунок 4 – Схема вертикального базиса

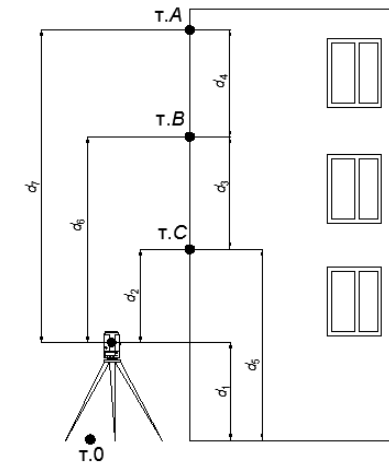


Рисунок 5 – Схема измерения вертикальных расстояний