

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Астапов Андрей Михайлович



Разработка методики определения деформационного состояния инженерных  
сооружений и применяемого технологического оборудования

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Уставич Георгий Афанасьевич

Новосибирск – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	10
1.1 Основные задачи определения деформационного мониторинга зданий и инженерных сооружений.....	10
1.2 Анализ способов и средств определения осадок и деформаций инженерных сооружений и технологического оборудования по высоте.....	17
1.3 Общая технологическая схема контроля кренов высотных сооружений.....	28
1.4 Анализ методик определения кренов сооружений башенного типа .....	40
1.4.1 Способ вертикального проецирования.....	40
1.4.2 Способ направлений (горизонтальных углов).....	41
1.4.3 Способ малых углов .....	43
1.4.4 Способ зенитных расстояний .....	45
1.4.5 Способ координат .....	46
1.4.6 Способ высокоточного нивелирования .....	50
1.4.7 Определение крена спутниковыми технологиями .....	51
1.5 Постановка задач исследований .....	54
2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС .....	56
2.1 Общая характеристика промплощадки АЭС и ТЭС .....	56
2.2 Разработка технологической схемы определения деформаций инженерных сооружений башенного типа с помощью БВС .....	60
2.3 Схема создания планово-высотного обоснования и определение крена трубы.....	65
2.4 Создание и координирование опорных и контрольных марок дымовой трубы.....	68

2.5 Проектирование маршрута аэрофотосъёмки и создание полетного задания .....	71
2.6 Выполнение полетного задания .....	73
2.7 Камеральная обработка материалов аэрофотосъёмки .....	78
2.8. Оценка эффективности предложенной методики определения геометрических параметров вертикальных сооружений .....	87
2.9 Совершенствование методики создания вертикальных планов .....	88
2.10 Применение БВС в качестве подвижной вехи .....	93
<b>3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС .....</b>	<b>99</b>
3.1 Конструктивные и эксплуатационные особенности системы «турбоагрегат – фундамент – основание».....	99
3.2 Расчет точности и цикличности выполнения измерений .....	102
3.3 Расчет и отображение изменений значений центровок роторов валопровода.....	112
3.4 Совершенствование методики поверки тахеометров методом сличения способом двух станций .....	123
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>129</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>131</b>

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Для обеспечения надежного функционирования инженерных сооружений башенного типа, к которым относятся вентиляционные и дымовые трубы атомных и тепловых электростанций, и применяемого на них технологического оборудования, в частности турбоагрегатов, необходимо проводить высокоточные инженерно-геодезические измерения для ведения их деформационного мониторинга как на стадии строительства, так и во время эксплуатации. При этом применяемые методика и приборы для выполнения измерений должны учитывать условия производства геодезических работ и необходимость получения максимально возможной информации о наблюдаемом объекте.

Применительно к дымовым и вентиляционным трубам такой необходимой информацией является величина крена, а к турбоагрегатам – деформационное состояние системы «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО) при различных режимах ее работы. Результаты геодезического мониторинга деформационного состояния указанных объектов являются основанием для определения их технического состояния на данный момент времени, а также его влияния на безопасность дальнейшей эксплуатации. Своевременное обнаружение деформаций, в том числе и недопустимых, а также прогноз их дальнейшего развития позволяют произвести соответствующие мероприятия по ослаблению или полному исключению влияния данного фактора.

К настоящему времени в научно-технической литературе достаточно хорошо освещены способы определения крена дымовых и вентиляционных труб, а также методики определения и анализа деформационного состояния системы ТФО. Однако применяемые на данный момент методики выполнения таких инженерно-геодезических измерений, их объем, а также последующий анализ полученных результатов не в полной мере способствуют проведению объективного анализа деформационного состояния указанных объектов. К таким задачам относятся совершенствование методики определения крена дымовых и вентиляционных труб различ-

ной высоты в стесненных условиях и определение деформационного состояния системы ТФО с учетом влияния тепловых деформаций всех ее составляющих.

Для получения достоверных данных геодезических измерений необходимо, чтобы применяемые при этом приборы, в частности тахеометры, проходили периодическую метрологическую поверку не только в специализированных организациях, но и после случайных механических ударов, непосредственно на промплощадке при выполнении работ.

В связи с этим совершенствование методики и технологической схемы производства инженерно-геодезических измерений для определения крена инженерных сооружений башенного типа, например на АЭС и ТЭС, и деформационного состояния работающих на них турбоагрегатов, а также методики проведения метрологической поверки применяемых при этом тахеометров является актуальной научно-технической задачей.

*Степень разработанности темы.* Разработкой методов, средств и методик производства высокоточных инженерно-геодезических измерений за деформационным состоянием инженерных сооружений и применяемого на них технологического оборудования занимались и занимаются такие ученые в области прикладной геодезии, как Асташенков Г. Г., Брайт П. И., Брынь М. Я., Буюкян С. П., Буш В. В., Васютинский И. Ю., Видуев, Н.Г., Жуков Б. Н., Зайцев А. К., Зеленский А. М., Карлсон А. А., Карпик А. П., Кафтан В. И., Ключин Е. Б., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Михелев Д. Ш., Мустафин М. Г., Новак В. Е., Ознамец В. В., Пискунов М. Е., Полянский А. В., Раинкин В. Я., Рязанцев Г. Е., Сердаков Л. Е., Симонян В. В., Соловицкий А. Н., Федосеев Ю. Е., Хорошилов В. С., Шеховцов Г. А., Шоломицкий А. А., Шторм В. В., Ямбаев Х. К. и многие другие.

*Цель и задачи исследования.* Целью диссертационного исследования является совершенствование методики определения деформационного состояния инженерных сооружений башенного типа на атомных и тепловых электростанциях и действующего на них технологического оборудования, а также усовершенствование метрологической поверки применяемых тахеометров.

Основные задачи исследований:

- выполнить анализ существующих способов, методик и средств выполнения инженерно-геодезических измерений, предназначенных для определения деформационного состояния инженерных сооружений и применяемого технологического оборудования;
- разработать методику определения крена инженерных сооружений башенного типа с применением беспилотных авиационных систем (БАС);
- предложить технологическую схему визуализации тепловых деформаций фундамента турбоагрегата и обосновать цикличность измерений осадок для определения изменений значений центровок роторов валопровода;
- усовершенствовать технологическую операцию поверки тахеометра в условиях промплощадки на основе метода сличения с применением в качестве эталона высокоточного тахеометра.

*Объект научного исследования.* Объектом исследования являются геодезическое обеспечение инженерных сооружения АЭС и ТЭС башенного типа и применяемого на них технологического оборудования, а также используемые при выполнении измерений геодезические приборы.

*Предметом исследования* являются методики определения крена инженерных сооружений АЭС и ТЭС башенного типа и деформационного состояния применяемых на них турбоагрегатов, а также методики определения метрологических параметров тахеометров.

*Научная новизна диссертационных исследований* заключается в следующем:

- на основе применения беспилотных авиационных систем разработана методика определения крена, а также геометрии инженерных сооружений башенного типа (дымовых и вентиляционных труб), позволяющая автоматизировать процесс выполнения инженерно-геодезических измерений;
- выполнено обоснование цикличности высокоточного нивелирования осадочных марок фундаментов турбоагрегатов мощностью 500 МВт и более, а также предложена технологическая схема визуального отображения в 3D-формате их теп-

ловых деформаций, которая позволяет в зависимости от режима работы турбоагрегата «останов-пуск-работа» определять характер и величину изменения значений центровок роторов валопровода;

– усовершенствована технологическая операция поверки тахеометра с применением в качестве эталона высокоточного тахеометра, позволяющая выполнять поверку применяемых тахеометров на промплощадке АЭС и ТЭС без использования эталонного линейного базиса.

*Теоретическая значимость* работы заключается в совершенствовании методики определения деформационного состояния инженерных сооружений башенного типа с применением БАС, изменения геометрических параметров роторов валопровода и метрологических поверок тахеометров.

*Практическая значимость* работы заключается в том, что разработанные методики позволяют увеличить количество определяемых геометрических параметров сооружений башенного типа, повысить надежность работы системы ТФО и выполнить метрологическую поверку тахеометров непосредственно на промплощадке АЭС и ТЭС.

*Методология и методы исследования* включают в себя использование теории ошибок измерений, статистическую обработку результатов измерений, методы математического моделирования и априорной оценки точности. Для обработки производственных измерений использовалось программное обеспечение: Microsoft Excel, AutoCAD, Credo DAT, Trimble Business Center, Leica Cyclone, Microstation.

*Положения, выносимые на защиту:*

– разработанная методика определения крена и геометрических параметров инженерных сооружений башенного типа путем применения БАС позволяет автоматизировать процесс выполнения геодезических измерений с сохранением необходимой точности получаемых результатов;

– выполненное совершенствование технологической схемы визуализации тепловых деформаций и обоснование цикличности наблюдений осадок и деформаций фундаментов турбоагрегатов мощностью 500 МВт и более позволяет определять

характер и величину изменения значений центровок роторов валопровода в зависимости от режима работы турбоагрегата;

– усовершенствованная методика метрологической поверки тахеометров с применением в качестве эталона высокоточного тахеометра позволяет выполнять ее на объекте производства инженерно-геодезических работ (АЭС и ТЭС) без использования эталонного линейного базиса.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Диссертация соответствует областям исследования: 12 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений, в том числе с применением робототехники. Геодезический мониторинг устойчивости зданий и сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов: 15 – Геодезическая метрология. Разработка методов, средств и нормативных документов для метрологического обеспечения геодезических средств измерений. Создание и функционирование эталонных геодезических полигонов, базисов и компараторов для поверки, калибровки и аттестации геодезических средств измерений паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

*Степень достоверности и апробация результатов исследования.* Результаты исследований прошли апробацию на сооружении башенного типа промышленного предприятия. Основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021», «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2022», «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2023».

*Публикации по теме диссертации.* Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 9 научных статьях, 2 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изда-



ний, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 – патент РФ на изобретение.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 147 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования, содержит 31 таблицу и 33 рисунка.

# 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## 1.1 Основные задачи определения деформационного мониторинга зданий и инженерных сооружений

Для обеспечения безопасной эксплуатации инженерных сооружений на всех этапах их жизненного цикла должны выполняться соответствующие (расчетные) требования к основанию, строительным конструкциям и геометрии их взаимного положения. Основной задачей деформационного мониторинга зданий и инженерных сооружений является [5, 13, 39, 55]:

- периодическое определение абсолютных и относительных величин их осадок и деформаций;
- установление фактических предельно допустимых величин деформаций;
- выявление причин возникновения осадок и деформаций;
- установление степени опасности деформаций для конкретного инженерного сооружения;
- прогнозирование развития деформационных процессов на стадии строительства и эксплуатации инженерных сооружений с выдачей рекомендаций по обеспечению геометрических параметров строительных конструкций.

На основании анализа полученных результатов измерений делается техническое заключение о состоянии и прогнозе развития выявленных деформаций, а также разрабатываются рекомендации по их уменьшению. Одновременно решается вопрос о продолжении выполнения мониторинга и цикличности (увеличения или уменьшения) выполнения соответствующих инженерно-геодезических измерений, а также целесообразности применяемой методики.

Выбор методики измерений, а также их точность и цикличность в значительной степени зависят от уровня ответственности здания или инженерного сооружения.

Согласно требованиям нормативных документов [29, 30] здания и инженерные сооружения по уровню ответственности подразделяются на четыре класса:

- особо высокий уровень ( $\gamma = 1,2$ );
- высокий уровень ( $\gamma = 1,1$ );
- нормальный уровень ( $\gamma = 1,0$ );
- пониженный уровень ( $\gamma = 0,8$ ).

В данном случае  $\gamma$  – коэффициенты, при использовании которых учитываются возможные неблагоприятные отклонения расчетной схемы конкретного строительного объекта от фактических условий его эксплуатации, а также необходимость повышения его надежности.

Уровень ответственности здания и сооружения устанавливается генподрядчиком по согласованию с заказчиком.

Уровни ответственности зданий и сооружений устанавливаются в следующих случаях [27, 29, 30, 31]:

- при оценке долговечности эксплуатации зданий и сооружений;
- при разработке необходимого объема и вида проектных работ, а также различных проводимых инженерных изысканий (инженерно-геологических, инженерно-геодезических) и экспериментальных исследований;
- при разработке конструктивных решений надземной и подземной частей зданий и сооружений;
- при разработке программ научно-технического сопровождения, при проектировании, изготовлении и монтаже строительных конструкций;
- при разработке правил приемки, испытаний, эксплуатации и технической диагностики строительных возведенных объектов.

К сооружениям особо высокого уровня ответственности относятся:

- сооружения с пролетами более 100 м;
- объекты гидро- и теплоэнергетики мощностью более 1 000 МВт;
- объекты жизнеобеспечения городов и населенных пунктов.

К сооружениям высокого уровня ответственности относятся:

– сооружения с пролетами более 60 м, жилые и административные здания высотой более 75 м;

– мачты и башни сооружений связи и телерадиовещания, трубы и градирни высотой более 100 м, тоннели, трубопроводы на дорогах высшей категории или имеющие протяженность более 500 м;

– крупные учреждения здравоохранения и торговые предприятия, на которых находится значительное количество людей;

– мостовые сооружения с пролетами длиной 200 м и более.

К сооружениям нормального уровня ответственности относятся:

– основные объекты машиностроения, перерабатывающих и других отраслей;

– тоннели протяженностью менее 500 м, мостовые сооружения с пролетами менее 200 м.

К сооружениям пониженного уровня ответственности относятся склады временного содержания, бытовки вахтового персонала, теплицы.

Применительно к производству инженерно-геодезических измерений инженерные сооружения по точности взаимного расположения строительных конструкций и частей технологического оборудования подразделяются:

– на прецизионные (при отклонении элементов от проектных значений взаимного расположения от 0,2 до 1,0 мм);

– повышенной точности (при отклонении элементов от проектных значений взаимного расположения от 1,0 до 10,0 мм);

– технической точности (при отклонении элементов от проектных значений взаимного расположения 10,0 мм и более).

С учетом указанных отклонений (допусков) элементов строительных конструкций или частей технологического оборудования от проектных значений взаимного расположения производится расчет точности выполнения инженерно-геодезических измерений согласно требованиям [30], приведенным в таблице. 1.1.

Таблица 1.1 – Вид допусков и формулы для вычисления значения единицы допуска согласно ГОСТ 58942–20

Характеристика технологического процесса или операции	Вид допуска геометрического параметра	Формула для вычисления, мм	Значение $\alpha$
Изготовление	Допуск линейного размера	$i = \alpha_i (0,8 + 0,001\sqrt{L}) \times (\sqrt[3]{L + 25} + 0,01\sqrt[3]{L^2}),$ где $L$ , мм	1,0
	Допуск прямолинейности		1,0
	Допуск плоскостности		1,0
	Допуск перпендикулярности		0,6
	Допуск равенства диагоналей		1,0
Разбивка	Допуск разбивки точек и осей в плане	$i = \alpha_i L,$	1,0
	Допуск передачи точек и осей по вертикали	где $L$ , м	0,4
	Допуск створности точек		0,25
	Допуск разбивки высотных отметок		0,6
	Допуск передачи высотных отметок		0,25
	Допуск перпендикулярности осей		0,4
Установка (монтаж)	Допуск совмещения ориентиров	$i = \alpha_i (0,8 + 0,001\sqrt{L}) \times (\sqrt[3]{L + 25} + 0,01\sqrt[3]{L^2}),$ где $L$ , мм	1,6
	Допуск симметричности установки		0,6

Исходя из требований таблицы 1.1, максимально допустимое значение абсолютной ошибки производства инженерно-геодезических измерений можно вычислить по формуле [31]:

$$m_{\text{пред}} < 0,4\Delta x, \quad (1.1)$$

где  $m_{\text{пред}}$  – максимально допустимое значение абсолютной ошибки измерений;

$\Delta x$  – допуск на отклонение контролируемого параметра.

Для перехода от предельной ошибки к средней квадратической ошибке (СКО) в зависимости от класса точности возводимого инженерного сооружения применяются коэффициенты 2,0; 2,5 и 3,0. Если принять коэффициент перехода к СКО равным 2,5, то будем иметь

$$m < 0,16\Delta x, \quad (1.2)$$

Тогда с учетом требуемых величин СКО измерений (таблица 1.2) выбирается (разрабатывается) технологическая схема (методика) выполнения инженерно-геодезических измерений

Таблица 1.2 – Требования к точности и периодичности выполнения инженерно-геодезических измерений

Параметры	Инженерные сооружения по точности взаимного расположения конструктивных элементов		
	Прецизионные (уникальные) инженерные сооружения	Повышенной точности	Технической точности
Тип инженерных сооружений	Ускорители заряженных частиц, атомные и гидравлические электростанции, радиоантенны	Тепловые электростанции, тоннели, металлургические заводы	Прочие заводы, отдельные цеха, трубы, земляные сооружения
Периодичность мониторинга	Непрерывный мониторинг (ежегодно, ежеквартально, ежемесячно)	Непрерывный и циклический мониторинг (ежегодно, ежеквартально, один раз в несколько лет)	Циклический мониторинг ежегодно, один раз в несколько лет

## Окончание таблицы 1.2

Параметры	Инженерные сооружения по точности взаимного расположения конструктивных элементов		
	Прецизионные (уникальные) инженерные сооружения	Повышенной точности	Технической точности
Требуемая СКО монтажа и измерения деформаций	0,05–0,20 мм	0,10–0,50 мм	0,5–1,0 мм
Тип геодезических измерений	Высокоточные инженерно-геодезические измерения	Высокоточные и точные инженерно-геодезические измерения	Точные и технические инженерно-геодезические измерения
Применяемое оборудование	Высокоточные тахеометры, лазерные трекеры, высокоточные нивелиры, створные измерения	Высокоточные и точные тахеометры, лазерные трекеры, высокоточные и точные нивелиры, створные измерения	Точные тахеометры, точные и технические нивелиры, стальные и лазерные рулетки
Применяемые методики	Стандартные и специальные методики измерений	Стандартные методики измерений	Стандартные методики измерений
Условия измерений	Благоприятные условия измерений	Благоприятные условия измерений. Измерения в условиях влияния внешних условий	Измерения при любом влиянии внешних условий

Применительно к строительству и эксплуатации тепловых электростанций (ТЭС) основными объектами деформационного мониторинга являются здание главного корпуса, турбоагрегаты различной мощности и дымовые трубы. При этом особое внимание уделяется определению деформационного состояния системы «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО). Это обусловлено тем, что в настоящее время ведется строительство и эксплуатация ТЭС и АЭС, на которых применяются турбоагрегаты мощностью от 150 до 1 200 МВт. При их эксплуатации про-

водится высокоточное геометрическое нивелирование короткими лучами по маркам верхней плиты или горизонтальному разъему турбоагрегата с целью определения положения линии роторов (валопровода). По результатам нивелирования определяются величины смещения полумуфт роторов по окружности и по торцу (величины их расцентровок) [20, 46, 120]. При этом необходимо учитывать суммарную деформацию системы ТФО, вызванную:

- прогибом нижней плиты турбоагрегата;
- тепловыми деформациями колонн фундамента;
- тепловыми деформациями верхней плиты фундамента;
- тепловыми деформациями нижней части цилиндров турбоагрегата.

Суммарное влияние данных деформаций приводит к изменению значений центровок роторов, установленных при монтаже линии роторов. В случае значительных деформаций линии валопровода увеличивается вибрация системы ТФО до критических величин, что приводит к останову (иногда и аварийному) турбоагрегата.

Важным при анализе причин изгиба линии валопровода является установление (разделение факторов) его причин с целью последующего изменения значений центровок роторов и, по возможности, устранения или ослабления влияния этих факторов. Для этого выполняется высокоточное нивелирование с определенной периодичностью и с учетом режима работы турбоагрегата.

Также важной задачей при эксплуатации ТЭС и других промышленных предприятий является обеспечение условий для замены технологического оборудования, например, технологических труб (например, паропроводов различного давления), которые могут располагаться как в горизонтальном, так и в вертикальном положении. Для составления проекта их ремонта или замены производятся обмеры прилегающего пространства с учетом габаритов нового оборудования. Для этого часто используются топографические планы масштаба 1 : 500. Вместе с тем, для строительства инженерных сооружений рекомендуется применение вертикальных топографических планов [123, 126]. Их применение позволяет с большей достовер-



ностью определять необходимый объем строительных и строительного-монтажных работ. При необходимости с применением 3D-моделирования можно также наблюдать за деформационным состоянием объектов, например, скальных пород в горной местности, которые находятся в непосредственной близости от инженерного сооружения.

## 1.2 Анализ способов и средств определения осадок и деформаций инженерных сооружений и технологического оборудования по высоте

Для определения деформационного состояния инженерных сооружений и применяемого на них технологического оборудования по высоте на промплощадке создается высотное обоснование, отметки реперов которого могут быть как в Балтийской, так и в условной системе высот. При использовании Балтийской системы высот обоснование промплощадки связывается с реперами государственной высотной сети I или II класса.

Непосредственно создание высотной сети на промплощадке может производиться следующими способами:

- высокоточным нивелированием I или II класса по методике, рекомендованной инструкцией по нивелированию [22, 43];
- высокоточным нивелированием I или II класса по методике, рекомендованной нормативными документами [95, 104, 105, 107, 108, 109];
- высокоточным геометрическим нивелированием 1-го или 2-го разрядов по методикам, рекомендованным в научно-технической литературе [21, 47, 83, 84].

**Государственное нивелирование I, II, III, IV классов.** Нивелирная сеть РФ состоит (таблица 1.3) из нивелирных сетей I, II, III, IV классов [23], которая создавалась и создается (обновляется) в настоящее время по принципу перехода от общего к частному.

В настоящее время сети нивелирования I и II классов являются главной высотной основой на всей территории РФ, а также ряда стран СНГ.

Таблица 1.3 – Основные характеристики нивелирования I, II, III и IV классов

Наименование показателя	I класс	II класс	III класс	IV класс
СКО мм/км, не более	0,8	2,0	5,0	10,0
Допустимая невязка в полигонах и по линиям нивелирования, мм	$3 \text{ мм} \sqrt{L}$	$5 \text{ мм} \sqrt{L}$	$10 \text{ мм} \sqrt{L}$	$20 \text{ мм} \sqrt{L}$
Нормальная длина визирного луча, м	50	65	75	100
Максимальная длина визирного луча, м	50	75*	100**	150**
Допустимое неравенство плеч на станции, м	0,5	1,0	2,0	5,0
Допустимое накопление неравенства плеч по секции, м	1,0	2,0	5,0	10,0
Минимальная высота луча визирования над подстилающей поверхностью при нормальной длине визирного луча, м	0,8	0,5	0,3	0,2
Минимальная высота луча визирования над подстилающей поверхностью при укороченной длине визирного луча (до 25 м), м	0,5	0,3	–	–
Допустимая разность превышений по красной и черной сторонам реек (по основной и дополнительной шкалам), мм	0,5	0,7	3,0	5,0
* При увеличении зрительной трубы не менее 44 <sup>x</sup> и хорошей видимости.				
** При увеличении зрительной трубы не менее 35 <sup>x</sup> и хорошей видимости.				

С помощью нивелирных сетей I и II классов решаются следующие научно-технические и производственные задачи [22]:

- изучение фигуры физической поверхности Земли и ее внешнего гравитационного поля;
- определение разности высот и наклонов среднеуровенных поверхностей трех океанов, которые омывают территорию России (СССР);
- определение вертикальных перемещений участков земной поверхности на созданных техногенных геодинамических полигонах районы добычи нефти и газа, промплощадки атомных и гидравлических электростанций;
- создание высотной сети на промплощадках для целей строительства и эксплуатации инженерных сооружений и применяемого на них технологического оборудования.

С началом развития спутниковых технологий в состав нивелирных сетей I и II классов начали включаться также пункты государственной спутниковой геодезической сети, к которой относятся:

- фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС);
- высотная геодезическая сеть (ВГС);
- спутниковая геодезическая сеть 1-го класса (СГС-1).

В соответствии с требованиями инструкции [23], нивелирование I и II классов раньше выполнялось высокоточными нивелирами с цилиндрическим уровнем типа Н-05 и Ni004, а также нивелирами с компенсатором типа Ni002 – для нивелирования I класса и Ni007 – для нивелирования II класса.

В настоящее время нивелирование I и II классов в основном выполняется цифровыми нивелирами, например типа DiNi12, DiNi10.

*Геометрическое нивелирование короткими лучами.* В настоящее время для определения деформационного состояния инженерных сооружений и применяемого технологического оборудования в основном применяется высокоточное геометрическое нивелирование короткими лучами. Этот способ нивелирования был разработан на кафедре прикладной геодезии МИИГАиК [55, 76]. Необходимость в разработке данного способа нивелирования была обусловлена выполнением высокоточных инженерно-геодезических работ на уникальных инженерных сооружениях (ускорители заряженных частиц). Если нивелирование выполняется в благоприятных внешних условиях, то средняя квадратическая ошибка определения превышения на станции при длине визирного луча от 5 до 15 м составляет от 0,03 до 0,10 мм [55, 76].

Для обеспечения такой высокой точности измерения превышения на станции необходимо учитывать ряд следующих условий:

- исправлять величину угла  $i$  до 6,0–8,0";
- проводить дополнительную термоизоляцию нивелира с целью уменьшения ошибки за изменение угла  $i$ ;
- выполнять нивелирование на станции из середины с неравенством плеч до 20 см;
- с целью повышения точности измерения превышения ( $m_h = 0,03–0,05$  мм) при использовании оптических нивелиров осадочные марки устанавливать на од-

ной высоте с точностью 2–3 мм для того, чтобы выполнять визирование на одни и те же штрихи инварной рейки;

– увеличивать число измерений превышения на станции до четырех (при двух горизонтах нивелира) в одном направлении хода;

– максимально уменьшать влияние возмущающих воздействий с применением амортизационных подкладок.

Последнему фактору уделялось значительное внимание [122], так как при определении деформации технологического оборудования при строительстве и эксплуатации промышленных предприятий (АЭС, ГРЭС, ТЭЦ) на величину СКО измерения превышения влияет вибрация, особенно низкочастотная вибрация. В связи с этим при выполнении высокоточного нивелирования в настоящее время применяются амортизационные прокладки, изготовленные из войлока или из мягкой резины, которые помещаются под ножки штатива.

Также существенное влияние на точность нивелирования влияет резкий перепад температур и возникающая при этом турбулентность воздуха, которые имеют место, например, в районе расположения цилиндра высокого давления (ЦВД) турбоагрегатов различной мощности. Уменьшить их влияние методикой измерений не представляется возможным. Поэтому циклы наблюдений часто планируются на период останова турбоагрегата.

Применительно к выполнению геометрического нивелирования короткими лучами предложены различные методики его выполнения и технологические допуски на станции. Так, согласно ГОСТ 24846–2012 [28] технические допуски на выполнение нивелирования короткими лучами приведены в таблице 1.4.

Авторы работы [83] предложили пять разрядов инженерно-геодезического нивелирования (таблица 1.5), реализация которых может выполняться по разным программам наблюдения на станции. Отличительной особенностью предлагаемой классификации является возможность получения на станции измерения превышения с СКО 0,05 мм. Для получения такой ошибки превышение измеряется 8 раз со сменой горизонта нивелира.

Таблица 1.4 – Характеристики геометрического нивелирования при наблюдениях за осадками зданий и сооружений [28]

Условия геометрического нивелирования	Основные технические характеристики и допуски для геометрического нивелирования классов			
	I	II	III	IV
Применяемые нивелиры	Н-05 и равноточные ему		Н-3 и равноточные ему	
Визирный луч: – максимальная длина, м – минимальная высота над препятствием, м	25 1,0	40 0,8	50 0,5	100 0,3
Неравенство плеч, м, на станции не более	0,2	0,4	1,0	3,0
Накопление неравенств плеч в замкнутом ходе не более, м	1,0	2,0	5,0	10,0
Допускаемая невязка ( $f_{\text{доп}}$ ) в замкнутом ходе ( $n$ – число станций), мм	$\pm 0,3 \sqrt{n}$	$\pm 0,5 \sqrt{n}$	$\pm 1,5 \sqrt{n}$	$\pm 5,0 \sqrt{n}$
СКО измерения превышения на станции $m_{\text{ст}} = f_{\text{доп}} / 2$ , мм	0,15	0,25	0,75	2,50
Допускаемая ошибка измерения вертикальных перемещений, мм	1	2	5	10

Таблица 1.5 – Классификация разрядов инженерно-геодезического нивелирования с применением оптических нивелиров

Разряд нивелирования	Предельная длина визирного луча, м	$m_{\text{ст}}$ , мм	Число измеренных превышений на станции	Допустимая высота луча над препятствием и над пяткой рейки, мм	Неравенство расстояний, м		Увеличение зрительной трубы, не менее *	СКО самоустановки компенсатора $m''$ к
					на станции	в секции		
1	10	0,05	8	0,1– 0,5	0,1	–	30	0,1"
2	25	0,15	4	0,1 – 1,5	0,3	-	30	0,1"
3	50	0,25	4	0,3 – 2,5	1,0	2,0	30	0,5"
4	75	0,50	4	0,1– 3,0	2,0	5,0	25	0,5"
5	100	3,00	2	–	–	–	20	1,0"

Автор работы [39] предложил классы высокоточного нивелирования короткими лучами, выполняемого оптическими нивелирами, разделить по величине СКО измерения превышения на станции (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Технические характеристики высокоточного геометрического нивелирования короткими лучами [39]

№ п/п	Наименование характеристик	Классы нивелирования			
		ГН-005	ГН-010	ГН-025	ГН-050
1	Предельная длина визирного луча, м	10	20	35	50
2	Оптимальная длина визирного луча, м	5–7	10–15	15–25	25–35
3	Неравенство длин визирных лучей на станции не более, м	0,05	0,10	0,20*–0,30	0,30**–0,50
4	Высота визирного луча над препятствием не менее, м	0,5	0,5	0,5	0,5
5	Число горизонтов	2	2	2	2
6	Число направлений	2	1	1	1
7	Точность отсчитывания по барабану оптического микрометра, деления	0,1	0,1	1	1
8	Средняя квадратическая ошибка определения среднего превышения на станции (не более), мм	0,05	0,10	0,25	0,50

*Примечания:* \* – первый показатель применяют при нивелировании по осадочным маркам, второй – по костылям; нивелирование ГН-005 и ГН-010 выполняют одной рейкой, а ГН-025 и ГН-050 – двумя рейками.  
\*\* при использовании нивелиров с визуальным отсчитыванием.

Из таблицы следует, что автор [39] предлагает следующие требования к выполнению нивелирования:

– нивелирования I класса (ГН-005) рекомендовано выполнять при двух горизонтах инструмента и в двух направлениях;

– нивелирование II класса (ГН-010) рекомендовано выполнять при двух горизонтах, но в одном направлении;

– неравенство плеч на станции ГН-005 и ГН-010 уменьшить до 0,1 м.

Необходимо отметить, что для получения на станции величины СКО, равной 0,05 мм, требуется тщательное выполнение установленных рекомендаций, а также наличие благоприятных внешних условий (в основном отсутствия вибрации системы «штатив – нивелир» и резкого перепада температур).

В таблицах 1.3 и 1.4 нивелирование разделяется по классам, что в некоторой степени приводит к путанице при выборе допусков. Поэтому с целью разделения назначений нивелирования целый ряд авторов предложили разрядное высокоточное нивелирование. Так, автор работы [47] использует при выполнении работ на ГЭС разрядное нивелирование (таблица 1.7). Методика выполнения нивелирования по данной классификации предусматривает применение нивелиров с визуальным отсчитыванием.

Таблица 1.7 – Технические характеристики разрядного нивелирования для измерения осадок гидротехнических сооружений [47]

№ п/п	Наименование характеристик	Разряд нивелирования		
		I	II	III
1	Средняя длина визирного луча, м	25,0	25,0	50,0
2	Неравенство длин визирных лучей на станции, м (не более)	0,5	0,5	1,0
3	Накопление неравенств длин в ходе, м	1,0	1,0	2,0
4	Высота визирного луча над препятствием, м (не более)	0,8	0,8	0,3
5	Число горизонтов нивелира	2	2	1
6	Число направлений	2	1	1
7	Средняя квадратическая ошибка измерения среднего превышения на станции, мм (не более)	0,08	0,13	0,40
8	Предельное расхождение прямого и обратного ходов (для III – невязка), мм	$0,3\sqrt{n}$	$0,5\sqrt{n}$	$1,2\sqrt{n}$
<i>Примечание.</i> Данные требования относятся к нивелирам с визуальным отсчитыванием.				

Из таблицы следует, что основными техническими характеристиками высокоточного нивелирования являются:

– для нивелирования I и II разрядов, а также ГН005 и ГН010 длина визирного луча так же, как и в нормативном документе ГОСТ 24846–2012 [28], уменьшилась до 25,0 м;

– основной характеристикой качества выполнения нивелирования является величина СКО измерения превышения на станции, которая получается из нескольких горизонтов нивелира (четырёх для I разряда и двух для II разряда);

– в результате этого при нивелировании для I разряда превышение на станции измеряется восемь раз, а II разряда – четыре.

С появлением в геодезическом производстве цифровых нивелиров методика его выполнения значительно изменилась вследствие наличия на рейке одной штрихкодовой шкалы. Соответственно изменяются технологические допуски на выполнение измерений на станции. Так, авторами [83] предлагается классификация разрядов инженерно-геодезического нивелирования с применением цифровых нивелиров (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Классификация разрядов инженерно-геодезического нивелирования с применением цифровых нивелиров

Разряд нивелирования	Предельная длина визирного луча, м	m <sub>ст</sub> , мм	Число измеренных превышений на станции	Допустимая высота луча над препятствием и над пяткой рейки, мм	Неравенство расстояний, м		Увеличение зрительной трубы, не менее	СКО самоустановки компенсатора m'' к
					на станции	в секции		
1	10	0,10	4	0,2 – 0,5	0,1	–	30	0,1"
2	25	0,20	4	0,2 – 1,5	0,3	2,0	30	0,1"
3	50	0,50	2	1,0 – 2,0	1,0	2,0	30	0,5"
4	75	1,00	2	1,0 – 3,0	2,0	5,0	25	0,5"
5	100	3,00	2	–	–	–	20	1,0"

Реализация рассмотренных классов (разрядов) высокоточного нивелирования короткими лучами имеет целый ряд особенностей:

– нивелирные ходы на промплощадке, как правило, выполняются при благоприятных внешних условиях и при более коротких визирных лучах, что значительно уменьшает влияние вертикальной рефракции на результаты нивелирования;

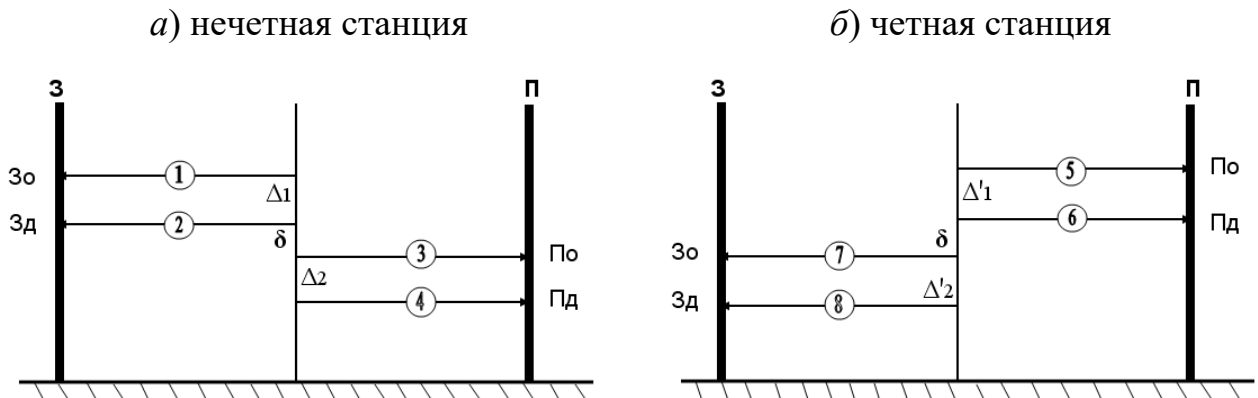
– при выполнении нивелирования штатив устанавливается на твердый грунт или бетонное основание внутриплощадной дороги, что значительно уменьшает оседание системы «штатив – нивелир»;



– длина отдельных нивелирных ходов в среднем равна 0,8–1,0 км, что практически не приводит к накоплению заметных по величине случайных и систематических (в основном из-за оседания системы «штатив – нивелир») ошибок.

Важным фактором при выполнении нивелирования является применение программы наблюдений на станции. При выполнении государственного нивелирования оптическими нивелирами применяется только симметричная программа наблюдения на станции: ЗоПоПдЗд (нечетная) и ПоЗоЗдПд (четная). В этом случае оседание системы «штатив – нивелир» практически полностью компенсируется на каждой станции.

Если штатив устанавливается на твердый грунт или бетонное основание (внутри инженерного сооружения), то можно применять несимметричную программу наблюдений на одной станции, но симметричную на двух, т. е. ЗоЗдПоПд (нечетная) и ПоПдЗоЗд (четная). На рисунке 1.1 показана схема компенсации оседания системы «штатив – нивелир» на двух смежных станциях (из восьми отсчетов).



$\Delta_1, \Delta_2$  – оседание системы «штатив – нивелир» на нечетной станции;  
 $\Delta'_1, \Delta'_2$  – оседание системы «штатив – нивелир» на четной станции;  
 $\delta$  – оседание системы «штатив – нивелир» между отсчетами по задней и передней рейкам

Рисунок 1.1 – Схемы компенсации перемещения штатива из двух станций

Так как  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta'_1 = \Delta'_2$ , то на паре станций оседание системы компенсируется.

Аналогичным образом перемещение системы «штатив – нивелир» происходит и при применении цифровых нивелиров.

Известно, что применение цифровых нивелиров по сравнению с нивелирами с визуальным отсчитыванием (оптическими нивелирами) имеет целый ряд следующих преимуществ:

- электронное взятие отсчетов по штрихкодовой рейке и их запись в памяти;
- вычисление превышения при использовании стандартной (принятой данной фирмой) программой для работы на станции;
- введение поправок в превышение за влияние величины угла  $i$ ;
- контроль допусков на неравенство плеч;
- вычисление СКО выполнения измерений на нивелирной станции;
- контроль приведения нивелира в рабочее положение по круглому уровню в процессе выполнения измерений на нивелирной станции.

Вместе с тем, недостатком цифровых нивелиров является:

- влияние вибрации на систему «штатив – цифровой нивелир» при выполнении нивелирования на промплощадке и возле работающего оборудования, например, турбоагрегатов, вследствие чего часто невозможным является взятие отсчета по штрихкодовой рейке;
- значительные трудности взятия отсчета по штрихкодовой рейке вследствие попадания в объектив солнечных лучей (если штрихкодová рейка располагается по направлению восходящего или заходящего Солнца) или направленного искусственного освещения;
- влияние технологического оборудования или переплетения труб на взятие отсчета (для взятия отсчета по штрихкодовой рейке необходимо наличие на ней видимого участка длиной не менее 230 мм).

Указанные недостатки приводят к необходимости выбирать нивелирную станцию с таким расчетом, чтобы рейка располагалась не по направлению Солнца или яркого источника света, а также был открыт ее участок длиной не менее 230 мм. Эти факторы приводят к увеличению времени на выбор нивелирной станции,

а также к увеличению времени на выполнение измерений на станции и в нивелирном ходе в целом. Практика применения цифровых нивелиров показывает, что при наличии значительного количества различных труб, кабелей, слабого освещения (котельное отделение ТЭС) продвиг работ по сравнению с оптическими нивелирами уменьшается на 30–40 %.

Также при выполнении нивелирования цифровыми нивелирами необходимо учитывать тот факт, что на станции можно измерить только одно превышение, так как штрихкодированная рейка имеет одну шкалу. В связи с этим для повышения точности и надежности измерений рекомендуется выполнять нивелирование при двух горизонтах.

Из сказанного следует, что метод геометрического нивелирования короткими лучами в настоящее время является основным при определении деформационного состояния инженерных сооружений и оборудования. Однако с появлением в геодезическом производстве высокоточных тахеометров начал совершенствоваться и применяться тригонометрический способ нивелирования [9, 68, 76, 84], первые исследования которого были проведены в МИИГАиК [76], а затем продолжены в других организациях. На основании первых результатов применения высокоточных тахеометров был разработан тригонометрический способ нивелирования короткими лучами [9, 86, 84] и предложена его классификация [84]. В таблице 1.9 приведены технологические допуски на его выполнение.

Таблица 1.9 – Разряды тригонометрического нивелирования короткими лучами

Разряды	Длина визирного луча, м	СКО угла наклона	СКО измерения расстояния, мм	Число приемов	Высота визирования над пяткой, м	Максимальный угол наклона	$m_{\text{ист}}$ , мм	Неравенство плеч, м
1	10	2,0"	2,0	4	0,3	20	0,15	2,0
2	25	2,0"	2,0	2	0,5	30	0,25	5,0
3	50	2,0"	2,0	2	1,0	30	0,50	10,0
4	75	3,0"	5,0	2	1,0	50	1,00	10,0
5	100	3,0"	5,0	1	2,0	100	3,00	–

Исследованиями установлено, что при благоприятных внешних условиях СКО измерения превышения при длине визирного луча до 8–10 м может быть не хуже 0,15 мм (из четырех измерений).

Для ведения непрерывного деформационного мониторинга инженерных сооружений и технологического оборудования в целом ряде случаев применяются гидростатические системы, позволяющие измерять превышение (приращение) с СКО порядка 0,03–0,05 мм [14, 72].

В последние 5–7 лет для определения пространственного положения технологического оборудования прецизионных сооружений начали применяться лазерные трекеры, принцип действия которых также основан на измерении расстояния, а также горизонтальных и вертикальных углов. В результате этого можно определять координаты наблюдаемых точек в трех плоскостях в производственных условиях с ошибкой порядка от 0,03 до 0,05 мм [69, 70, 93]. Треккер может выполнять слежение за объектом в режиме реального времени и тем самым позволяет контролировать геометрические параметры как неподвижных, так и движущихся объектов (отдельных узлов технологического оборудования).

### 1.3 Общая технологическая схема контроля кренов высотных сооружений

К высотному типу относят здания, сооружения и агрегаты с высоко расположенным центром тяжести.

Регулярный контроль значений кренов осуществляются для следующих типов высотных сооружений, перечисленных в [39]:

- многоэтажных бескаркасных зданий и сооружений с несущими стенами, возведенными из крупных панелей, крупных блоков или кирпичной кладки;
- рабочих зданий и силосных корпусов элеваторов;
- дымовых и вентиляционных труб промышленных предприятий;
- бетонных плотин, подпорных стенок и других жестких высотных сооружений;
- защитных оболочек реакторов АЭС;

- многоэтажных этажерок для установки технологического и энергетического оборудования;
- телебашен, вышек антенн, вышек радиорелейных линий и других антенных сооружений связи;
- промежуточных, анкерных, анкерно-угловых, концевых, специальных переходных опор ЛЭП;
- бурильных вышек для разведки и добычи нефти и газа;
- угольных башен коксохимических заводов;
- доменных печей;
- водонапорных башен и градирен;
- резервуаров жидкого топлива, силосов, сыпучих материалов и других высоких емкостных сооружений.

Геодезический контроль вертикальности оборудования промышленных предприятий осуществляется в процессе монтажа и ремонтных работ следующих типов оборудования:

- вертикальных гидравлических турбин;
- вертикальных насосов большой производительности;
- мощных вертикальных прессов; ректификационных колонн и др. [39].

Геодезический контроль за приращением значения крена (наклон продольной вертикальной или горизонтальной оси сооружения, вызванный эксплуатацией сооружений или влиянием внешней среды) также производится для жестких сооружений, у которых центр тяжести располагается на небольшой высоте или техническая задача которых – служить основанием для различного оборудования с крупными габаритами и продольной горизонтальной осью. К данному типу сооружений относятся следующие сооружения: фундаменты под турбоагрегаты электростанций, фундаменты под насосные машины больших мощностей, дробильные машины и другие технические объекты, для которых значение наклона должно обеспечиваться условиями работы размещаемого на них оборудования [21].

В современной нормативно технической документации отсутствует разграничение таких понятий, как крен и вертикальность. В сферах строительства, а также

в машиностроении на этапах монтажа различных конструкций или агрегатов применяется такой термин, как «вертикаль», на этапе эксплуатации объектов применяется термин «крен».

Существуют следующие различия терминов «крен» и «вертикальность». Термин «крен» обозначает поворот здания или сооружения относительно своей продольной оси, которая, в свою очередь, может обладать горизонтальным, вертикальным или наклонным положением, следовательно, понятие крена значительно шире понятия вертикальности. Для высотных зданий и сооружений, а также технического оборудования, продольная ось которых должна быть вертикальна, термины «крен» и «вертикальность» являются синонимами. Крен зданий и сооружения выражается в линейной, угловой и относительной мере.

Линейным значением абсолютного крена зданий и сооружений является [4] отрезок, расположенный между проекцией центра подошвы фундамента и проекцией центра верхнего сечения здания или сооружения на горизонтальную плоскость.

Абсолютным креном является острый угол между отвесной линией, проходящей через центр подошвы фундамента, и фактическим положением оси здания или сооружения. Значение абсолютного крена выражается в угловой мере.

Относительный крен – это отношение значения абсолютного крена к высоте здания или сооружения.

Как правило, для оборудования, обладающего вертикальной продольной осью, употребляется термин «вертикальность», данный геометрический параметр выражается в относительных величинах.

В нормативно технической документации, регламентирующей работы по определению кренов зданий и сооружений, встречаются следующие термины – «приращение крена» и «искривление оси объекта».

Термин «приращение крена» применяется в случае регулярного геодезического контроля за объектом, при котором необходимо регулярно определять текущее положение вертикальной оси объекта относительно отвесной линии и относи-

тельно ее положения в предыдущем цикле. Значение приращения крена выражается в таких же величинах, что и значение крена.

Искривление оси объекта характеризуется таким геометрическим параметром, как прогиб, который выражается в абсолютной или относительной мерах.

Крен является показателем общей деформации высотного здания или сооружения. Крен, как правило, возникает из-за процесса неравномерных осадок несущих конструкций, изменения гидрогеологического состояния несущих грунтов, влияния различных тектонических и техногенных процессов, возникновения искривления частей конструкции или тела всего здания или сооружения, а также целого ряда других внешних факторов. Стоит отметить, что значительное влияние на размер значения и направление крена оказывают ветровые нагрузки, а также одностороннее или неравномерное воздействие солнечных лучей, из-за чего верхняя часть сооружения начинает совершать амплитудно-частотные колебания.

Из-за возникновения подобных деформаций может произойти потеря устойчивости зданий или сооружений. Следовательно, в строительных проектах высотных объектов, как правило, предусматривается геодезический контроль данных деформаций как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации зданий и сооружений. На основании результатов геодезических измерений, в случае необходимости, принимаются решения о пригодности к эксплуатации здания или сооружения, а также разрабатываются и применяются меры для устранения активного приращения крена и сохранения работоспособности пригодности здания или сооружения для дальнейшей эксплуатации.

Технология геодезического контроля кренов зданий и сооружений согласно [39] включает в себя три основных процесса.

1 *Проектирование технологии геодезического контроля*, включающего в себя:

- выбор объектов, наблюдаемых геометрических параметров, а также разработка методов выполнения работ и назначение точности геодезических измерений;
- выбор оптимального и рационального метода геодезического контроля геометрических параметров, совместно с проектированием схемы размещения геодези-

ческого оборудования и контрольных точек, разработкой схемы измерений и пред-  
расчетом точности измерений, а также назначение метода и средств измерений;

– разработка методов камеральной обработки результатов полевых измерений,  
а также форм отчетной документации по контролю крена зданий и сооружений.

### *2 Выполнение геодезического контроля крена на объекте:*

– изготовление и установка в случае необходимости контрольных и опорных  
точек;

– подготовка рабочего персонала, используемого оборудования, а также необ-  
ходимых инструментов и приспособлений;

– донесение правил техники безопасности при проведении измерений до пер-  
сонала.

### *3 Камеральная обработка и анализ результатов измерений:*

– проверка и обработка первичных результатов;

– выполнение уравнивания результатов геодезических измерений;

– вычисление значений частных и полных кренов;

– построение графиков кренов;

– заполнение паспорта дымовой трубы или создание технического отчета.

Одним из большого перечня объектов, подлежащих регулярному геодезиче-  
скому контролю геометрических параметров, являются дымовые трубы. В боль-  
шинстве случаев, дымовые трубы возводятся из монолитного железобетона или  
кирпича. Из-за конструктивных решений и требований к эксплуатационным харак-  
теристикам дымовых труб им присваивается высокая категория ответственности.  
Фундаментом дымовых труб, как правило, является круглая бетонная плита с кон-  
солями и стаканом под ствол трубы, который обладает конической формой с по-  
стоянным или переменным уклоном образующей наружной поверхности от 1 %  
в верхней части до 10 % внизу, значение толщины стенок равно следующим значе-  
ниям: вверху 180–200 мм, внизу 750–1 000 мм.

В одноствольных дымовых трубах для целей защиты тела оболочки ствола от  
негативного температурного воздействия и вредных свойств дымовых газов внутри



трубы используется кирпичная футеровка. В настоящее время дымовые трубы конструируются с независимыми стволами, тем самым отводя газ от каждого котла. В большинстве случаев такие трубы обладают железобетонной несущей оболочкой совместно с металлическими стволами. Дымовые трубы также возводятся в виде металлической башни, с дальнейшим креплением металлических стволов.

Исходя из описанного практического опыта геодезических работ [21, 39, 40, 48, 64, 73] по геодезическому мониторингу объектов башенного типа, можно сделать вывод, что главными факторами, оказывающими значительное влияние на выбор методики и геодезических средств измерений, являются: конструктивные особенности зданий и сооружений башенного типа, требуемая точность геодезических измерений, частота геодезического контроля геометрических параметров, условия измерений, устанавливаемые ситуацией на промышленной площадке.

К конструктивным особенностям дымовых труб относятся форма, размер и материал конструкции, которые непосредственно оказывают влияние на выбор мест установки оборудования и необходимость закрепления контрольных точек, а также на выбор схемы и метода геодезического контроля геометрических параметров. Для геодезического контроля объектов, обладающих одинаковыми поперечными сечениями по длине всего тела сооружения, применяются простые схемы и методы геодезических измерений, в сравнении с объектами, обладающими сложной формой. Размер объекта, в частности, его высота, влияет на выбор геодезических средств измерений. В свою очередь, материал, из которого изготовлены конструкции, влияет на необходимость закрепления, тип и местоположение контрольных точек. Требуемая точность и частота геодезического контроля геометрических параметров в совокупности с размером тела объекта также служат главными факторами, определяющими методы и средств геодезических измерений. Условия промышленной площадки, при которых выполняются измерения, аналогично вышеперечисленному, оказывают значительное влияние на подбор методов и средств геодезических измерений.

Сроки проведения осмотров промышленных труб согласно [90] приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Сроки проведения осмотров промышленных труб

Вид наблюдений и осмотров	Периодичность и время проведения
Очередной наружный осмотр промышленных труб и газоходов, а также осмотр межтрубного пространства труб с внутренними газоотводящими стволами	Один раз в год весной
Очередной внутренний осмотр труб и газоходов	Через 5 лет после ввода в эксплуатацию и в дальнейшем по мере необходимости, но не реже одного раза в 10 лет, а при отводе высокоагрессивных влажных газов – не реже одного раза в 5 лет
Внеочередной наружный осмотр труб и газоходов, а также осмотр межтрубного пространства труб с внутренними газоотводящими стволами	После стихийных бедствий пожаров, ураганных ветров, больших ливней, колебаний поверхности земли после землетрясений и др.
Внеочередной наружный осмотр труб и газоходов, имеющих повреждения, указанные в п. 5.3 [26]	После ветров, скорости которых больше указанных в проекте
Внеочередной внутренний осмотр дымовой трубы и ее обследование в случае обвала или зависания участков футеровки площадью более 1 м <sup>2</sup> в пределах звена	Немедленно
Внеочередной внутренний осмотр дымовой трубы и газоходов при обнаружении местных, площадью до 1 м <sup>2</sup> обрушений футеровки, выпавших кирпичей, обнаруженных в зольнике или на бункерном перекрытии во время осмотра или очистки от золы	При первой возможности отключения всех подключенных к трубе теплоагрегатов
Специальные наблюдения за выявленными повреждениями в дымовой трубе и газоходах	Периодические измерения деформаций по устанавливаемым «маякам»
Ночной наружный осмотр металлических труб с целью обнаружения прогаров кожуха	Не реже одного раза в год впервые пять лет эксплуатации и не реже двух раз в год в последующие годы
Внутренний осмотр газоходов отдельных теплоагрегатов	При каждом отключении обслуживаемого теплоагрегата
Измерение с помощью щупов золовых отложений в газоходах:	
а) при малозольном топливе	Во время планового отключения теплоагрегатов одновременно, с проведением внутренних осмотров газоходов и дымовой трубы
б) при зольном топливе	Ежегодно в течение первых двух лет и далее, согласно решения комиссии
в) при невозможности отключения теплоагрегатов для осмотра золовых отложений в установленные сроки	Допускается временная эксплуатация при условии не превышения золовыми отложениями предельной толщины, указанной в проекте
Осмотр деталей и контактов молниезащиты трубы:	
а) очередной	Через 3–5 лет
б) внеочередной	При сопротивлении контура молниезащиты более 50 ом

## Окончание таблицы 1.10

Вид наблюдений и осмотров	Периодичность и время проведения
Инструментальная проверка сопротивления контура молниезащиты	Ежегодно, весной
Измерение температуры: а) газов в дымовой трубе без вентилируемой прослойки б) газов в дымовой трубе и воздуха в вентилируемой прослойке	Систематически через 1–2 мес. Ежегодно
Наблюдения за вертикальностью ствола и осадками фундаментов труб и газоходов геодезическими методами (кроме фундаментов, возведенных на скальных или крупнообломочных грунтах): а) первые два года после сдачи в эксплуатацию б) после двух лет стабилизации осадок фундаментов (1 мм в год и менее) в) после стабилизации осадок фундаментов г) для труб в районах вечной мерзлоты, на подрабатываемых территориях и на просадочных грунтах д) для труб в случае наклона оси ствола более допустимого е) для металлических труб без вантовых растяжек	Два раза в год Один раз в год Один раз в пять лет Не реже двух раз в год в зависимости от степени стабилизации осадок фундамента. По решению главного инженера предприятия, но не реже одного раза в шесть месяцев. Не реже одного раза в год
Наблюдение за исправностью осветительной арматуры трубы	Ежедневно при включении сигнальных огней

Большое значение при выполнении работ по определению кренов имеют выбор и закрепление опорных знаков и контрольных точек. Опорными знаками являются неподвижные знаки, заложенные на территории промышленной площадки или внутри цехового помещения, служащие для измерения значений кренов. Опорные знаки закладываются в случаях активного контроля значений кренов в течение значительного отрезка времени, как правило предусмотренного проектом или нормативной документацией [90]. В случаях пассивного геодезического контроля значений крена, применяемого на этапах монтажа или в случаях ремонта технологического оборудования или отдельных типов зданий и сооружений, создание постоянных опорных знаков не несет практической пользы.

Контрольными точками при измерении значения крена служат характерные точки объекта и специальные деформационные марки – стенные или плитные, мон-

тируемые на конструкциях зданий, сооружений, фундаментах технологического оборудования или на самом оборудовании и изменяющие свое местоположение вместе с телом объекта.

Характерные точки объекта используются при пассивном контроле геометрических параметров объекта и в случае наличия у тела объекта четких геометрических форм, что позволяет однозначно идентифицировать положение измеряемой контрольной точки с положением проверяемой оси объекта с допустимой точностью, то есть, значения ошибок не оказывают значительного влияния на результаты геодезических измерений. Примерами являются точки шейки вала гидроагрегата или насоса, точки на образующей дымовой трубы на одном поперечном сечении и т. п.

Специальные деформационные марки применяют в случае активного геодезического контроля параметров и в случаях отсутствия однозначного определения местоположения точки и оси наблюдаемого объекта. В данных случаях на несущих конструкциях объекта или его теле проводится закладка контрольных знаков или маркировка характерных элементов, по которым будут выполняться геодезические измерения. Например, закладка осадочных марок в цоколь дымовой трубы для контроля параметра «приращение крена» и т. п. Выбор места и способа закрепления опорных и контрольных точек происходит на этапе проектирования с учетом конструкции объекта, методом геодезического контроля, требуемой точности измерений и т. п. [39].

На этапе строительства, а также для обеспечения дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений башенного типа рекомендуется создавать геодезическое обоснование в радиальной системе координат, начало отсчета которой находится в центре ствола. Обоснование включает в себя пункты, которые закрепляются на местности опорными знаками, монтируемыми на осях симметрии здания или сооружения.

Осадочные марки следует устанавливать на фундаменте каждого пояса башни, на мачтовых опорах – на каждом анкерном фундаменте.

Опорный знак состоит из металлической трубы диаметром 150–200 мм, которая закладывается ниже глубины промерзания грунта на 0,5 м, но не меньше 1,5 м

от поверхности земли. Конструкция опорного знака подразумевает наличие якоря. Следовательно, основание трубы бетонируется, после чего на верх трубы наварируется металлическая пластина толщиной 5 мм с отверстием диаметром 16 мм, что соответствует диаметру станового винта геодезического оборудования. В результате на опорном знаке возможно выполнять принудительное центрирование, что обеспечивает однообразное положение геодезического оборудования.

Места установки опорных знаков и реперов необходимо выбирать, основываясь на принципе их сохранности в течение всего периода эксплуатации данного сооружения. Лучше всего использовать планы будущей застройки и реконструкции территорий, прилегающих к объекту геодезического мониторинга. Опорные знаки по возможности следует закреплять на расстояниях от 1,3 до 2,0 высот наблюдаемого объекта от него самого.

На данный момент разработан целый ряд способов геодезического контроля кренов зданий и сооружений башенного типа [13, 16, 18, 40, 64, 87, 89, 92, 121, 129, 130]:

- вертикального проектирования;
- измерения горизонтальных углов; горизонтальных и вертикальных углов, малых углов, направлений;
- координат;
- при помощи ГНСС-приемников;
- способ одного опорного пункта;
- различные способы использования приборов вертикального проектирования. Известны предложения по использованию наклономеров, микронивелиров, маятниковых кренометров, систем видеоизмерения, телевидения и многие другие.

Стоит отметить, что не все из них оптимальны и рационально подходят для выполнения геодезических работ по определению крена дымовых труб. Координатный и стереофотограмметрический способы зависят от точной и большой геодезической основы, из-за чего значительно возрастает время выполнения работ и размер сметы; в случае использования способа зенитных расстояний трудно идентифицировать контрольные точки, расположенные на сечениях наблюдаемого

объекта; метод вертикального проектирования зависит от геометрической формы сооружения, как правило, невозможно получить доступ внутрь трубы в процессе ее эксплуатации или больших температур внутри железобетонного ствола на многоствольных трубах [21].

В СНиП II-15–74 «Основания зданий и сооружений» для промышленных дымовых труб (п. 3.69) предельные относительные крены должны соответствовать следующим значениям:

$$i_{\text{пр}} = 0,005H \text{ при } H \leq 100 \text{ м,} \quad (1.3)$$

$$i_{\text{пр}} = \frac{1}{2H} \text{ при } H > 100 \text{ м.} \quad (1.4)$$

Как правило, допуски значений кренов других инженерных сооружений башенного типа с высотой более 100 м устанавливаются на основании расчетов параметров их фундаментов и оснований, в частности, по несущей способности и предельным деформациям. Как правило, они не ниже выше указанных допусков.

Расчет требуемой точности геодезических измерений производится, исходя из требуемой точности определения величины крена. За предельные (допустимые) погрешности геодезических измерений крена принимаются величины, не превышающие 0,2 строительных допусков, как этого требует п. 4.9 главы СНиП III-2–75, т. е.

$$\leq 0,03 \text{ м при } H \leq 100 \text{ м,} \quad (1.5)$$

$$\leq 0,04 \text{ м при } H > 100 \text{ м.} \quad (1.6)$$

При геодезическом мониторинге сооружений, обладающих заметными наклонами, вышеуказанные допуски для ошибок определения крена могут быть увеличены вдвое [89]:

$$\leq 0,06 \text{ м при } H \leq 100 \text{ м,} \quad (1.7)$$

$$\leq 0,08 \text{ м при } H > 100 \text{ м.} \quad (1.8)$$

Вышеуказанные допуски регламентируются устаревшей на данный момент документацией.

В актуальном документе [105, таблица 9.2] приводятся следующие значения, предельных деформаций оснований фундаментов высотных зданий и сооружений, а также погрешность их измерения, в том числе и для дымовых труб (таблица 1.11).

Таблица 1.11 – Предельные деформации и погрешности их измерений

Высота дымовой трубы, м	Величина крена Погрешности при измерениях
$H \leq 100$	$\frac{0,005}{0,001}$
$100 < H \leq 200$	$\frac{1/(2H)}{0,0002}$
$200 < H \leq 300$	$\frac{1/(2H)}{0,0006}$
$H > 300$	$\frac{1/(2H)}{0,0006}$

Но данные значения распространяются только на фундаменты и основания, предельное допустимое отклонение оси ствола промышленной трубы на уровне верхнего обреза указывается в [106] и приведено в таблице 1.12

Таблица 1.12 – Предельное допустимое отклонение оси ствола промышленной трубы

Значение крена, мм	Высота промышленной трубы, м
250	30
350	40
450	60
550	80
650	100
700	120–300

При этом погрешность измерений не должна превышать значений, рассчитываемых по формуле

$$m = \frac{Q_{\text{пр}}}{3 \cdot 2}, \quad (1.9)$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – предельное допустимое отклонение оси ствола промышленной трубы.

## 1.4 Анализ методик определения кренов сооружений башенного типа

### 1.4.1 Способ вертикального проецирования

Данный способ заключается в вертикальном проектировании наклонным визирным лучом тахеометра хорошо отличимой верхней точки наблюдаемого сооружения на горизонтально закрепленное внизу сооружения отсчетное оборудование, например, шашечную рейку [13, 87].

Измерение в каждом цикле выполняется тахеометром с двух опорных пунктов по двум перпендикулярным друг другу направлениям, при двух положениях вертикального круга тахеометра. После переноса точки вниз и отметки ее проекции на отсчетном устройстве определяется приращение крена.

Величина  $K$  полного крена вычисляется по формуле

$$K = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}, \quad (1.10)$$

где  $q_1$  и  $q_2$  – векторы крена, определенные соответственно с двух пунктов наблюдения.

Точность способа вертикального проецирования наклонным визирным лучом прямо пропорционально зависит от расстояния до трубы и точности взятия отсчетов по рейкам, на которую главное влияние оказывает отклонение основной оси тахеометра от вертикали.

Для устранения влияния данной погрешности необходимо выполнять следующие действия. Тахеометр приводят в рабочее положение по установочному круглому уровню. Затем зрительную трубу направляют параллельно двум подъемным винтам подставки и берут отсчет по вертикальному кругу.



Поворачивают трубу на  $180^\circ$  и вновь берут отсчет по вертикальному кругу. Если значения отсчетов не равны друг другу, то с помощью подъемных винтов устанавливается средний отсчет по вертикальному кругу, далее зрительная труба разворачивается на  $180^\circ$  и проверяется сохранность значения отсчета. В случае расхождения значений отсчета, действия повторяются до достижения равенства значений вертикального круга. После чего, повернув зрительную трубу на  $90^\circ$ , выполняются вышеописанные операции при помощи третьего подъемного винта. В результате при ориентировке зрительной трубы отсчет по вертикальному кругу не изменяется.

#### 1.4.2 Способ направлений (горизонтальных углов)

Исходя из значений точности геодезического контроля, размеров дымовых труб, внешних условий, оказывающих влияние на геодезический контроль, а также условий эксплуатации, наиболее рациональным способом измерения крена дымовых труб является способ измерения горизонтальных углов [13, 41, 87, 89].

Существует также способ измерения крена, включающий в себя возможность измерения кренов сечений трубы, а также исключающий недостатки других способов и методов геодезических измерений. Реализация данного способа возможна из-за конструктивных особенностей дымовых труб, а также условий их контроля на промышленной площадке. Такими особенностями являются:

- наличие светофорных площадок на стволе трубы, что позволяет однозначно выбрать сечения и контрольные точки;
- наличие геодезической документации в виде генпланов и исполнительных генпланов промышленных предприятий, что позволяет определять расстояния от точек съёмочного обоснования до объекта с графической точностью (порядка  $1 : 100 - 1 : 300$ ).

Вследствие этого отпадает необходимость закладки исходных и ориентирных знаков на территории промышленной площадки и контрольных марок, расположенных на стволе трубы, что способствует снижению времени полевого этапа кон-

троля крена дымовых труб и уменьшению сметы на выполнение геодезических работ. В случаях отсутствия данной документации выполняется закладка опорных и контрольных точек. В целях сокращения сроков и размера сметы геодезический контроль крена при помощи способа направлений следует сочетать со способом высокоточного нивелирования. В случае возникновения значительных значений приращений крена, выявленных нивелированием по осадочным маркам, выполняются контрольные измерения ствола трубы.

Для реализации данного способа измерения крена и изгибов ствола дымовой трубы выбирают на генплане, а затем на этапе рекогносцировки местности, два примерно перпендикулярных направления от центра дымовой трубы. На данных направлениях отмечаются места постановки тахеометра, расположенные на расстоянии 1,5–2,0 высоты трубы от ее центра.

Станции стоянки тахеометра можно располагать на крышах капитальных зданий и сооружений, что позволяет создать более благоприятные условия для выполнения измерений. Местоположение станций привязывается к постоянным объектам генплана или пунктам ПВО в случае отсутствия генплана. Далее выбираются ориентирные направления с каждой станции. В качестве ориентирных пунктов можно использовать любые однозначно определяемые и четко различимые удаленные объекты (антенны, углы здания, опоры ЛЭП и т. п.), они могут быть разными в каждом цикле измерений.

Далее производится разбивка дымовой трубы на ряд участков (ярусов). Границами участков служат контролируемые сечения дымовой трубы, в качестве которых лучше всего использовать металлические конструкции светофорных площадок, расположенных на стволе дымовой трубы, в случае их наличия. Число контрольных ярусов определяется на этапе проектирования контроля, как правило, число ярусов не превышает трех. На каждом сечении выбираются контрольные точки, принадлежащие образующей ствола дымовой трубы, которые являются пересечением образующей ствола трубы с проекцией видимых крайних укосин светофорной площадки или пересечением горизонтальной нити сетки нитей зритель-

ной трубы тахеометра, наведенной на верхнюю грань перил светофорной площадки, с образующими ствола дымовой трубы. В случае отсутствия светофорных площадок главным критерием выбора контрольной точки является значение высоты, которое должно быть одинаково для всех точек, принадлежащих одному сечению.

Для каждой дымовой трубы составляется схема измерений с указанием на ней станций установки тахеометра и их привязкой к существующим зданиям и сооружениям на территории промышленной площадки, а также ориентирных пунктов, контролируемых сечений и точек на стволе дымовой трубы.

При проектировании схемы геодезических измерений крена дымовой трубы на плане выбирают два примерно перпендикулярных к центру дымовой трубы направления. На этих направлениях располагаются станции стояния тахеометра, расположенные на расстоянии от центра, равном 1,3–1,8 высоты трубы, при этом необходимо обеспечить прямую видимость всей трубы с каждой станций стояния.

Сечения, как правило, определяются светофорными площадками. В качестве наблюдаемых точек выбираются пересечения образующей ствола трубы с проекцией крайней левой укосины или гранью перил светофорной площадки.

Измерения горизонтальных углов с точек установки тахеометра выполняются способом круговых приемов отдельно для каждого сечения. При наблюдениях на пунктах исходным направлением при измерении горизонтальных углов для всех сечений является одно и то же ориентирное направление.

По окончании измерений вычисляются частные крены и общий крен трубы.

#### 1.4.3 Способ малых углов

Основой данного способа является измерение на трех-четыре опорных пунктах малого горизонтального угла между направлениями на центр своего, для каждого пункта, самого низкого пояса и на центр верхнего пояса (рисунок 1.2), а также зенитных расстояний этих направлений [39, 87, 89].

Главным достоинством данного способа является возможность не связывания пунктов друг с другом. Но для определения горизонтальных расстояний до оси наблюдаемого сооружения методом прямой засечки необходимо обеспечить видимость между соседними пунктами. Главным отличием от вышеописанного способа направлений за начальное направление при способе малых углов выбирается направление на центр своего нижнего сечения, следовательно, закрепление ориентирных пунктов в данном случае не требуется.

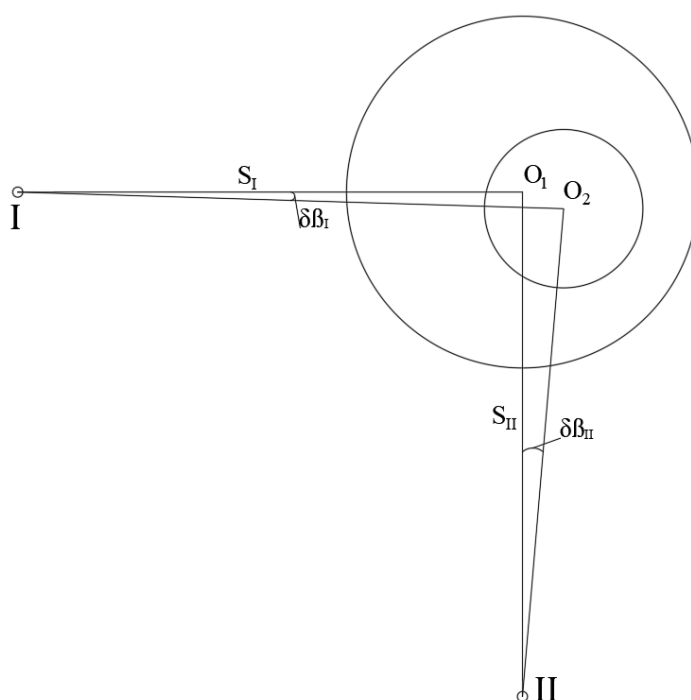


Рисунок 1.2 – Способ малых углов

На зданиях и сооружениях, обладающих квадратной или прямоугольной формой, для реализации данного способа устанавливаются визирные марки по одному из ребер. Сооружения, обладающие переменной некруглой формой, измерять способом малых углов неэффективно. Данный способ следует применять с целью определения разовых значений полных кренов, спустя год после ввода в эксплуатацию сооружения, имеющего заметный наклон.

Зная измеренные значения малого горизонтального угла между направлениями на центры верхнего и нижнего поясов, а также значения горизонтальных рас-

стояний этих направлений, вычисляются значения частных и полных поперечных кренов, двух комбинаций значений поперечных кренов первой и второй станции. Принято направление полного крена сооружения определять относительно магнитного азимута направлений, которые были измерены в процессе геодезических наблюдений или графическим способом на генеральном плане промышленной площадки

$$q_{I_1} = \frac{\delta\beta_I}{\rho} S_I, \quad q_{II_1} = \frac{\delta\beta_{II}}{\rho} S_{II}, \quad (1.11)$$

где  $\delta\beta_I, \delta\beta_{II}$  – горизонтальные углы между направлениями на центры верхнего и нижнего средних сечений в пунктах наблюдений;

$S_I, S_{II}$  – горизонтальные расстояния от пунктов наблюдения до центра нижнего пояса.

Значение и направление полного крена в способе малых углов определяются расчетно-графическим способом при наличии генерального плана промышленной площадки. На генеральный план наносятся опорные пункты, привязанные угловой или линейной засечкой к твердым объектам ситуации. От опорных пунктов проводятся направления на центр основания наблюдаемого сооружения, от этого центра перпендикулярно направлениям откладываются в масштабах 1 : 1 или 1 : 2 векторы поперечных кренов.

В случае если геодезические измерения происходили с трех-четырех опорных пунктов, величина и направление полного крена находятся аналогичным способом при помощи правила перпендикуляров к направлениям «пункт наблюдения – центр основания».

#### 1.4.4 Способ зенитных расстояний

При определении крена трубы на концах двух перпендикулярных друг другу диаметров нижнего цокольного сечения требуется смонтировать четыре кронштейна, предназначенных для принудительного центрирования геодезического

оборудования (опорные пункты), при этом оси вращения приборов, установленных на противоположных кронштейнах, должны находиться на одинаковом расстоянии от поверхности наблюдаемого сооружения, разница между расстояниями должна быть менее 5,0 мм. Аналогично на верхнем сечении монтируются визирные марки (контрольные пункты) на специальных кронштейнах.

При реализации данного способа [87, 89] для геодезического мониторинга сооружений с квадратной и прямоугольной формой установку опорных и контрольных пунктов следует выполнять по диагоналям и посередине сторон соответственно нижнего и верхнего сечения.

На каждом пункте измеряется малый вертикальный угол направления на соответствующую марку, расположенную на трубе. Для этого прибор оснащается специальной насадкой на объектив или окуляр.

Для упрощения вычисления значений крена данным способом необходимо при установке противоположных приборов обеспечить расхождение горизонтов не более 10 мм. В данном случае крен сооружения в угловой мере в створе противоположных станций определяется по формулам:

$$\vartheta_{1-2} = \frac{z_1 - z_2}{2}, \quad \vartheta_{3-4} = \frac{z_3 - z_4}{2}, \quad (1.12)$$

где  $\vartheta_{1-2}$  и  $\vartheta_{3-4}$  – составляющие наклона сооружения в створах станций;

$z_1, z_2, z_3, z_4$  – измеренные вертикальные углы направлений со станций наблюдений.

#### 1.4.5 Способ координат

Для определения крена сооружения в стесненных условиях необходимо определить координаты его центра в нижнем и верхнем сечениях с одного пункта. В статье [49] рассмотрены способы определения координат центра цилиндрического сооружения, в которых требуется измерять расстояние от инструмента до одной или трех точек на поверхности сооружения. Однако применяемые в то время

приборы (тахеометр и рулетка) не могли позволить измерение расстояний до точек в верхнем сечении, что стало возможным с появлением безотражательных тахеометров. Рассмотрим порядок работы на станции, когда для определения координат центра сечения требуется измерить одно расстояние до сооружения. Над точкой  $T$ , с которой наилучшим образом виден измеряемый объект, устанавливается тахеометр (рисунок 1.3).

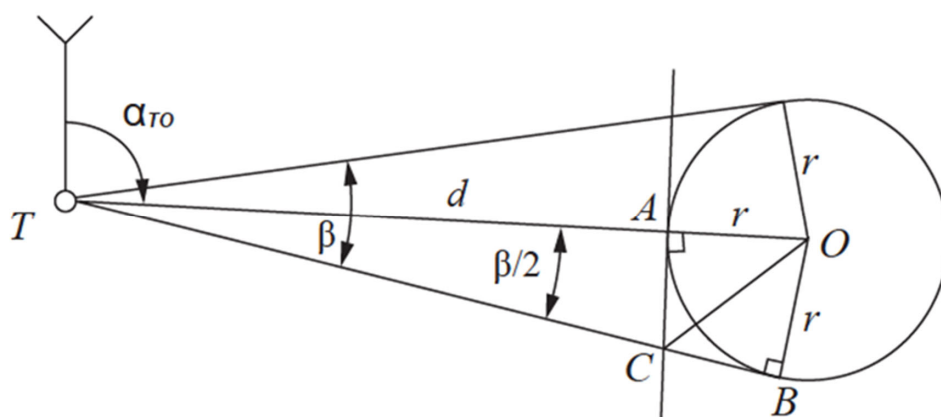


Рисунок 1.3 – Схема определения координат центра трубы с одного пункта

Координаты точки  $T$  задаются в условной системе таким образом, чтобы координаты всех точек наблюдаемого сооружения были положительными. Зрительная труба ориентируется в направлении на север (при наличии буссоли) либо по перпендикуляру к одной из стен главного корпуса, после чего по горизонтальному кругу задается равный нулю отсчет. Затем измеряется малый угол  $\beta$  между левой и правой образующими ствола дымовой трубы (в нижнем сечении) и вычисляется отсчет по горизонтальному кругу в направлении на центр  $O$ . Этот отсчет является дирекционным углом  $\alpha$  линии  $TO$  в принятой условной системе координат. После установки зрительной трубы в направлении  $TO$  измеряется расстояние до точки  $A$  на поверхности сооружения и находится горизонтальное проложение  $d$ . Из решения прямоугольного треугольника  $TAC$  получим по формуле

$$\begin{aligned} AC &= d \operatorname{tg}(\beta / 2); \\ TC &= d / \cos(\beta / 2). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Прямоугольные треугольники  $AOC$  и  $COB$  равны, как имеющие равные катеты  $OA = OB = r$  и общую сторону  $OC$ . Тогда  $TB = TC + CB = TC + AC$ .

Из решения треугольника  $TBO$  находим радиус дымовой трубы по формуле [103]

$$r = TB \operatorname{tg}(b / 2) = \frac{d \sin(b / 2)}{1 - \sin(b / 2)}. \quad (1.14)$$

Зная радиус трубы, найдем расстояние от точки установки тахеометра до центра  $O$  по формуле

$$TO = TA + AO = d + r. \quad (1.15)$$

Наконец, вычислим координаты  $O$  (центра сечения) из решения прямой геодезической задачи по формулам

$$X_0 = X_T + TO \cos \alpha_{TO}, \quad (1.16)$$

$$Y_0 = Y_T + TO \sin \alpha_{TO}. \quad (1.17)$$

Формулы (1.13)–(1.17) являются рабочими при вычислении координат центра. Аналогично находятся координаты центра дымовой трубы в верхнем сечении. По координатам центра нижнего и верхнего сечений вычисляются направление и величина крена из решения обратной геодезической задачи. Данная методика хорошо зарекомендовала себя при определении кренов сооружений, которые имеют в сечении форму правильной окружности – стоек каркаса и металлических дымовых труб небольшого диаметра ( $D < 2$  м).

Для сварных металлических труб и башенных сооружений большого диаметра ( $D > 2$  м) возможны отступления действительной формы поперечных сечений от проектной до нескольких сантиметров. В этом случае методики, основанные на измерении направлений касательных к поверхности сооружения, не позволяют обна-



ружить в определяемых величинах искажений, а оценка точности может носить формальный характер [65]. В связи с этим предлагается определять крены сооружений на основе дальномерных измерений, что дает возможность оценить величину отклонения формы сечения от окружности.

Для этого в районе наблюдаемого сооружения (рисунок 1.4) прокладывается тахеометрический ход (в условной системе координат), с пунктов которого ( $T_1, T_2, T_3$ ) определяют в безотражательном режиме пространственные координаты ( $X_i, Y_i, H_i$ ) нескольких точек на поверхности трубы 1, 2, 3, ...,  $n$  в нижнем и верхнем сечениях.

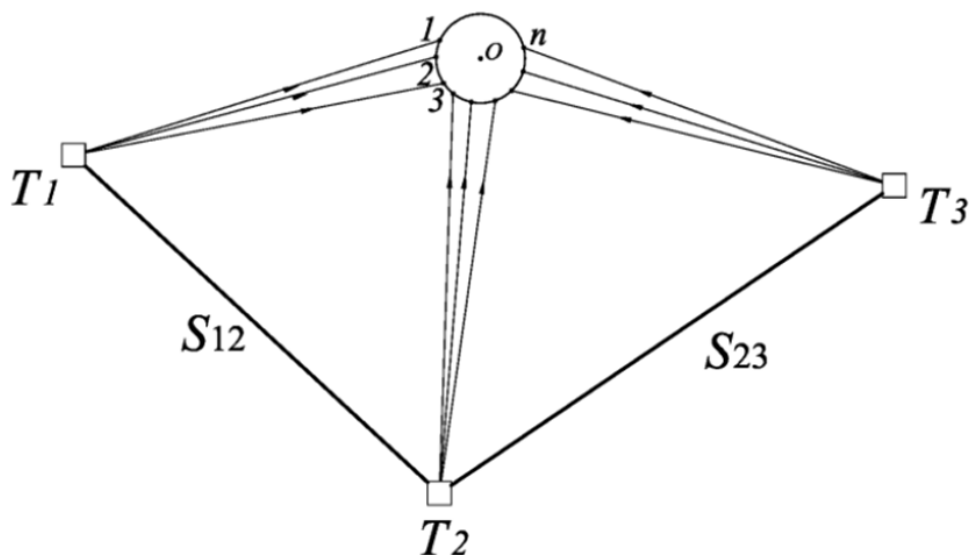


Рисунок 1.4 – Схема определения центра сооружения по измерениям расстояний

Отметки точек на поверхности трубы определяются с тем, чтобы наводить тахеометр строго на один и тот же пояс трубы с разных пунктов наблюдений. Точки на поверхности выбираются с таким расчетом, чтобы угол падения лазерного луча на отражающую поверхность не превышал  $40^\circ$  [21], избегая дальномерных измерений по касательной. Чтобы определить взаимное положение точек на поверхности трубы, измеренных с разных станций с ошибкой до 3–5 мм, необходимо прокладывать ход по трехштативной системе. Дальнейшая задача сводится к нахождению центра окружности, которая наилучшим образом аппроксимирует полученный

набор точек в каждом сечении. Для этого необходимо найти координаты центра окружности  $XO$ ,  $YO$  с радиусом  $r$ , при которых функция следующего вида принимает минимальное значение:

$$\sum_{i=1}^n (r - \sqrt{(X_O - X_i)^2 + (Y_O - X_i)^2}). \quad (1.18)$$

#### 1.4.6 Способ высокоточного нивелирования

Для осуществления данного способа в цоколе дымовой трубы устанавливается не менее четырех осадочных марок [13, 89]. После измерения величин осадок в цикле, на схеме расположения осадочных марок сооружения проводятся линии равных осадок и по максимальной разности осадок вычисляются значения приращения крена  $\Delta K$  по формуле

$$\Delta K = \frac{\Delta SH}{D}, \quad (1.19)$$

где  $\Delta S$  – максимальная разность осадок по диаметру сооружения,

$H$  – высота сооружения,  $D$  – диаметр сооружения.

Направление приращения крена расположено перпендикулярно линиям равных осадок фундамента. Путем векторного сложения вектора крена дымовой трубы до прироста с приращением крена  $\Delta K$  получается направление и величина крена дымовой трубы, между начальным и последним циклом наблюдений. Значение крена между начальным и последним циклом наблюдений также можно определить по линии равных осадок начального и последнего цикла [39].

При определении осадок с точностью 1,0 мм определение приращения крена дымовой трубы происходит с точностью 10–20 мм. Данный способ позволяет определять только приращение крена. Для нахождения его фактической величины необходимо обладать данными начального цикла наблюдений или использовать оптический способ определения крена дымовой трубы. Учитывая вышесказанное, данный способ является дополняющим основные способы определения кренов дымовых труб.

Данным способом также можно определить крен здания или сооружения по выбранному направлению в результате геодезических наблюдений за геометрическим положением осадочных марок, закрепленных на фундаменте.

#### 1.4.7 Определение крена спутниковыми технологиями

В работе [121] была предложена технологическая схема определения крена при возведении сооружений башенного типа. При возведении дымовых и вентиляционных труб с помощью подъемно переставной или скользящей опалубки отклонение ствола контролируется от вертикали  $OO_N$  (рисунок 1.5) помощью ГНСС-приёмников. Для этого, после возведения фундамента трубы, на исходном монтажном горизонте уточняется и закрепляется центр  $O$ . В случаях, когда этот центр невозможно использовать, закрепляется другая точка  $O'$  относительно которой будет производиться определение крена. Далее по направлению координатных осей  $x$  и  $y$  на расстоянии 800–1000 м в точках  $A$  и  $B$  устанавливаются стационарные геодезические знаки.

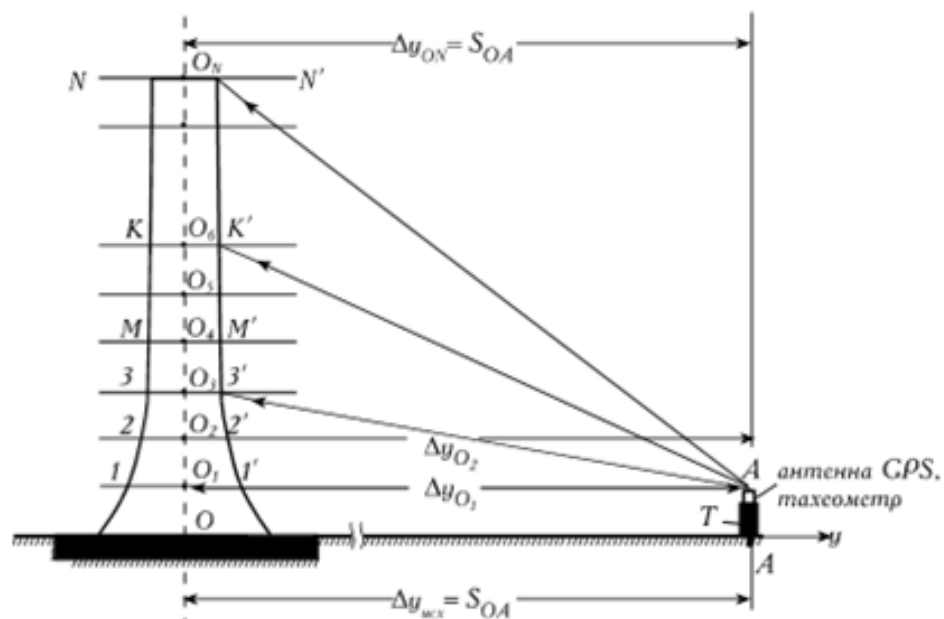


Рисунок 1.5 – Определение кренов сооружений башенного типа с помощью ГНСС-приемников

Перед возведением ствола трубы в точках  $O, A, B$  устанавливаются ГНСС-приемники и в режиме «статика» определяются координаты точки  $O$  и вычисляются величины  $\Delta x_{исх}$  и  $\Delta y_{исх}$ .

После закрепления опалубки первого яруса опалубки в ее центре устанавливается антенна приемника, определяются координаты точки  $O_1$  и вычисляются величины  $\Delta x_{O_1}$  и  $\Delta y_{O_1}$ . Далее вычисляются разности по формуле

$$\delta_x = \Delta x_{исх} - \Delta x_{O_1}, \quad \delta_y = \Delta y_{исх} - \Delta y_{O_1}. \quad (1.20)$$

Если их значения будут превышать допустимые величины, то производится рихтовка опалубки и снова определяются координаты точки  $O_1$ . Аналогичные измерения выполняются для последующих ярусов.

В процессе эксплуатации определение крена сооружений башенного типа при помощи ГНСС-приемника выполняется по следующей технологической схеме. На световых площадках на различных высотах, вплотную к телу трубы стационарно закрепляются гнезда по направлению осей  $x, y$  для установки ГНСС-приемников. При этом ГНСС-приемники устанавливаются в тумбах в точках  $A$  и  $B$ . В результате измерений будем иметь величины  $\Delta x$  и  $\Delta y$  для сечений (рисунок 1.6)

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= l_{x_1} + R_1, \quad \Delta y_1 = l_{y_1} + R_1, \\ \Delta x_M &= l_{x_M} + R_M, \quad \Delta y_M = l_{y_M} + R_M, \\ \Delta x_N &= l_{x_N} + R_N, \quad \Delta y_N = l_{y_N} + R_N. \end{aligned} \quad (1.21)$$

При строго вертикальном положении трубы значения будут принимать следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta x_{исх} &= \Delta x_1 = \Delta x_M = \Delta x_N, \\ \Delta y_{исх} &= \Delta y_1 = \Delta y_M = \Delta y_N. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Если труба имеет наклон, то эти величины будут отличаться:

$$\delta x_1 = \Delta x_{исх} - \Delta x_1, \quad \delta y_1 = \Delta y_{исх} - \Delta y_1. \quad (1.23)$$

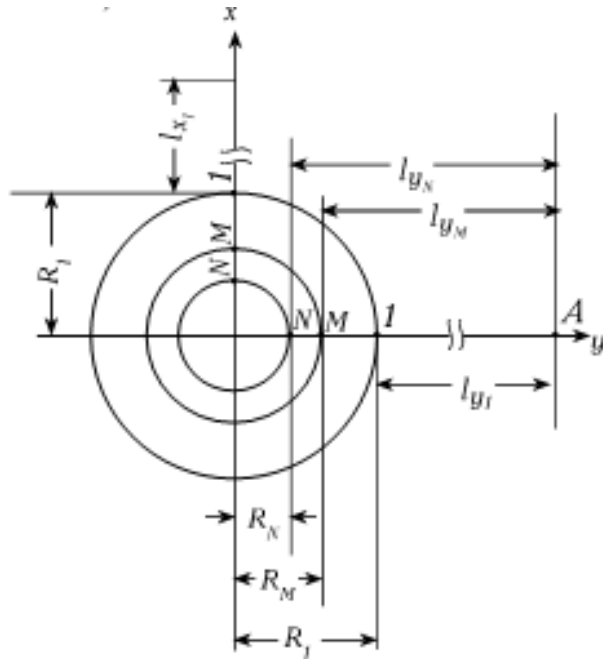


Рисунок 1.6 – Определение крена сооружения башенного типа при помощи ГНСС-технологий

Значения, вычисленные для самого верхнего сечения, дадут составляющие крена всей трубы.

С помощью ГНСС-технологий также возможно непрерывное слежение за значением крена башенных сооружений [121].

При выполнении рассмотренных выше инженерно-геодезических измерений применяются геодезические приборы, метрологические параметры которых должны соответствовать заявленным требованиям. К таким приборам относятся и тахеометры, которые, в нашем случае, применяются для создания планового обоснования, а также определения крена сооружений башенного типа. Согласно требованиям нормативных документов [19, 88, 110], они должны проходить периодическую поверку по определению точности измерения расстояний. Для этого указанным нормативным документом регламентируется методика выполнения поверки с применением эталонных базисов. Такая поверка в значительной степени затруднена и часто не может быть выполнена по следующим причинам:

- отсутствие эталонных линейных базисов;

– существующие эталонные базисы [46, 59, 113] по своим метрологическим характеристикам в основном не удовлетворяют требованиям поверочной схемы [88] с учетом точности современных тахеометров;

– расположение эталонных базисов требует переезда к ним с поверяемыми приборами на значительные расстояния (до 3–5 тысяч километров).

Указанные факты в значительной степени затрудняют подготовку к выполнению инженерно-геодезических работ на объекте, так как для участия в тендере на производство работ обязательным условием является наличие у организации поверенных геодезических приборов.

### 1.5 Постановка задач исследований

Исходя из рассмотренного выше анализа современного состояния вопроса выполнения инженерно-геодезических работ, выполняемых при эксплуатации тепловых электростанций, произведем постановку вопросов исследований с учетом современного уровня развития геодезического приборостроения, которые будут рассмотрены в данной работе.

*1 Разработать автоматизированный способ определения крена дымовых труб АЭС, ТЭС и других промышленных предприятий на основе применения беспилотных авиационных систем (БВС), позволяющий выполнять измерения крена в стесненных условиях.*

Необходимость в такой разработке обусловлена тем, что в стесненных условиях промплощадки часто бывает невозможным применение известных способов для определения крена труб. Одновременно с определением крена трубы можно будет выявить наличие и других деформаций, например трещин по всей ее поверхности, а также следить за их развитием.

*2 Усовершенствовать методику определения деформационного состояния системы ТФО в зависимости от режима работы турбоагрегата.*

Необходимость в ее совершенствовании обусловлена тем, что требуется определение причин изгиба линии роторов турбоагрегата в зависимости от деформации

составляющих системы ТФО (нижняя плита, колонны фундамента, верхняя плита и корпус турбоагрегата). Это позволит с большей достоверностью вносить изменения в заводской формуляр по центровке роторов турбоагрегата.

*3 Усовершенствовать методику метрологической поверки дальномерной части тахеометров.*

Необходимость в совершенствовании методики обусловлена тем, что в настоящее время, согласно требованиям нормативных документов, метрологическая поверка тахеометров и светодальномеров производится с применением стационарных эталонных базисов соответствующего разряда. Однако, в настоящее время эти базисы не отвечают метрологическим требованиям точности их линейных эталонных отрезков, так как поверяемый тахеометр или светодальномер по точности измерения расстояний превосходит эти линейные отрезки. Кроме того, число эталонных базисов значительно сократилось вследствие прекращения их метрологической аттестации соответствующими метрологическими службами.

Результаты выполненных исследований будут способствовать повышению точности и качества выполнения инженерно-геодезических работ.

## 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС

### 2.1 Общая характеристика промплощадки АЭС и ТЭС

Промплощадка атомных и тепловых электростанций представляет собой сложный и ответственный промышленный комплекс, в состав которого входят:

- здание реактора (для АЭС);
- здание главного корпуса, в котором располагаются турбоагрегаты и котельное оборудование (для ТЭС);
- турбоагрегаты, циркуляционные насосы, парогенераторы;
- дымовые (вентиляционные) трубы и градирни;
- трансформаторы, закрытые и открытые распределительные устройства;
- подземные, наземные и надземные коммуникации различного назначения, линии ЛЭП;
- вспомогательные сооружения и технологическое оборудование.

Здание реактора (реактора ВВЭР 1 000, 1 200) представляет собой отдельное инженерное сооружение из железобетона особой прочностью бочкообразной формы диаметром до 60 и высотой более 75 м. Здание главного корпуса, в котором размещаются турбоагрегаты, имеет длину до 450 м (в зависимости от числа, мощности и компоновки турбоагрегатов).

Применяемые турбоагрегаты имеют мощность от 100 до 1 000 МВт. Их конструктивные особенности (число цилиндров высокого, среднего и низкого давления) зависят от типа электростанции.

Дымовые (для ТЭС) и вентиляционные (для АЭС) трубы имеют высоту от 100 до 420 м (ЭкиБВСтузская ГРЭС-2).

Применяемые на АЭС и ТЭС градирни имеют различную конструкцию. В последние годы при строительстве АЭС применяются в основном параболические градирни высотой до 150 м (рисунок 2.1).



Вспомогательные инженерные сооружения и технологическое оборудование имеют различные размеры и компоновку на промплощадке.



Рисунок 2.1 – Параболическая градирня

Подземные, наземные и надземные коммуникации на промплощадке находятся в основном в районе расположения ответственных инженерных сооружений. Их количество и взаимное расположение является наиболее сложным в отношении их мониторинга технического состояния в процессе эксплуатации указанных объектов.

На всех стадиях функционирования АЭС и ТЭС (изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция) производятся инженерно-геодезические работы различного назначения, объема и точности. Одним из ответственных видов инженерно-геодезических работ, выполняемых на этапах строительства, эксплуатации и реконструкции, являются высокоточные инженерно-геодезические измерения, предназначенные для ведения деформационного мониторинга основных инженерных сооружений и применяемого технологического оборудования. Для решения данных задач разработаны методики выполнения инженерно-геодезических измерений с указанием применяемых приборов.

С началом появления и применения в различных отраслях промышленности БВС появилась возможность их использования для выполнения топографических съемок небольших по площади территорий, например, промплощадок и обследования состояния строительных конструкций инженерных сооружений. Для этого автором работы [82] с помощью БВС Геоскан 401 было выполнено обследование внешней поверхности дымовой трубы. Эти работы показали, что с помощью данной системы можно уверенно обнаруживать на поверхности трубы трещины, а также, путем использования дополнительного оборудования (тепловизора), фиксировать температурный режим на разных участках трубы.

Рассмотрим применительно к промплощадке использование БВС для решения следующих инженерно-геодезических задач:

- определение крена и искривления ствола дымовых и вентиляционных труб;
- создание вертикальных инженерных планов;
- производство исполнительной съемки при укладке подземных коммуникаций;
- визуализация этапов строительства инженерных сооружений;
- использование в качестве подвижной визирной цели при производстве инженерно-геодезических измерений.

При этом необходимо иметь в виду, что для использования БВС в целом ряде случаев необходимо иметь разрешение органов внутренних дел.

Применительно к строительству и эксплуатации инженерных сооружений АЭС ведомственным нормативным документом [112] п. 8.4 предписывается проводить деформационный мониторинг поверхностей инженерных сооружений путем определения изменения взаимного положения точек на этой поверхности. Для этого также приводятся рекомендации по методам выполнения соответствующих инженерно-геодезических измерений (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Основные методы определения изменения взаимного положения точек сложной поверхности

Ориентация поверхности	Контролируемые цели	Название применяемого метода	Ориентировочная характеристика точности измерений
вертикально	точки поверхности	отражательная и безотражательная роботизированная тахеометрия	от 1,0 мм + 1,5 ppm (с отражателем) от 2,0 мм + 1,5 ppm (без отражателя) в зависимости от расстояния до поверхности
вертикально	поверхность	наземное лазерное сканирование	от 2,0 мм + 10 ppm на расстоянии до 130 м до поверхности в соответствии с масштабом 1 : 200
вертикально	измерение поверхности	наземная интерферометрия	изменение 0,1 мм/цикл на 3D-поверхности лазерного сканирования
горизонтально	точки поверхности	спутниковое координирование	от 3,0 мм + 0,1 ppm в плане от 5,0 мм + 0,5 ppm по высоте в режиме «Статика»
горизонтально	поверхность	лидарные съемки	8–10 см в соответствии с масштабом 1 : 1000
горизонтально	изменение поверхности	спутниковая радиолокационная интерферометрия	5 мм/цикл на 3D поверхности спутникового лазерного сканирования

*Примечание.* Ориентировочная характеристика точности измерений принята по состоянию на январь 2020 г.

Для поверхностей, которые ориентированы вертикально, рекомендуются наземные средства измерений, а для горизонтальных – воздушные средства определения изменения взаимного положения точек этих поверхностей. Также после снятия опалубки производится проверка геометрических размеров конструктивных элементов трубы или градирни. Эта проверка производится на каждой секции ствола и каждом поясе оболочки трубы или градирни. При этом отклонения геометрических размеров конструктивных элементов возводимых труб и градирен не должны превышать значений, которые указаны в таблице 2.2.

Из таблицы 2.1 следует, что в ней отсутствуют рекомендации по применению БВС для определения деформационного состояния сооружений башенного типа в части наблюдений за их поверхностью. Поэтому наиболее целесообразным решением данной задачи является одновременное определение крена сооружения башенного типа и наблюдение за состоянием его поверхности, например, за развитием трещин, и эта задача может быть решена с применением БВС.

Таблица 2.2 – Отклонение геометрических параметров конструктивных элементов труб и градирен

Наименование отклонения	Величина допускаемого отклонения, мм
Радиусы стакана фундамента и секции ствола трубы (местные)	±50
Радиус кольцевого фундамента опорного кольца и пояса оболочки градирни (местные)	+50
Размер толщины стен стакана	+30
Фундамента и ствола трубы	-15
Размеры проемов бортов ствола трубы	+50
Размер толщины стен кольцевого фундамента опорного кольца и оболочки градирни	+20

## 2.2 Разработка технологической схемы определения деформаций инженерных сооружений башенного типа с помощью БВС

В 1.4 были рассмотрены существующие способы определения крена труб. Этот вид инженерно-геодезических измерений выполняется в основном тахеометрами (теодолитами). В дополнение к определению величины крена трубы, при необходимости, могут также определяться:

- прогиб вертикальной оси вследствие влияния солнечной радиации;
- прогиб вертикальной оси вследствие влияния давления ветра;
- прогиб вертикальной оси вследствие собственных колебаний трубы.

Совместное влияние указанных факторов проявляется при неудачном выборе времени выполнения измерений, например, в солнечную или ветреную погоду. Вместе с тем, для проектирующей организации при возведении сооружений башенного типа новой конструкции величина совместного влияния указанных факторов может быть необходима для уточнения конструкторских расчетов.

Одним из способов совместного определения деформационного состояния сооружений башенного типа является наземное лазерное сканирование. В последнее время для определения деформационного состояния инженерных сооружений, в частности и крена, разработаны методики с применением лазерного сканирования [42, 51, 54, 73]. Особенности наземного лазерного сканирования позволяют приме-

нять данный метод геодезической съемки для определения крена и деформаций вертикальных сооружений, в частности дымовых труб. Результатом геодезических измерений будет являться трехмерная цифровая модель (рисунок 2.2, *a*), состоящая из облака точек, принадлежащих внешней поверхности дымовой трубы. Данный способ обладает следующими преимуществами:

- в процессе полевого этапа работ лазерный сканер можно располагать вблизи снимаемого объекта, так как большинство современных лазерных сканеров могут выполнять панорамную съемку;

- высокая плотность облака точек цифровой модели наглядно отображает деформации любого участка наружной поверхности дымовой трубы, а также позволяет однозначно определять ее ось на любой отметке;

- временные затраты на полевой этап сопоставимы с затратами полевого этапа оптических наблюдений;

- расхождения значений крена полученных наземным лазерным сканированием и классическими способами, не превышают 50 мм;

- расширенные возможности анализа деформаций дымовых труб.

Недостатками данного метода является:

- наличие слепых зон;

- меньшая точность, чем у классических способов;

- высокая стоимость геодезического оборудования и программных продуктов для обработки данных наземного лазерного сканирования.

Учитывая специфику снимаемого объекта и ситуацию на промышленной площадке, наземному лазерному сканеру необходимо обеспечивать прямую видимость. Учитывая, что лазерные сканеры имеют различные значения углов поля зрения в вертикальной плоскости, необходимо применять специальные подставки, которые позволяют выполнять сканирование вертикально за счет наклона лазерного сканера, что в свою очередь, увеличивает количество станций, необходимое для геодезической съемки дымовой трубы. В случае применения дорогостоящего панорамного сканера, необходимость в подставке отпадает.

Ситуация на промышленной площадке зачастую не позволяет обеспечить прямую видимость при геодезической съемке дымовых труб, из-за чего необходимо производить лазерное сканирование с земли в очень стеснённом пространстве между снимаемым объектом и различными зданиями и сооружениями промышленного предприятия [42, 73].

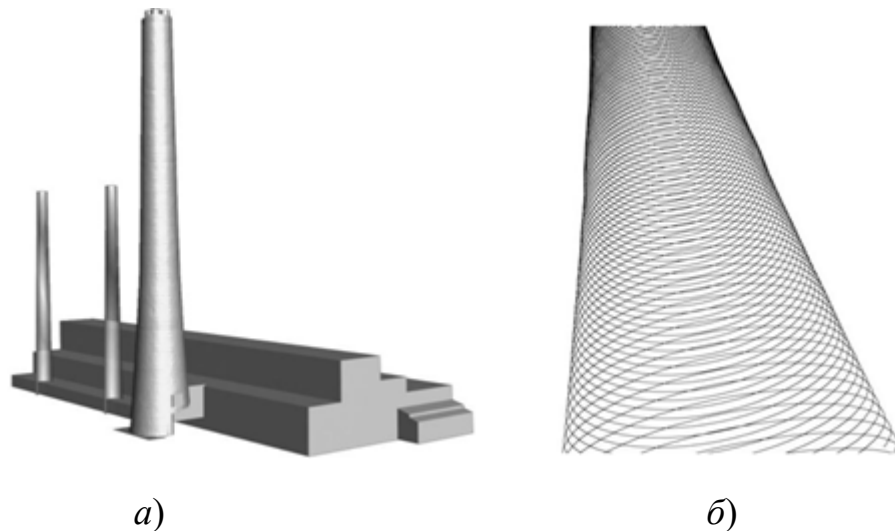


Рисунок 2.2 – Пример трехмерных цифровых моделей дымовых труб

Камеральная обработка данных наземного лазерного сканирования состоит из следующих этапов:

- создание точечной модели дымовой трубы;
- создание трехмерной цифровой модели дымовой трубы;
- построение сечений по модели дымовой трубы с определенным интервалом (рисунок 2.2, б);
- вычисление положения оси трубы на основании построенных сечений, а также значений кренов.

В работе [82] предложена методика высотного обследования дымовых труб с использованием БВС, включающая в себя следующие этапы:

- проектирование маршрута в специализированном программном обеспечении (ПО);
- выполнение полета в автоматическом режиме;

- построение цифровой модели трубы;
- построение разверток в видимом и инфракрасном диапазонах, а также карты деформаций наружных стенок.

Недостатками данной методики являются:

- малое количество определяемых геометрических параметров дымовых труб;
- недостаточная точность определения геометрических параметров;
- не указаны значения продольного и поперечного перекрытия снимков, при которых возможно достоверное определение геометрических параметров.

С учетом указанных недостатков нами разработана технологическая схема измерений, которая в дополнение к рассмотренной выше, позволяет дополнительно определить еще и крен трубы. Технологическая схема выполнения измерений с применением предложенной методики приведена на рисунке 2.3, которая состоит из полевых и камеральных этапов [4, 75].

*Полевой этап:*

- рекогносцировка и создание на промплощадке в районе расположения трубы (инженерного сооружения башенного типа) планово-высотного обоснования;
- координирование пунктов ПВО, а также опорных и контрольных марок на сооружении, в нашем случае на внешней стороне промышленной трубы;
- проектирование маршрута съемки и создание полетного задания с учетом расположения прилегающих инженерных сооружений, а также параметров дымовой трубы;
- импорт полетного задания в БВС;
- выполнение съемки согласно запроектированному маршруту.

*Камеральный этап:*

- экспорт полученных цифровых снимков в специализированное программное обеспечение;
- выполнение внутреннего и внешнего ориентирования;
- нанесение опорных и контрольных марок на полученные цифровые снимки;
- исключение ошибочных точек из разряженного облака точек;

- построение плотного облака точек;
- построение сечений с заданным шагом;
- вычисление значений геометрических параметров, в нашем случае величины (изменения) крена сооружения.
- построение графика крена трубы.

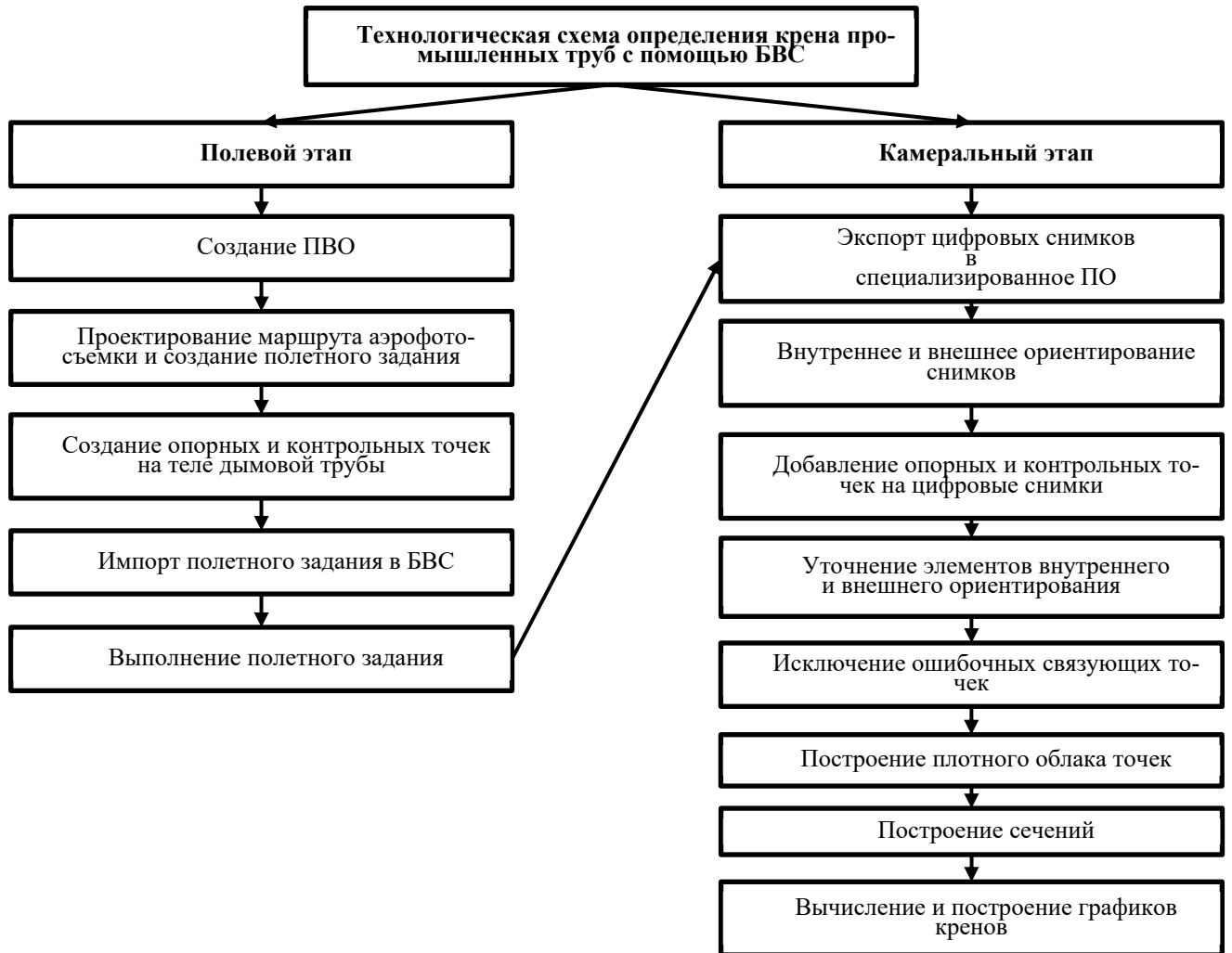


Рисунок 2.3 – Технологическая схема определения кренов дымовых труб с помощью беспилотного летательного аппарата

Если по окончании полевых и камеральных работ получились недопустимые расхождения из-за влияния внешних условий или недостаточного количества опорных и контрольных марок, а также их неудачного расположения, то полевой и камеральный этапы повторяются.



### 2.3 Схема создания планово-высотного обоснования и определение крена трубы

Начальным этапом выполнения полевых работ является рекогносцировка территории промплощадки и снимаемого объекта, а также оценка возможности выполнения съемки с помощью БВС. На данном этапе намечаются места закладки пунктов планово-высотного обоснования, пунктов сети сгущения (при необходимости), а также наличие опасных зон полета, при которых может произойти столкновение БВС с инженерными сооружениями, природными объектами, в основном, деревьями, или воздушными коммуникациями. Координаты опорных точек, необходимы для выполнения внутреннего и внешнего ориентирования снимков, а также координат марок на трубе.

Пункты обоснования (рисунок 2.4) должны располагаться таким образом, чтобы была возможность координирования опорных точек, а также марок, расположенных на промышленной трубе.

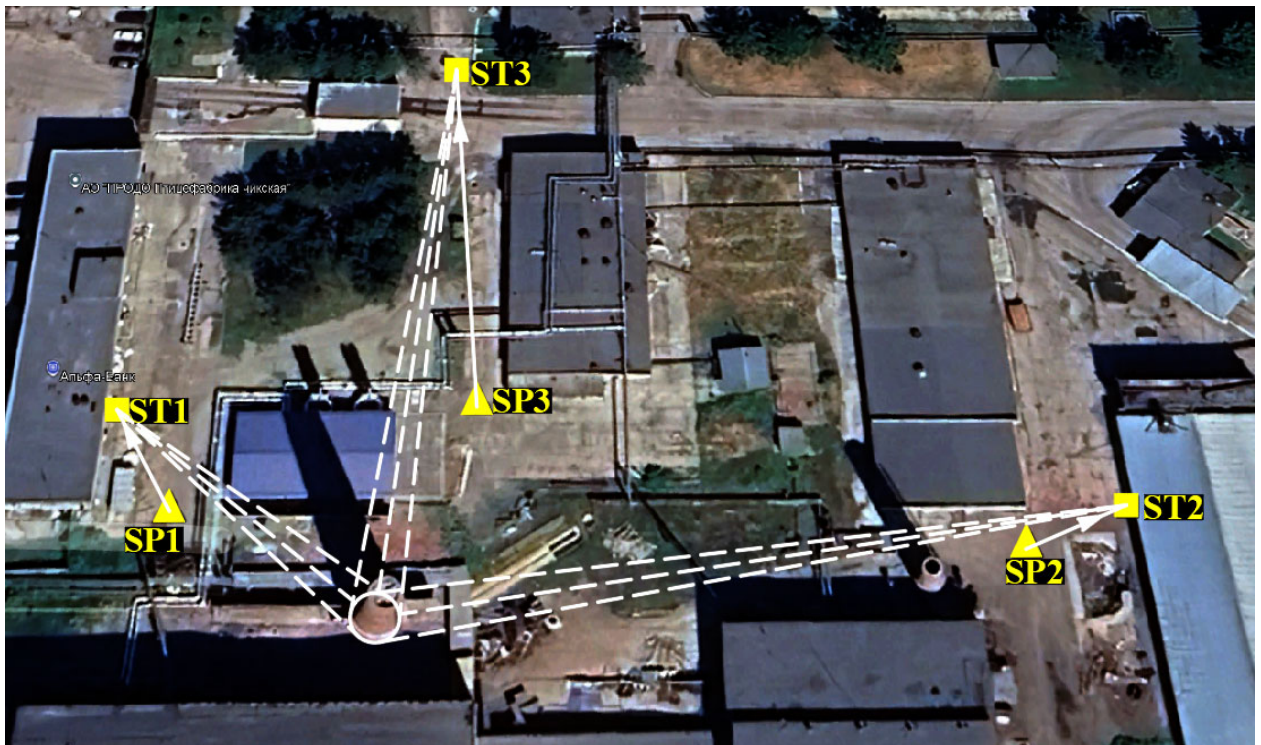


Рисунок 2.4 – Схема планово-высотного обоснования на территории промплощадки

Учитывая тот факт, что на промплощадке могут находиться и другие высотные сооружения, пункты обоснования необходимо размещать вне зоны влияния возможной многопутности сигнала [15].

В качестве пунктов ПВО были использованы отражающие пленки и дюбель-гвозди, закрепленные на асфальте.

Создание ПВО в районе расположения трубы может производиться способами, обеспечивающими величину СКО определения координат пунктов не хуже 5,0–7,0 мм. При этом также необходимо обеспечить переход созданного ПВО к системе координат WGS 84. Его создание может производиться:

- спутниковыми технологиями;
- наземными технологиями с применением высокоточных тахеометров;
- комбинированным способом с применением спутниковых и наземных технологий.

Реализация первой схемы создания обоснования может быть реализована при отсутствии факторов, влияющих на появление многопутности сигнала. В нашем случае планово-высотное обоснование было создано комбинированным способом с применением спутниковых и наземных технологий (способом полярной засечки и прокладыванием тахеометрического хода). Для этого обоснование сначала создавалось при помощи высокоточного тахеометра со станции SP1, SP2 и SP3 в условной системе координат, и оно состояло из 13 координатных марок (OP1 – OP13) и трех наземных пунктов в виде дюбель гвоздей, забитых в асфальт (ST1, ST2, ST3).

В случае применения высокоточных тахеометров величину СКО определения координат обоснования способом полярной засечки можно найти по формуле

$$m_p^2 = m_l^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 l^2 + m_{ц.р.}^2 + m_{и}^2 + m_{ф}^2, \quad (2.1)$$

где  $m_s$  – ошибка измерения расстояния;

$m_\beta$  – ошибка измерения угла (дирекционного угла);

$m_{ц.р.}$  – ошибка за влияние центрирования и редукции;

$m_{и}$  – ошибка исходных данных;

$m_{ф}$  – ошибка фиксации.

Тогда величину СКО определения координат  $x$  и  $y$  можно определить по формулам (без учета ошибок исходных данных):

$$m_{x_i} = \sqrt{m_s^2 \cos^2 \alpha + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} S_i \sin^2 \alpha}, \quad (2.2)$$

$$m_{y_i} = \sqrt{m_s^2 \sin^2 \alpha + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} S_i \cos^2 \alpha}. \quad (2.3)$$

В этом случае при  $S_i = 50 - 60,0$  м,  $m_{и} = 2,0$  мм,  $m_s = 2,0$  мм (при измерении расстояний в безотражательном режиме),  $m_{ф} = 1,0$  мм,  $m_{ц.р.} = 2,0$  мм,  $m_{\beta} = 2,0''$  получим  $m_x$  и  $m_y = 2,0 - 3,0$  мм.

Для обеспечения перевода пунктов ПВО в систему координат WGS 84 на пунктах SP1 и SP2 и SP3 были размещены ГНСС-приемники и выполнены измерения в режиме «Статика». После обработки спутниковых измерений в Trimble Business Center и преобразования пунктов в прямоугольную систему координат WGS 84/UTM zone 44 N был получен каталог координат исходных пунктов.

После этого с трех станций ST1, ST2 и ST3 тахеометром были выполнены измерения по определению крена дымовой трубы способом координат (см. рисунок 2.4).

Необходимо отметить, что из-за наличия на территории промплощадки инженерных сооружений дымовая труба была видна только из станции ST2. Из станции ST3 выполнить измерения верхних сечений трубы было невозможно, так как расстояние меньше высоты дымовой трубы. Из станции ST4, из-за наличия растительности, возможно наблюдать только верхнюю половину дымовой трубы.

В результате камеральной обработки были получены координаты центров сечений, на основании которых были вычислены крены и их составляющие (таблица 2.3) и построены графики кренов.

Таблица 2.3 – Вычисление крена и составляющих на основании сечений, полученных способом координат

$X$ (м)	$Y$ (м)	$H$ (м)	$R$ (м)	$dX$ (мм)	$dY$ (мм)	крен (мм)
6096 113,472	594 404,117	97,522	3,316	0	0	0
6096 113,462	594 404,110	115,906	2,802	-10	-7	12
6096 113,479	594 404,087	134,240	2,335	7	-30	31
6096 113,507	594 404,148	153,128	2,093	35	31	47

Полученные значения крена и составляющих в дальнейшем будут использоваться в качестве теоретических значений.

#### 2.4 Создание и координирование опорных и контрольных марок дымовой трубы

Для определения геометрии сооружения башенного типа (трубы) необходимо на их внешней поверхности заложить определенное количество марок. Марки подразделяются на два типа: опорные и контрольные. Опорные марки используются в процессе вычисления элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков, а также они являются основой на этапах построения цифровой модели. Контрольные марки используются для оценки ошибки полученной модели.

Расположение опорных и контрольных марок, а также их число обуславливается геометрией сооружения. Учитывая, что сечение дымовой трубы является окружностью, которую в свою очередь можно описать тремя точками, то в результате этого создается три колонны вертикально расположенных марок (рисунок 2.5). При этом марки не обязаны строго располагаться на одной высоте, и они могут выходить за пределы ряда, желательно не более 0,5 м. Расстояния между группами опорных марок должны составлять 10–20 % от высоты трубы, обеспечивая наличие на снимке минимум двух рядов опорных марок. Кроме того, для оценки точности построенной модели между группами точек следует располагать одну-две контрольные марки. Также, учитывая геометрическую форму снимаемого объекта, точки следует распределять равномерно на протяжении всего объекта [4, 82].

В качестве марок были выбраны края скоб металлических стяжек. После закладки марок производится определение их координат. Всего было закоординировано 18 опорных и 8 контрольных точек (рисунок 2.5, а, б). Координирование марок на внешней стороне трубы осуществляется способом полярных координат и тригонометрическим нивелированием.



а)

б)

Рисунок 2.5 – Расположение опорных и контрольных точек

Координирование марок на трубе рекомендуется выполнять в системе координат, в которой будут получены координаты центра фотографирования снимка

Используемая по умолчанию система координат WGS 84 является базовой для большинства программных продуктов, предназначенных для камеральной обработки цифровых снимков. В случае невозможности использования или перехода к единой системе координат, координирование марок можно выполнить в локальной системе координат, но при этом координаты центров фотографий будут исключены из процедуры внутреннего и внешнего ориентирования снимков.

В результате координирования были получены координаты пунктов в прямоугольной системе координат WGS 84/UTM zone 44 N (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Координаты опорных и контрольных точек

Имя	$X$ (м)	$Y$ (м)	$H$ (м)
ор 1	6096113.695	594407.480	97.703
ор 2	6096114.103	594407.096	107.230
ор 3	6096112.470	594406.723	117.731
ор 4	6096112.515	594406.468	126.777
ор 5	6096113.906	594406.303	137.037
ор 6	6096113.306	594406.189	142.567
ор 7	6096116.835	594403.862	96.922
ор 8	6096115.888	594402.377	108.695
ор 9	6096116.023	594403.081	117.770
ор 10	6096115.976	594404.956	126.821
ор 11	6096115.754	594403.721	137.063
ор 12	6096115.674	594404.344	142.594
ор 13	6096113.246	594400.766	97.659
ор 14	6096112.693	594401.177	108.684
ор 15	6096112.958	594401.332	117.797
ор 16	6096114.363	594401.755	126.858
ор 17	6096113.294	594401.823	137.065
ор 18	6096113.690	594401.994	142.673
кк 1	6096116.226	594405.677	102.682
кк 2	6096116.357	594404.566	113.265
кк 3	6096113.811	594406.650	125.270
кк 4	6096113.378	594406.425	134.090
кк 5	6096115.527	594401.843	105.708
кк 6	6096114.704	594401.509	113.207
кк 7	6096115.148	594402.071	120.764
кк 8	6096115.815	594403.476	131.326

## 2.5 Проектирование маршрута аэрофотосъёмки и создание полетного задания

Выполнение съемки может производиться в автоматическом или полуавтоматическом режимах, выбор режима зависит от ситуации на территории промплощадки.

Начальным этапом выполнения работ является рекогносцировка снимаемого объекта и проектирование маршрута съемки. На данном этапе необходимо оценить возможность автоматической съемки объекта, а также выявить опасные зоны полета, в которых может произойти столкновение БВС с объектами или воздушными коммуникациями. В случае наличия таких препятствий съемку придется выполнять в полуавтоматическом режиме, т. е. в опасных участках съемки необходимо управлять БВС в ручном режиме.

После этого, в специализированном ПО выполняется проектирование маршрута съемки, создание полетного задания. Учитывая геометрическую форму снимаемого объекта, траектория полетного задания будет выглядеть как набор окружностей, координаты центров которых одинаковы в плане и разные по высоте. Пример запроектированного полетного задания приведен на рисунке 2.6, а.

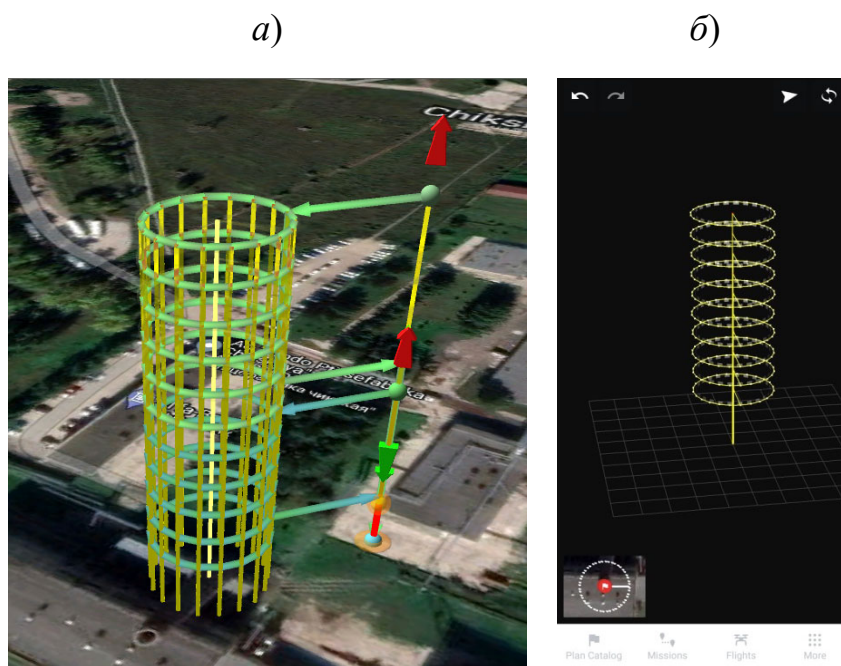


Рисунок 2.6 – Пример запроектированного полетного задания

Разность высот между окружностями напрямую зависит от поперечного перекрытия снимков. В свою очередь, интервал фотографирования и скорость полета БВС зависят от поперечного перекрытия снимков.

Для получения цифровой модели объекта съемка выполняется таким образом, чтобы при выполнении съемки минимальное продольное и поперечное перекрытие снимков составляло, соответственно, не менее:

- продольное – от 60 %;
- поперечное – от 40 %.

Для построения корректной и информативной модели дымовой трубы данные значения перекрытия недостаточны и их необходимо устанавливать равными не менее 80 %. Поэтому, исходя из данных значений перекрытия, рассчитывается:

- максимальная скорость полета БВС;
- минимальный интервал фотографирования;
- радиусы и высоты окружностей полета.

С применением современного ПО процесс проектирования маршрута полностью автоматизирован [8].

Уже на этапе проектирования можно оценить большое количество снимков, которое будет получено в процессе аэрофотосъемки.

В процессе проектирования полета необходимо учитывать время полета БВС, окончание заряда батареи в процессе выполнения съемки может привести к утрате БВС или прервать выполнение полетного задания, не завершив съемку окружности. Поэтому весь маршрут необходимо делить на участки, учитывая время полета БВС с одной батареи.

Качество результатов аэрофотосъемки и время выполнения полевого этапа съемки значительно зависят от погодных условий. Поэтому при проектировании маршрута съемки следует учитывать возможное влияние погодных факторов. Например, при сильном ветре возможно колебание БВС, а при отрицательной температуре быстрее садится батарейка. В случае использования стороннего ПО для проектирования полетного задания необходимо произвести его импорт в БВС. По-



сле импорта необходимо удостовериться, что все параметры корректны изначально запроектированным значениям.

Проектирование маршрута аэрофотосъемки с рассмотренными выше параметрами и требованиями было выполнено в специализированном ПО для смартфона Drone Harmony. В результате этого получился набор окружностей радиусом 10 м и шагом по высоте 5 м (рисунок 2.6, б).

## 2.6 Выполнение полетного задания

Перед началом выполнения полетного задания необходимо сделать предварительный осмотр БВС на предмет различных механических повреждений. Он выполняется в помещении перед выездом в поле. Также следует обязательно выполнить калибровку сенсоров и IMU (показатель комбинации акселерометра и гироскопа). При осмотре необходимо обратить внимание на наличие трещин, сколов и прочих дефектов на корпусе летательного аппарата. Лопасты винтов должны быть без повреждений и плотно фиксироваться на двигателе. Камера и ее подвес при включении квадрокоптера должны иметь плавный ход и после проверки подвижности должны установиться в центральное положение.

Калибровка сенсоров и IMU осуществляется в следующей последовательности.

- 1 Устанавливается последняя версия ПО для управления БВС.
- 2 Уровень заряда аккумулятора БВС должен быть выше 50 %.
- 3 Включение пульта управления и подключение к мобильному устройству.
- 4 Установка БВС на ровную поверхность со сложенными лучами.
- 5 Включение БВС.
- 6 Запуск ПО для управления БВС.
- 7 После активации и подключения БВС необходимо зайти в главное меню и активировать следующие вкладки: Настройки – Настройки полетного контроллера – Расширенные настройки – Сенсоры – «Калибровка IMU».
- 8 Далее необходимо установить БВС в положение, указанное на экране смартфона.

9 Калибровка IMU требует повернуть БВС пять раз в различные положения в строгой последовательности.

10 В процессе калибровки запрещается запускать моторы БВС.

11 Калибровка IMU будет неудачной, если БВС не установлен в положения, обозначенные в специализированном ПО смартфона.

12 После того как калибровка завершена, появится соответствующее сообщение об успешном выполнении.

БВС обязательно нуждается в калибровке компаса каждый раз при смене места проведения работ. Калибровка компаса позволяет сориентироваться по локальным линиям магнитного поля. Во время калибровки компаса акселерометр и компас дважды поворачиваются по двум разным осям, пример меню калибровки указан на рисунке 2.7. После выполнения этих процедур происходит коррекция по обеим осям. Эта процедура выполняется из стандартного приложения БВС в автоматическом режиме.

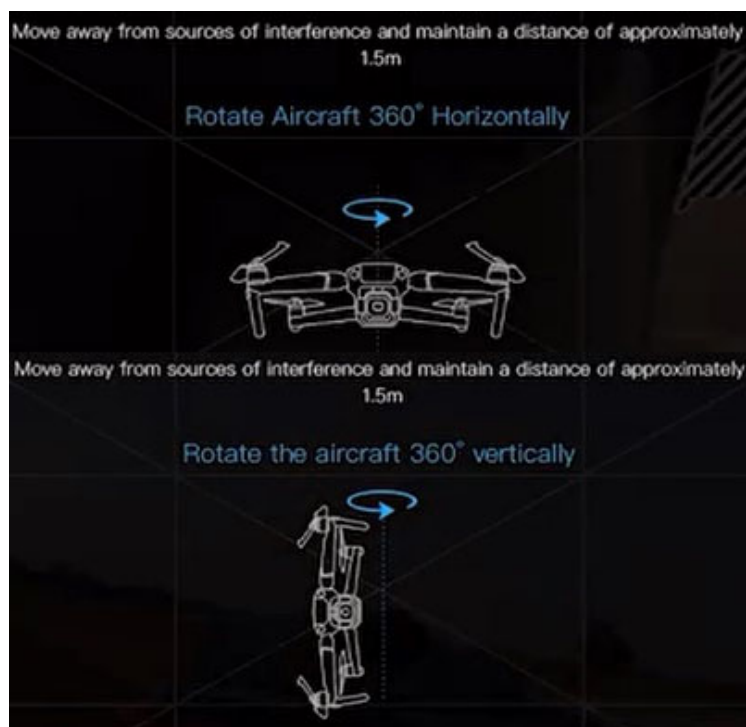


Рисунок 2.7 – Пример калибровки компаса

После завершения импортирования полетного задания в мобильное устройство и проведения подготовительных работ БВС приводится в рабочее состояние на точке взлета. Эта точка выбирается таким образом, чтобы в радиусе 10 м был открыт горизонт и отсутствовали объекты, излучающие электромагнитные волны (ЛЭП, антенные опоры и пр.).

После приведения БВС в рабочее состояние и его включения необходимо дать небольшое количество времени, как правило, не более 30–40 секунд, для приведения в рабочее состояние его подвижных устройств и электроники. После завершения предполетного тестирования в автопилот летательного аппарата передается маршрут полетного задания, после чего можно приступать к выполнению съемки.

Отдав соответствующую команду по средствам пользовательского интерфейса в специализированном ПО, БВС поднимается на проектную высоту и следует в первую точку маршрута, где необходимо выполнить остановку выполнения полетного задания (поставить на паузу) или задать временную остановку в процессе проектирования задания для настройки параметров камеры.

Цифровой снимок определяется следующими важнейшими характеристиками:

- ISO – светочувствительность матрицы, т. е. коэффициент усиления сенсора;
- выдержка – время, за которое сенсор улавливает свет. Регулируется механически или электронным образом;
- диафрагма – коэффициент открытости объектива во время съемки, регулируется диафрагмой;
- экспозиция – количество полученного света основным сенсором;

Для хорошего изображения с БВС, который находится в движении, при нормальном солнечном освещении, нужны следующие условия:

- отсутствие цифрового шума на фотографиях, который приводит к снижению точности конечных материалов;
- минимальный эффект глубины резкости, когда углы снимков смазываются, так как находятся дальше дистанции фокусировки;

– минимально возможный смаз снимка, обусловленный движением БВС по маршруту.

Оптимальный баланс между ISO, апертурой и затвором, т. е. цифровой снимок должен быть с умеренным и достаточным освещением.

Большинство типов полезной нагрузки на современных БВС поддерживает автоматический, полуавтоматический и ручной режим настройки камеры. Автоматический режим нами рассматриваться не будет так как его использование категорически не рекомендуется для выполнения аэрофотосъемочных работ, так как в процессе полета может происходить перефокусирование камеры, что не позволит получать цифровые модели с необходимой точностью. Поэтому будем применять полуавтоматический или ручной режимы настройки камеры. Для этого, находясь в начальной точке маршрута, на рабочей высоте и с опущенной на заданный угол камерой, выбирается один из полуавтоматических режимов или режим ручной настройки.

При настройке параметров фотокамеры необходимо установить оптимальный баланс между ISO, диафрагмой и выдержкой, т. е. цифровой снимок должен обладать умеренным и достаточным освещением, а именно быть немного затенённым. Для этого необходимо придерживаться следующих значений параметров фотокамеры, приведенных в таблице 2.5 [4, 91, 125].

Таблица 2.5 – Значения параметров фотокамеры

Параметр	Значение
Экспозицию	от -0,3 до 0,0
ISO	100 – 200 (солнечно – пасмурно)
Диафрагма (Appertura)	от F/2.8 до F/4.0
Выдержка (Shutter)	от 1/1600 до 1/640

После выбора полуавтоматического режима с приоритетом диафрагмы (А) и установки настроек в рекомендованные значения, фотокамера в процессе полета будет увеличивать или уменьшать выдержку, делая снимки с разным уровнем освещенности, но одинаковой экспозицией.

Присваивать параметру ISO значение 400 следует только в исключительных случаях, когда выполнить съемку возможно только единожды. Чем выше значение ISO, тем вероятнее появление шумов и снижение качества фотоматериала.

Аналогично настраивается режим приоритета затвора (S), в этом случае за экспонирование будет отвечать изменение диафрагмы, а значение затвора будет постоянным.

Если погода постоянная по освещению (например, равномерная облачность или ясно) и предстоит выполнить один-три вылета, удобно использовать ручной режим (M) настройки фотокамеры. В данном режиме три параметра ISO диафрагма и выдержка устанавливаются вручную.

Далее необходимо настроить фокусное расстояние, для этого нужно произвести остановку БВС в первой маршрутной точке, и установить метод фокусировки в значение AF (автоматическая фокусировка) и нажать на центр экрана. В этом случае камера будет отфокусирована на поверхность снимаемого объекта. После чего необходимо изменить значение метода фокусировки на MF (ручная фокусировка), появится шкала ручной регулировки фокуса, изменять значения которой не нужно. Значение фокусного расстояния будет постоянно для снимаемой окружности.

После возобновления полетного задания (снятия с паузы), или окончания времени остановки, БВС начнет аэрофотосъемку объекта.

Во время выполнения полетного задания необходимо контролировать уровень заряда аккумулятора, наклон камеры, сигнал связи, отклонение движения по маршруту, качество фотоматериала и прочие доступные в приложении данные о полете.

После завершения процесса аэросъемки летательный аппарат следует в точку посадки, указанную при составлении полетного задания. Указанная в приложении точка и точка фактического желаемого приземления могут быть удалены на расстояние до 10 м, и поэтому посадку необходимо корректировать вручную, при помощи пульта дистанционного управления.

В случае наличия участков, где невозможно выполнить аэрофотосъемку в автоматическом режиме, необходимо выполнять досъемку в ручном режиме. В этом

случае принцип настройки параметров фотокамеры сохраняется, а скорость полета БВС и интервал фотографирования должны быть минимальными. Во время полета БВС, во избежание столкновений с препятствием, следует визуальным образом следить за его положением. Также необходимо стараться, если это возможно, выдерживать одинаковое удаление от объекта.

В результате выполнения аэрофотосъемки трубы нами было получено 754 цифровых снимка и тем самым был завершен полевой этап работы. После этого приступают к камеральному этапу обработки результатов полевых измерений. Полученные фотоснимки экспортируются на ПК для дальнейшей камеральной обработки.

После совершения посадки выполняется визуальный осмотр корпуса и винтов БВС. Также по окончании полевых работ необходимо выполнить ряд профилактических мероприятий для поддержания оборудования в рабочем состоянии. Необходимо снова осмотреть летательный аппарат на наличие трещин и других механических повреждений, а также зарядить все аккумуляторы оборудования. Хранение аккумуляторов в разряженном состоянии сокращает их емкость, и они быстро выходят из строя.

Когда вся полевая информация скопирована на компьютер или другой носитель, необходимо очистить карты памяти и приготовить их к дальнейшему использованию. Линзу камеры (также необходимо) протереть специальной салфеткой или кисточкой, предназначенной для фотокамер.

После завершения всех профилактических процедур оборудование убирается в кейсы до следующего использования.

В результате выполнения вышеописанных процедур и аэрофотосъемки по проектированному в 2.5 маршруту было получено 754 цифровых снимка дымовой трубы.

## 2.7 Камеральная обработка материалов аэрофотосъемки

Камеральная обработка материалов аэрофотосъемки – процесс весьма сложный и ресурсоемкий, итогом которого является построение цифровой модели объекта. Решение этих задач осуществляется в специализированных программных комплексах, количество которых на сегодняшний день исчисляется не одним де-

сятком. Каждый производитель для своего программного продукта определяет системные требования рабочей станции.

Основные этапы обработки следующие:

- построение и уравнивание сети фототриангуляции с определением параметров ориентирования камер;
- построение плотного облака точек;
- построение цифровой модели объекта;
- построение разверстки наружной поверхности сооружения.

Обработка начинается с добавления материала (снимков) в рабочий проект.

Выбор снимков происходит через стандартное диалоговое окно операционной системы. Выбрав все необходимые для обработки снимки, они попадают область видимости программы. Как правило, установленной по умолчанию системой координат является система WGS84 [4, 58, 91, 125].

Далее будет рассмотрена обработка снимков, полученных с БВС.

На первом этапе происходит выравнивание снимков, в обработке участвуют только снимки, в результате получается разряженное облако точек (облако связующих точек). Затем в проект импортируются опорные точки, которые необходимо в ручном режиме расставить в фактическое местоположение на каждом снимке, данный процесс является самым трудоемким во всей камеральной обработке аэрофотосъемки. Далее помечаются опорные точки, что означает, что данные точки принимают участие в обработке снимков, если точка является контрольной, то она показывает точность построения модели. После этого происходит оптимизация камеры, и вычисляются уточнённые параметры внутреннего и внешнего ориентирования, после чего этап выравнивания снимков повторяется с уточнёнными параметрами камеры и включенными в обработку опорными точками. В результате получается разряженное облако связующих точек с максимальной точностью.

Далее из полученного разряженного облака необходимо исключить ошибочные точки, что позволяет улучшить итоговое качество плотного облака и цифровой модели сооружения.

На следующем этапе в автоматическом режиме происходит построение плотного облака точек. Данный этап не требует человеческого вмешательства в процессе выполнения построений, основная нагрузка ложится на ПК, на котором происходит обработка аэрофотосъемки. Качество плотного облака: среднее, высокое, очень высокое – следует устанавливать, исходя из параметров ПК. Если пытаться построить плотное облако высокого качества на ПК с низкими характеристиками, то обработка может затянуться на сутки или может быть не выполнена вовсе в связи с тем, что ресурса ПК не хватит для фотограмметрической обработки.

Далее плотное облако точек необходимо экспортировать в специальное ПО с целью вычисления крена дымовой трубы. На основании плотного облака точек строится текстурированная цифровая модель дымовой трубы, критерии настроек аналогичны плотному облаку точек. На основании текстурированной модели выполняется построение развертки наружной поверхности дымовой трубы, в результате чего получается план, отображающий все дефекты наружной поверхности.

Определение крена дымовых труб происходит следующим образом плотное облако точек импортируется в специализированное ПО, далее в автоматическом режиме происходит построение сечений дымовой трубы, представляющих из себя набор окружностей. Далее в автоматическом режиме происходит вычисление значений кренов по формуле

$$Q = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2}, \quad (2.4)$$

где  $X_i$  и  $Y_i$  – координаты сечения,  $X_0$  и  $Y_0$  – координаты сечения при основании.

На основании сечений дымовой трубы и значений кренов происходит создание паспорта дымовой трубы в автоматическом режиме.

Полученные в 2.6 цифровые снимки были импортированы для дальнейшей обработки в специализированное ПО Agisoft Metashape .

На первом этапе обработки происходит выравнивание цифровых снимков со следующими настройками, приведенными на рисунке 2.8.



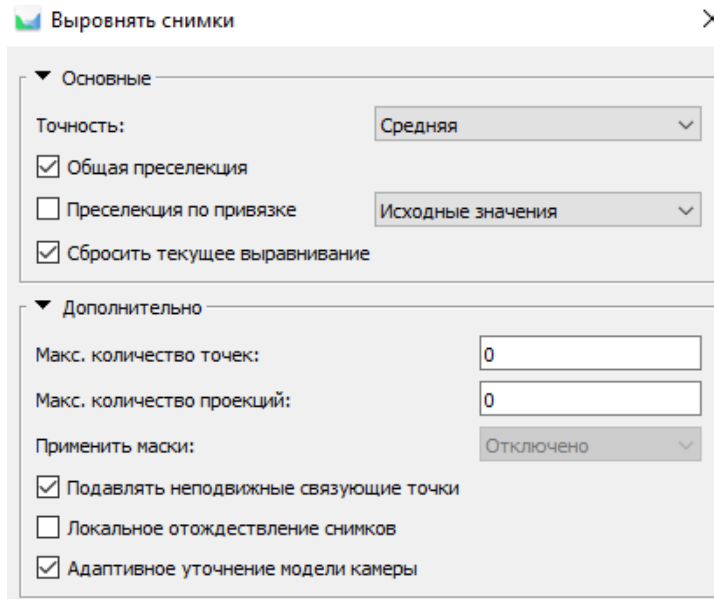


Рисунок 2.8 – Параметры выравнивания снимков

В результате получается разреженное облако точек. Далее необходимо импортировать каталог опорных и контрольных координат. После этого точки в ручном режиме расставляются в свое местоположение на всех снимках, на которые они попадают. Так как снимки и опорные точки находятся в единой системе координат, то точки автоматически будут расположены на снимках в предполагаемом месте, исполнителю необходимо лишь уточнить их точное местоположение. После того, как все точки расставлены, а опорные точки включены в обработку, происходит процедура оптимизации положения камер.

На данном этапе производится оценка точности полученных результатов. Ошибки положения опорных точек приведены в таблице 2.6. Ошибки положения контрольных точек приведены в таблице 2.7.

Исходя из значений ошибок опорных и контрольных точек, а также из значения ошибок измерений, указанных в таблице 1.11 для трубы длиной 60 м, равной 60 мм, можно сделать вывод, что итоговая цифровая модель будет пригодна для определения значения крена. Если же брать для расчета допустимой погрешности значения, приведенные в таблице 1.12, то по формуле (1.9) будет получено значение 75 мм, что также означает, что итоговая цифровая модель будет пригодна для определения крена.

Таблица 2.6 – Ошибки положения опорных точек

№ точки	Ошибка $X$ (мм)	Ошибка $Y$ (мм)	Ошибка $H$ (мм)	Ошибка (мм)
op1	4	-5	-28	29
op2	-2	1	-32	32
op3	4	-1	-42	42
op4	-1	-12	-37	39
op5	6	-5	34	35
op6	-1	11	-31	33
op7	6	5	-34	35
op8	4	-7	-39	40
op9	7	-12	-36	39
op10	-3	11	42	44
op11	5	-10	-41	43
op12	3	-5	26	27
op13	2	-11	34	36
op14	-5	8	30	32
op15	-1	8	-44	44
op16	-5	-3	-32	33
op17	4	10	-27	29
op18	0	5	-37	37
Итого	3	7	35	36

Таблица 2.7 – Ошибки положения контрольных точек

№ точки	Ошибка $X$ (мм)	Ошибка $Y$ (мм)	Ошибка $H$ (мм)	Ошибка (мм)
kk1	-7	5	53	53
kk2	-11	-12	-46	49
kk3	-6	-1	-30	30
kk4	-8	-14	-47	50
kk5	10	-13	-38	42
kk6	-11	7	-34	36
kk7	8	10	40	42
kk8	6	4	49	50
Итого	8	8	42	44

Далее из полученного разряженного облака связующих точек необходимо исключить ошибочные точки по двум критериям: точность определения положения

со значениями коэффициента 15–25 и ошибка репроецирования со значениями коэффициента 0,15–0,20. В результате будет получено разреженное облако связующих точек высокого качества (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Разреженное облако точек

Следующим этапом камеральных работ является построение плотного облака точек. Для оптимизации процесса создания плотного облака точек необходимо указать рабочую область – проект, что позволит исключить ненужные объекты, тем самым увеличив скорость выполнения процесса и уменьшив размер итогового файла. Результат построения плотного облака приведен на рисунке 2.10.

На следующем этапе происходит построение цифровой модели и ее текстуры (рисунок 2.11). На основании текстурированной модели в режиме реального времени можно производить дальнейшую оценку состояния внешней стенки дымовой трубы. Данная модель может быть импортирована в большинство современных программных комплексов, используемых на геодезическом производстве, что позволяет улучшить скорость работы над проектом сооружения различными структурными подразделениями, а также видеть в режиме онлайн все операции, производимые над цифро-

вой моделью, при этом значительно повышается наглядность и эффективность восприятия объекта различным неспециализированными кадрами предприятия.



Рисунок 2.10 – Плотное облако точек дымовой трубы



Рисунок 2.11 – Текстурированная модель дымовой трубы

Программа Agisoft Metashape обладает возможностью интегрирования пользовательских модулей, написанных на языке Python. Для вычисления параметров сечений нами был разработан специальный модуль «Модуль вычисления сечений». Данная программа позволяет на основании плотного облака точек построить набор сечений через заданный по высоте интервал. Принцип работы данного модуля описывается следующей схемой (рисунок 2.12). В результате работы модуля получается txt файл с параметрами сечений (рисунок 2.13).

Далее на основании полученных данных нами были построены сечения (рисунок 2.14), а также вычислены крены и их составляющие. Результаты приведены в таблице 2.8.

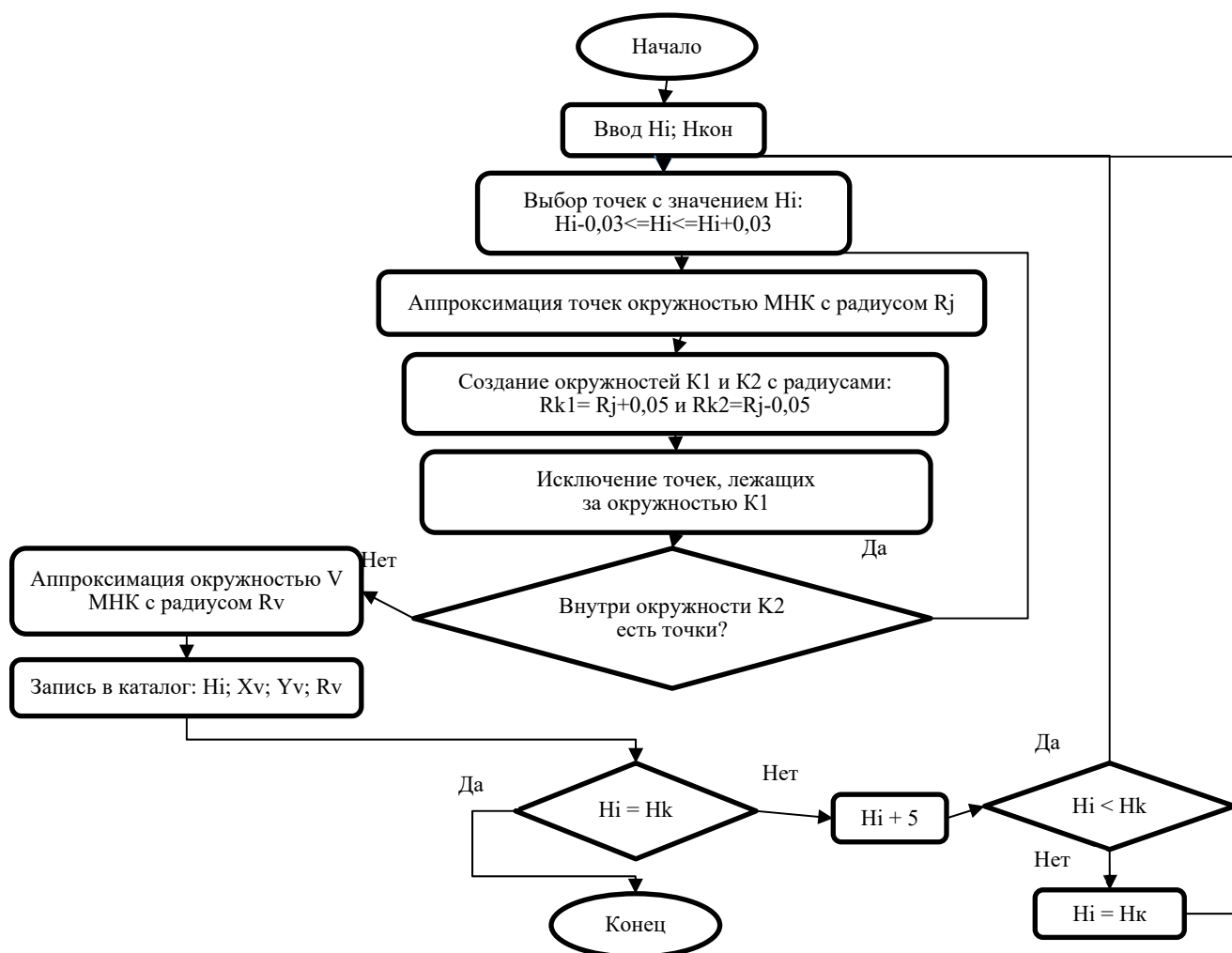


Рисунок 2.12 – «Модуль вычисления сечений»

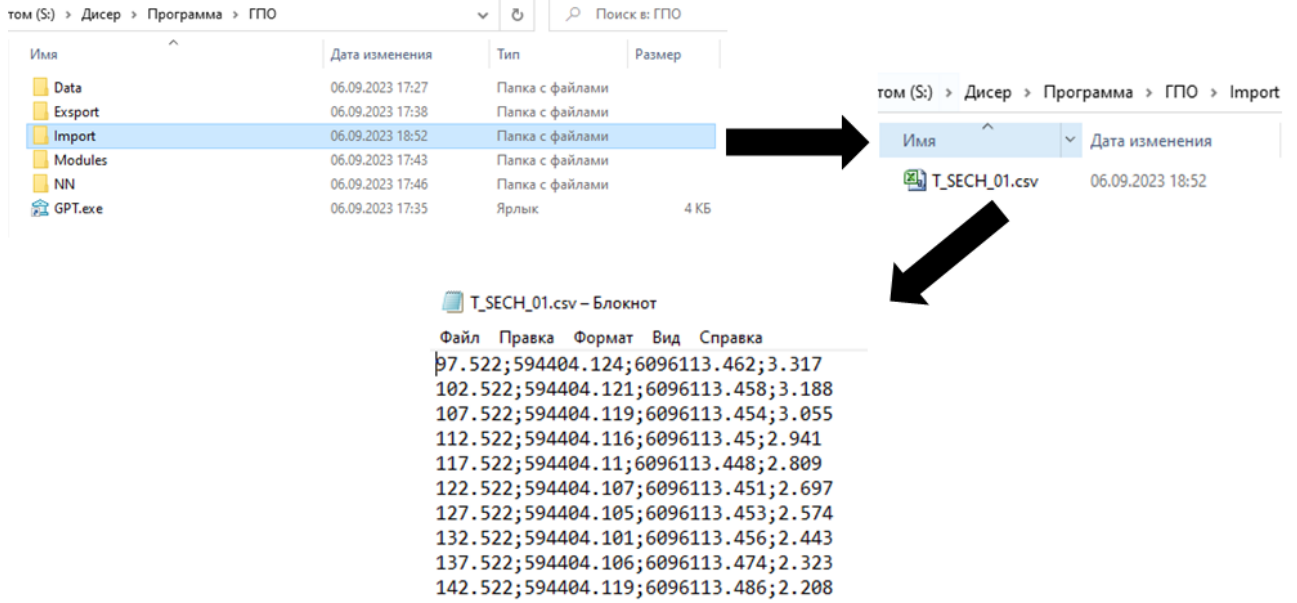


Рисунок 2.13 – Результат работы «Модуля вычисления сечений»

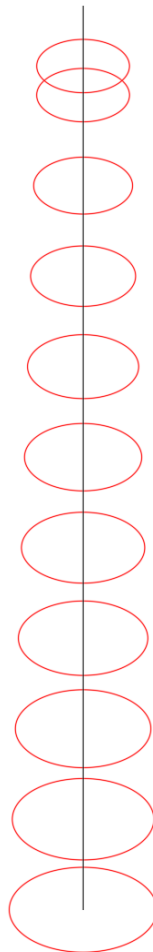


Рисунок 2.14 – Сечения дымовой трубы, построенные по результату работы «Модуля вычисления сечений»

Таблица 2.8 – Значения кренов дымовой трубы

$X$ (м)	$Y$ (м)	$H$ (м)	$R$ (м)	$dX$ (мм)	$dY$ (мм)	крен (мм)
6 096 113,462	594 404,124	97,522	3,317	0	0	0
6 096 113,446	594 404,113	115,906	2,814	-16	-11	19
6 096 113,459	594 404,098	134,240	2,329	-3	-26	26
6 096 113,502	594 404,128	153,128	2,082	39	4	40

## 2.8. Оценка эффективности предложенной методики определения геометрических параметров вертикальных сооружений

За эталонный способ определения крена дымовой трубы принимается координатный способ при помощи тахеометра. Полученные значения кренов различными способами сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 – Значения кренов дымовых труб, полученных различными способами

$H$ (м)	Крен (координатный способ)			Крен (способ БВС)		
	$dX$ (мм)	$dY$ (мм)	крен (мм)	$dX$ (мм)	$dY$ (мм)	крен (мм)
97,522	0	0	0	0	0	0
115,906	-12	1	12	-16	-11	19
134,240	2	3	4	-3	-26	26
153,128	16	-17	23	39	4	40

Исходя из данных, представленных в таблице 2.9, значения кренов отличаются в пределах 22,0 мм, а также, исходя из данных таблицы 2.10, центры сечений, полученные различными способами, отличаются в пределах 28–31 мм, а радиусы – в пределах 8–11 мм.

Таблица 2.10 – Разность плановых координат и радиусов сечений дымовой трубы, полученных способом координат и способом БВС

$H$ (м)	$dX$ (мм)	$dY$ (мм)	$dR$ (мм)	$d_{\text{план}}$ (мм)
97,522	10	-8	-1	12
115,906	13	5	-11	14
134,240	15	22	6	26
153,128	-14	-28	11	31

Необходимо отметить, что при выполнении работ тахеометром, из-за неблагоприятных условий наблюдений и ограниченного количества мест установки прибора, на станции было выполнено множество ошибочных измерений.

Основным преимуществом использования БВС является автоматизация полевого этапа работ. Однако во время выполнения работ необходимо следить за положением БВС, так как возможны его отклонения от маршрута или непредвиденное внешнее воздействие (порывы ветра, птицы и т. д.). Несмотря на большее количество времени, необходимое для проведения камерального этапа способа с применением БВС, по сравнению с координатным способом, главным достоинством данного способа является почти полная автоматизация камерального этапа. Современное ПО позволяет выполнять построение облаков точек и цифровых моделей в полностью автоматическом режиме, на основании этого возможно оценить состояние внешней поверхности дымовой трубы. При обработке результатов тахеометрической съемки все операции осуществляются специалистом. При обработке способом с применением БВС самым трудоемким этапом является расставление опорных и контрольных точек на цифровых снимках, дальнейшая обработка может быть задана в виде алгоритма с указанием необходимых параметров, построение облаков точек и цифровых моделей выполнится автоматически.

## 2.9 Совершенствование методики создания вертикальных планов

Кроме наблюдений за пространственным положением технологического оборудования линейных и площадных сооружений или территорий [12, 63], производится монтаж технологического и вспомогательного оборудования, которое устанавливается вертикально. К такому оборудованию относятся паропроводы, например, на ТЭС и ГРЭС, которые располагаются внутри главного корпуса или на его внешней стороне стен. При их установке необходимо производить исполнительную съемку. Также исполнительная съемка производится при возможной последующей реконструкции как горизонтально, так и вертикально по отношению к уста-



навливаемому оборудованию для целей проектирования их расположения с учетом другого оборудования.

В настоящее время отображение фактического положения такого оборудования в схематической форме производится только на стадии его монтажа. Такие подходы к геодезическому сопровождению не удовлетворяют в достаточной мере всем необходимым эксплуатационным требованиям. В этой связи при решении задач монтажа вертикально устанавливаемого оборудования и его последующей возможной реконструкции предлагается использовать новый вид инженерно-геодезической документации – вертикальные инженерно-топографические планы. Вертикальные инженерно-топографические планы для проектирования и строительства линейных сооружений в горной местности предлагал автор работы [126]. Такие планы отображали, например, положение крутых склонов или обрывов, т. е. включали в себя и плановое их положение (отображение горизонталями).

Применительно к инженерным сооружениям вертикально устанавливаемое оборудование необходимо отображать во взаимосвязи с другим оборудованием с получением (составлением) комбинированного плана, включающего в себя геодезическую и строительную (монтажную) составляющие. Данный вид составной геодезической документации может быть применен и для создания вертикальных инженерно-топографических планов с целью проектирования, строительства и реконструкции технологического оборудования на промышленной площадке.

В качестве вертикального инженерно-топографического плана нами предлагается использовать ортофотопланы, а также цифровые модели и преобразованные стандартные топографические планы.

Рассмотрим применение вертикальных планов применительно к монтажу вертикально устанавливаемого технологического оборудования.

Для апробации данного решения нами квадрокоптером была выполнена фасадная съемка здания гражданского назначения. Всего было получено 85 снимков (один из снимков приведен на рисунке 2.15).



Рисунок 2.15 – Снимок фасада с квадрокоптера

Для создания контрольных и опорных точек спутниковым методом было создано планово-высотное обоснование (были определены координаты двух точек в системе координат WGS 84/UTM zone 44 N) статическим методом с длительностью сеанса 50 минут. После этого с этих точек тахеометром TS02 на фасаде здания были определены 11 опорных и 10 контрольных точек [3].

Обработка полученных результатов осуществлялась в программе Agisoft Metashape. В результате были получены текстурированная модель (рисунок 2.16) и ортофотоплан [3].

В виде вертикального плана нами предлагается использовать ортофотоплан без создания новых условных координат, т. е. в системе координат наблюдаемого объекта. Для этого в Agisoft Metashape при построении ортофотоплана можно указать плоскость координат, заданную тремя точками, относительно которой он и будет построен. В нашем случае ортофотоплан (рисунок 2.17) был построен относительно следующих контрольных и опорных точек: ОК1, ОК3, ОК6.

Расположение опорных и контрольных точек приведено на рисунке 2.18.



Рисунок 2.16 – Текстурированная модель здания



Рисунок 2.17 – Вертикальный план в виде ортофотоплана



Рисунок 2.18 – Расположение опорных и контрольных точек

Ошибки положения опорных и контрольных точек приведены в таблице.

Таблица 2.11 – Ошибки положения опорных и контрольных точек

Опорные точки				
№ точки	Ошибка $X$ (м)	Ошибка $Y$ (м)	Ошибка $H$ (м)	Ошибка (м)
Point 1	-0.017	-0.045	0.005	0.049
Point 3	0.011	0.022	-0.001	0.024
Point 5	0.008	0.017	-0.005	0.019
Point 7	0.002	0.020	0.003	0.020
Point 9	-0.006	-0.002	-0.001	0.007
Point 11	-0.004	0.000	-0.003	0.005
Point 13	0.012	0.005	-0.012	0.018
Point 15	-0.001	0.004	0.001	0.004
Point 17	-0.003	-0.003	0.005	0.007
Point 19	-0.001	-0.001	-0.001	0.002
Point 21	-0.001	-0.016	0.008	0.018
Итого	0.008	0.018	0.005	0.020
Контрольные точки				
№ точки	Ошибка $X$ (м)	Ошибка $Y$ (м)	Ошибка $H$ (м)	Ошибка (м)
Point 2	0.013	0.027	-0.003	0.030
Point 4	0.011	0.016	-0.006	0.021
Point 6	0.002	0.027	-0.007	0.028
Point 8	-0.004	0.007	-0.004	0.009
Point 10	-0.004	-0.007	-0.004	0.009
Point 12	-0.008	0.012	0.000	0.014
Point 14	-0.005	-0.001	0.002	0.005
Point 16	-0.005	-0.007	0.009	0.013
Point 18	0.000	-0.011	0.001	0.011
Point 20	0.005	-0.002	0.011	0.012
Итого	0.007	0.015	0.006	0.017

Исходя из данных, приведенных на рисунке 2.19, можно сделать вывод, что полученные цифровая модель и ортофотоплан соответствуют точности масштаба 1 : 200.

В процессе выполнения исследований было обнаружено, что фотограмметрическим методом возможно создавать также вертикальные инженерно-топографические планы коммуникаций (рисунок 2.19). По снимкам можно оценивать состояние труб, а по цифровой модели – решать задачи проектирования и реконструкции [3, 123].

Полученные материалы можно использовать в качестве вертикальных инженерно-топографических планов масштаба 1 : 200. Для вертикальных планов предлагается создавать линейный объект с присвоенной к нему гиперссылкой, по кото-

рой можно открывать соответствующий ортофотоплан или цифровую текстурированную модель [3, 123].

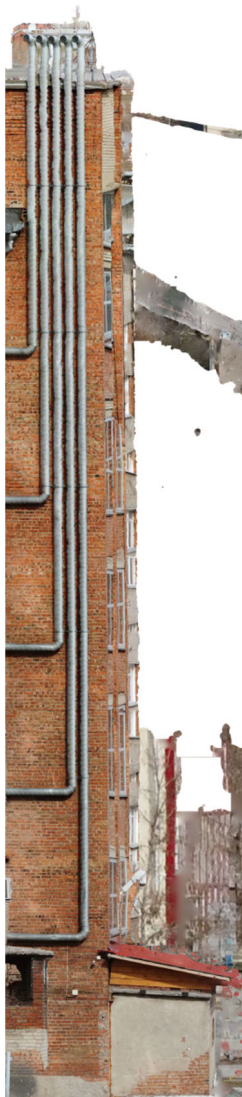


Рисунок 2.19 – Вентиляционные трубы на фасаде зданий

## 2.10 Применение БВС в качестве подвижной вехи

В настоящее время происходит активное внедрение современных технологий и методик в традиционные методы производства геодезических измерений. Основная цель их внедрения – сокращение временных затрат и повышение качества работ. С каждым годом применение беспилотных авиационных систем для решения

геодезических задач приобретает большую популярность за счет простоты и доступности технологии. Методика фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки, полученных с использованием БВС, позволяет решать проблему своевременного создания и обновления картографической основы, построения цифровых моделей местности и объектов, а также других задач, в которых возможно использовать фотограмметрический способ. Нами предлагается использовать БВС для решения инженерных задач на промышленной площадке в качестве подвижной вехи.

На производственных площадках геодезисту часто приходится сталкиваться с ситуациями, когда невозможным является его доступ в определенную область или место выполнения работ по следующим причинам: отсутствует допуск по требованиям техники безопасности, наличие опасной внешней среды и другие негативные условия, из-за которых невозможно выполнить измерения.

Сотрудники организации, выделяемые в помощь геодезической бригаде для обеспечения доступа в сложные места, не обладают нужной квалификацией. В результате этого возникают ошибки, вызываемые человеческим фактором, из-за чего значительно ухудшается качество выполненных работ или же возникает брак в полученных результатах геодезических измерений. Как правило, источник ошибок заключается в неправильной постановке вехи с отражателем.

Беспилотные летательные аппараты активно интегрируются в различные виды деятельности, и геодезия не стала исключением. БВС можно не только использовать для получения ортофотопланов и цифровых моделей, но и применять для решения инженерно-геодезических задач, например, в качестве подвижной вехи. Данный способ позволяет выполнить измерения в недоступных геодезисту местах. С целью изучения возможности применения подвижной вехи, а также получаемой точности результатов геодезических измерений, нами были выполнены исследования. Суть исследований заключалась в определении точности посадки подвижной вехи (рисунок 2.20) над точкой с известной координатой [79].



Рисунок 2.20 – Квадрокоптер с наклеенной на корпус отражающей пленкой

При выполнении измерений тахеометром предварительно координируется центр посадочной мишени, а затем посадка квадрокоптера осуществляется при помощи камеры квадрокоптера (рисунок 2.21). После этого тахеометром выполняются измерения на отражающую марку.

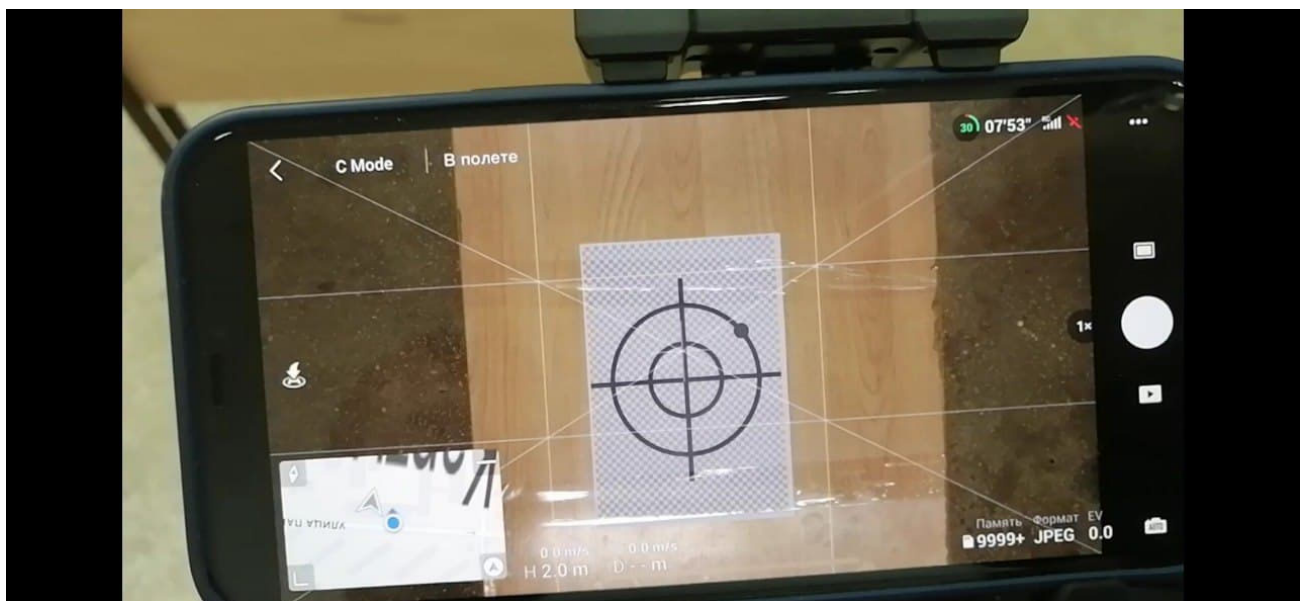


Рисунок 2.21 – Вид с камеры при посадке квадрокоптера

В ходе проведения исследований было выполнено два цикла измерений. Первый цикл выполнялся в лабораторных условиях квадрокоптером DJI Mavic Mini 2. Полученные результаты измерений приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Результаты лабораторных измерений

Исходная	$X$ , м	$Y$ , м	$H$ , м	$\Delta X$ , мм	$\Delta Y$ , мм	$\Delta H$ , мм
	101,797	187,698	110,730			
1	101,823	187,738	110,729	-26	-40	1
2	101,773	187,725	110,730	24	-27	0
3	101,808	187,716	110,730	-11	-18	0
4	101,823	187,771	110,730	-26	-73	0
5	101,815	187,690	110,729	-18	8	1
6	101,751	187,766	110,730	46	-68	0
7	101,745	187,768	110,731	52	-70	-1
8	101,754	187,671	110,730	43	27	0
9	101,800	187,705	110,729	-3	-7	1
10	101,835	187,720	110,729	-38	-22	1
11	101,853	187,777	110,730	-56	-79	0
12	101,763	187,716	110,729	34	-18	1
13	101,833	187,777	110,730	-36	-79	0
14	101,870	187,774	110,730	-73	-76	0
15	101,742	187,756	110,730	55	-58	0
16	101,822	187,691	110,729	-25	7	1
17	101,815	187,662	110,729	-18	36	1
18	101,812	187,697	110,730	-15	1	0
19	101,802	187,799	110,731	-5	-101	-1
20	101,814	187,764	110,730	-17	-66	0
21	101,867	187,709	110,729	-70	-11	1
22	101,830	187,750	110,729	-33	-52	1
23	101,799	187,634	110,728	-2	64	2
24	101,843	187,671	110,729	-46	27	1
25	101,820	187,714	110,729	-23	-16	1
26	101,748	187,708	110,730	49	-10	0
27	101,776	187,695	110,729	21	3	1
28	101,769	187,694	110,730	28	4	0

Средняя квадратическая ошибка определения координат, вычисленная по формуле Гаусса, составила:

– по оси  $X = 38,0$  мм;



– по оси  $Y = 45,0$  мм;

– по оси  $H = 1,0$  мм.

Измерение № 19 было исключено из обработки как ошибочное, так как посадка была осуществлена вне допустимого радиуса.

После этого исследования были выполнены в полевых условиях с применением квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro. При выполнении исследования был слабый ветер. Полученные результаты приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Результаты полевых измерений

Исходная	$X$ , м	$Y$ , м	$H$ , м	$\Delta X$ , мм	$\Delta Y$ , мм	$\Delta H$ , мм
	1032,060	1994,814	298,081			
1	1032,018	1994,830	298,078	42	-16	3
2	1032,036	1994,769	298,077	24	45	4
3	1032,054	1994,800	298,079	6	14	2
4	1032,081	1994,847	298,078	-21	-33	3
5	1032,051	1994,831	298,079	9	-17	2
6	1031,988	1994,882	298,082	72	-68	-1
7	1031,981	1994,817	298,081	79	-3	0
8	1032,032	1994,812	298,077	28	2	4
9	1032,081	1994,823	298,079	-21	-9	2
10	1032,055	1994,869	298,079	5	-55	2
11	1032,009	1994,836	298,079	51	-22	2
12	1032,004	1994,808	298,077	56	6	4
13	1032,026	1994,834	298,078	34	-20	3
14	1032,090	1994,792	298,083	-30	22	-2
15	1032,051	1994,773	298,078	9	41	3
16	1032,093	1994,800	298,080	-33	14	1
17	1032,017	1994,810	298,077	43	4	4
18	1032,097	1994,830	298,077	-37	-16	4

Средняя квадратическая ошибка, вычисленная по формуле Гаусса, составила:

– по оси  $X = 39,0$  мм;

– по оси  $Y = 29,0$  мм;

– по оси  $H = 3,0$  мм.

На основе выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

– СКО посадки квадрокоптера в плане составляет 5–6 см и её значение зависит от модели квадрокоптера и навыка пилота;

– СКО измерений высотных отметок в лабораторных условиях составила 1,0 мм, а в полевых 3,0 мм.

Таким образом, БПЛА можно использовать в качестве подвижной вехи с возможностью получения топографических данных с точностью масштаба 1 : 500. Подвижная веха позволяет определять превышения и высоты поверхностей с СКО порядка 2,0–3,0 мм.

### 3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

#### 3.1 Конструктивные и эксплуатационные особенности системы «турбоагрегат – фундамент – основание»

Кроме выполнения деформационного мониторинга инженерных сооружений ТЭС и АЭС, включая и сооружения башенного типа, производится также высокоточное инженерно-геодезическое нивелирование.

Основным технологическим оборудованием атомных и тепловых электростанций, наряду с реакторами и котлами, являются быстроходные (скорость вращения ротора 3 000 оборотов в минуту) и тихоходные (скорость вращения ротора 1 500 оборотов в минуту) турбоагрегаты мощностью от 100 до 1 000 МВт. Данное оборудование относится к классу прецизионных, так как при его изготовлении применяется высокоточное технологическое оборудование, а монтаж осуществляется также высокоточными средствами измерений. При последующей эксплуатации турбоагрегатов производится целый комплекс работ по обеспечению неизменных (в пределах допуска) его геометрических параметров, установленных, согласно требованиям нормативных документов завода-изготовителя, в процессе их монтажа.

Работа турбоагрегата входит в состав системы «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО). Для обеспечения нормальной работы этой системы требуется сохранение в процессе ее эксплуатации проектной линии роторов (линия валопровода). Линия валопровода представляет собой набор роторов (от 6 до 10), которые соединяются между собой полумуфтами с использованием специальных прецизионных болтов. Соединение роторов между собой с заданной заводом-изготовителем точностью (0,01–0,03 мм) называется центровкой роторов. Нарушение установленных значений центровок роторов приводит к увеличению вибрации фундамента турбоагрегата при его работе. Турбоагрегат устанавливается на фундамент

особой конструкции, состоящий из нижней плиты, колонн и верхней плиты, которая опирается на эти колонны. Эта вибрация передается на линию валопровода и при недопустимых ее значениях приводит к аварийной остановке турбоагрегата. Изменение установленных значений центровок роторов происходит вследствие тепловых деформаций колонн фундамента, которые приводят к изменению их длины, а затем к изгибу верхнего строения фундамента, после чего к изгибу нижней части цилиндров турбоагрегата. Так как роторы располагаются на нижней части цилиндров, то также изгибается и линия роторов, что приводит к изменению значений их центровок [20, 38, 120].

В зависимости от мощности турбоагрегата, длина роторов колеблется от 2,0 до 10,0 м. Каждый ротор устанавливается на два подшипника и вследствие этого под действием собственного веса он, в зависимости от длины, прогибается на величину от 0,10 до 0,50 мм. Эта линия роторов устанавливается в проектное положение в процессе монтажа или ремонта турбоагрегата согласно требованиям монтажного формуляра завода-изготовителя. Так как каждый ротор имеет прогиб, то после их соединения полумуфтами валопровод представляет собой дугообразную упругую цепную линию с общей стрелой прогиба до 3,0–5,0 мм. Отношение стрелы прогиба валопровода к его длине является относительным прогибом.

Общим требованием к нормальной работе турбоагрегата является сохранение центровок роторов линии валопровода (линия роторов), которые были установлены на стадии монтажа проточной части турбоагрегата. Однако, под действием различных факторов, в основном из-за прогиба нижней плиты фундамента турбоагрегата и тепловых деформаций колонн этого фундамента, происходит изгиб плавной линии валопровода. Появление такого изгиба приводит к появлению вибрации валопровода и при недопустимых ее значениях к аварийному останову турбоагрегата.

Поэтому основной задачей выполнения инженерно-геодезических измерений при эксплуатации системы ТФО является определение деформационного ее состояния в зависимости от деформации нижней плиты (прогиба или выгиба), а также тепловых деформаций колонн фундамента турбоагрегата.

Наиболее динамично происходит деформация системы ТФО вследствие изменения температурного режима работающего турбоагрегата. Поэтому в зависимости от изменения этого режима и производятся инженерно-геодезические измерения.

Определение тепловых деформаций колонн фундамента (их высота в зависимости от мощности турбоагрегата достигает 12,0 м) производится высокоточным геометрическим нивелированием короткими лучами при следующих режимах работы турбоагрегата: «останов-пуск-работа» и «работа-останов». По полученным результатам вертикальных тепловых деформаций колонн фундамента производится расчет изменений значений центровок роторов. От правильной интерпретации полученных результатов тепловых деформаций фундамента и последующего выполнения расчета их параметров зависит величина установленных во время проведения ремонта турбоагрегата значений центровок роторов.

В связи с тем, что возведение фундамента, монтаж турбоагрегата и его дальнейшая эксплуатация являются сложным процессом, необходимо строго выполнять общую технологическую схему проведения инженерно-геодезических работ различной точности на стадиях проектирования, строительства, монтажа и последующей эксплуатации системы ТФО.

На всех стадиях возведения (строительство, монтаж и эксплуатация) системы ТФО применяются высокоточные инженерно-геодезические измерения, к которым относятся [20, 38, 90, 120]:

- вынос продольной (линия валопровода) и поперечной (опоры подшипников) осей турбоагрегата на верхнее строение фундамента с СКО измерений 0,5–1,0 мм;
- определение высотного положения закладных частей под цилиндры и генератор турбоагрегата с СКО измерений 0,3–0,5 мм;
- определение деформационного состояния системы ТФО на этапах возведения фундамента, монтажа турбоагрегата и последующих режимов эксплуатации.

Одновременно с производством геодезических работ, выполняемых при возведении фундамента и последующего монтажа турбоагрегата, необходимо выполнять с заданной цикличностью высокоточные геодезические измерения, связанные

с определением деформационного состояния системы ТФО на следующих основных этапах:

- при возведении фундамента;
- при первом пуске и останове турбоагрегата;
- при режиме «пуск-работа-останов-пуск».

Надежность работы системы ТФО в значительной мере зависит от ее деформационного состояния. Это обусловлено тем, что установленные при монтаже турбоагрегата значения центровок роторов (цепная линия валопровода) с течением времени изменяются по следующим основным причинам:

- деформации (прогиба, выгиба) нижней плиты фундамента турбоагрегата;
- тепловые деформации колонн фундамента;
- тепловые деформации корпуса турбоагрегата.

В связи с этой с целью – определение величин деформаций – необходимо выполнять комплекс высокоточного инженерно-геодезического нивелирования короткими лучами по осадочным маркам, заложенным на разных горизонтах фундамента (нижняя и верхняя плиты, отметка +0,6–0,8 м, колонны) и на нижнем разъеме цилиндров (высокого, среднего и нижнего давлений) турбоагрегата. Осадочные марки, установленные на нижней плите (отм. -3,500–6,100 м) используются только в период строительства фундамента турбоагрегата (в период эксплуатации могут использоваться только марки, доступные для нивелирования).

После завершения возведения фундамента, монтажа турбоагрегата деформационное состояние системы ТФО определяется в основном по маркам, заложенным на верхней плите и горизонтальном разъеме турбоагрегата с определенной точностью и цикличностью.

### 3.2 Расчет точности и цикличности выполнения измерений

Для определения изменений значений центровок роторов необходимо выполнять высокоточное геометрическое нивелирование короткими лучами с необходимой точностью и цикличностью. Цикличность измерений зависит от целого ряда

факторов, основными из которых являются мощность турбоагрегата, скорость вращения ротора, конструкции фундамента [38, 43]. Исходными данными для их расчета являются:

- допустимая величина эксплуатационного допуска на прогиб фундамента турбоагрегата;
- промежуток времени, который необходим для полного нагревания (остывания) системы ТФО при изменении режима ее работы.

Согласно требованиям завода-изготовителя и литературных источников [1, 38] стрела прогиба нижней плиты за межремонтный период работы турбоагрегата не должна быть больше  $f = 0,0001L$  (при длине линии валопровода) не более 40 м и  $f = 0,00015L$  более 40 м. При этом прогиб должен иметь плавный характер и иметь кривизну одного знака. Так при длине плиты (валопровода) 50 м величина стрелы прогиба будет равна 7,7 мм.

Применительно к эксплуатации системы «турбоагрегат-фундамент-основание» величина допустимого прогиба нижней плиты переносится и к верхней плите, на которой располагается турбоагрегат. В отличие от нижней плиты направление деформации (прогиб или выгиб) верхней плиты зависит от теплового режима состояния всей системы ТФО, а также окружающей температуры воздуха.

Если принять для длины нижней плиты  $f_{\text{доп}} = 7,7$  мм, то тогда максимально допустимое значение абсолютной ошибки измерений, согласно требованиям ГОСТ Р 58943–20, будет равно

$$m_{\text{пред}} < 0,4\Delta x,$$

где  $m_{\text{пред}}$  – максимально допустимое значение абсолютной ошибки измерений;

$\Delta x = f$  – допуск на величину прогиба нижней плиты.

Если принять коэффициент перехода от допуска  $\Delta x$  к СКО измерений, равным 3,0, то будем иметь СКО измерений

$$m < 0,13\Delta x.$$

Принимая в нашем случае  $\Delta x = 7,5$  мм, получим величину СКО, равную  $m = 1,0$  мм.

Данная величина СКО измерений справедлива для случая, когда требуется определить наступление допустимого  $f_{\text{доп}}$  прогиба нижней плиты (при пассивном контроле). Вместе с тем, прогиб нижней плиты развивается в связи с последующим нагружением ее колоннами, затем верхним строением и, наконец, устанавливаемым турбоагрегатом. Тем самым происходит ее постепенное нагружение и, следовательно, постепенный прогиб, который в значительной степени развивается в основном в первые два–три года после завершения возведения системы ТФО и первых лет ее эксплуатации.

Необходимо отметить, что при возведении нижней плиты и последующем ее нагружении колоннами, а затем и верхней плитой, образуемый прогиб нижней плиты не влияет на линию валопровода, так как не произведен монтаж турбоагрегата. Прогиб валопровода начинается с окончанием установки нижних частей цилиндров и началом укладки роторов в их проточную часть. В этом случае с началом выполнения центровок роторов вместе с продолжающимся прогибом нижней плиты прогиб будет получать и устанавливаемая линия роторов (валопровода).

В общем случае после проведения монтажа всех роторов их ось будет представлять цепную линию с определенным прогибом. При пуске турбоагрегата колонны фундамента нагреваются (особенно по его середине) и вследствие этого происходит выгиб валопровода (тепловые деформации колонн). Так как при работающем турбоагрегате валопровод вращается со скоростью 1 500 или 3 000 об./минуту, происходит нарушение положения цепной линии и возникает напряжение в полумуфтах, что приводит к увеличению вибрации, порой к недопустимой. В последнем случае часто происходит аварийный останов турбоагрегата.

В связи с этим задачей высокоточного нивелирования является выявление динамики выгиба валопровода в зависимости от изменения режима работы турбоагрегата [38, 43]: нагрев или останов.

Как показывает практика эксплуатации турбоагрегатов различной мощности, изменение динамики выгиба (прогиба) валопровода работы происходит, в зависи-



мости от типа турбоагрегата, за 4–6 суток. За эти промежутки времени величины выгиба (прогиба) достигают 4,0–6,0 мм. Предельная величина прогиба наступает, в зависимости от типа турбоагрегата, на 4–7 сутки после пуска.

Таким образом, за одни сутки величина прогиба (выгиба) линии валопровода составляет 0,8–1,0 мм. В этом случае принимая  $\Delta x = 1,0$  мм получим  $m_{\text{пред}} = 0,40$  мм и  $m = 0,13$  мм.

Данная ошибка измерений относится к определению величины прогиба (выгиба) оси валопровода с одной станции. При длинных фундаментах для определения величины прогиба в середине плиты измерения необходимо выполнять минимум из двух станций. Тогда величина СКО измерения превышения на станции должна быть не хуже 0,08–0,10 мм.

Для определения деформаций на всех участках плиты над каждой колонной закладываются осадочные марки (до 24), по которым прокладывается нивелирный ход.

Установление цикличности выполнения измерений необходимо для решения следующих задач:

- определения времени, необходимого для полного прогрева (остывания) фундамента;
- определения величины деформации валопровода (выгиба и прогиба) по окончании полного прогрева (остывания) фундамента;
- установления характера и величины изменения деформации валопровода для данного фундамента, так как из-за различного качества теплоизоляции паропроводов возникают различные по величине деформации.

Высокоточное нивелирование первого цикла по маркам нижней плиты необходимо производить сразу после ее возведения, и оно с заданной цикличностью выполняется до начала установки на неё колонн фундамента. Данный цикл нивелирования принимается за исходный и нивелирный ход связывается с глубинным репером.

При выполнении первого цикла высокоточного нивелирования также определяется:

- количество и качество заложенных на плите осадочных марок;

– при обнаружении отклонений от проекта в закладке марок составляется акт о необходимости устранения недостатков;

– намечается наиболее удобная схема привязки марок фундамента с реперами исходной высотной основы (на период свободного доступа на нижнюю плиту).

После установки колонн фундамента и заливки верхней плиты измерения продолжают и при монтаже турбоагрегата. В период монтажа турбоагрегата на нижней части цилиндров (горизонтальном разъеме) также устанавливаются осадочные марки. Так как эти марки находятся на уровне линии роторов, то полученные по ним величины деформаций будут в полной мере отражать действительную картину изгиба линии валопровода.

Цикличность выполнения измерений на данном этапе возведения системы ТФО с турбоагрегатом мощностью 500 МВт и выше дана в таблице 3.1.

Полученные результаты геодезических измерений позволяют предварительно, на период возведения фундамента и монтажа турбоагрегата, установить величину осадки системы ТФО, прогиб нижней плиты и крен фундамента.

Таблица 3.1 – Последовательность циклов высокоточного нивелирования при возведении фундамента и монтаже турбоагрегата

№ п/п	Этапы возведения фундамента турбоагрегата	Число циклов измерений и их последовательность
1	Установка нижней плиты	Один цикл по маркам нижней плиты (исходный цикл нивелирования)
2	Установка колонн фундамента, заливка верхней плиты	Один цикл измерений в месяц по маркам нижней и верхней плит в течение всего периода возведения. Передача отметки на верхнюю плиту
3	Установка нижних частей цилиндров и марок на горизонтальный разъем	Один цикл измерений в месяц по маркам нижней и верхней плит, а также горизонтальному разъему в течение всего периода монтажа
4	Укладка роторов и центровка проточной части турбоагрегата	После завершения укладки роторов и центровки роторов один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и горизонтальному разъему
5	Установка верхней части цилиндров	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и горизонтальному разъему
6	Окончательная центровка роторов валопровода	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и горизонтальному разъему
7	Связь элеватором высот отм. +0,8 с верхней плитой	Один цикл измерений по маркам на отм. +0,8 и верхней плиты фундамента
8	Пуск турбоагрегата	За сутки до пуска один цикл измерений по маркам верхней плиты и горизонтальному разъему

После завершения возведения системы ТФО особое внимание уделяется выполнению высокоточного нивелирования короткими лучами с целью определения деформационного состояния системы ТФО при режимах работы турбоагрегата «пуск-работа-останов-пуск».

Полученные результаты геодезических измерений позволяют:

- получить реальное положение в пространстве (деформационное состояние) верхней плиты и линии роторов;
- уточнить значения центровок полумуфт линии роторов и внести их в формуляр паспорта завода-изготовителя;
- при последующем ремонте турбоагрегата выполнить центрирование линии роторов с использованием новых значений центровок;
- с учетом введения уточненных значений центровок уменьшить вибрацию турбоагрегата, а также температуру масла и подшипников, на которые опираются роторы.

Высокоточное нивелирование при эксплуатации системы ТФО выполняется с длиной визирного луча 5,0–7,0 м. Увеличению длины визирного луча при работающем турбоагрегате препятствует вибрация фундамента.

Цикличность выполнения высокоточного нивелирования дана в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Число и последовательность циклов измерений при эксплуатации системы ТФО (пуск-работа-останов-пуск)

1 Этапы эксплуатации системы ТФО	Число циклов измерений и их последовательность
2 Набор вакуума и веса воды в конденсаторах	Один цикл измерений по маркам верхней плиты и маркам горизонтального разъема
3 Турбоагрегат на валоповороте	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента
4 Начало пуска турбоагрегата, плавный набор мощности	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента
5 Турбоагрегат в работе	Один цикл измерений по маркам верхней плиты
6 Турбоагрегат в работе 7–8 суток	Ежедневные циклы измерений по маркам верхней плиты фундамента. По окончании один цикл измерений по маркам горизонтального разъема. Установление характера и величины теплового удлинения (деформаций) колонн фундамента. Вычисление значений центровок роторов по результатам нивелирования

## Окончание таблицы 3.2

7 Проектный режим работы турбоагрегата	Один цикл измерений по маркам верхней плиты и маркам горизонтального разъема в квартал
8 Подготовка турбоагрегата к останову. Останов.	Один цикл измерений по маркам горизонтального разъема и маркам верхней плиты
9 Турбоагрегат остановлен 7–8 суток	Ежедневные циклы измерений по маркам верхней плиты фундамента. Цикл измерений по маркам горизонтального разъема. Установление характера и величины сжатия (деформаций) колонн фундамента после его остывания колонн фундамента
10 Турбоагрегат в ремонте	Учет значений центровок роторов по результатам определения тепловых деформаций колонн здания турбины и колонн фундамента турбоагрегата. Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и маркам горизонтального разъема за период ремонта
11 Окончание ремонта. Пуск турбоагрегата	Последовательность и число измерений согласно п. 1–4

Важной задачей при монтаже и последующей эксплуатации системы ТФО является обеспечение своевременного анализа полученных значений деформаций. На данном этапе основной целью высокоточного нивелирования является определение начала стабилизации положения системы ТФО, а значит и оси валопровода, и выдача рекомендаций по окончательной центровке роторов, а на стадии эксплуатации – слежение за изменением значений этих центровок. Стабилизация тепловых деформаций фундамента происходит на 7–8 сутки после пуска турбоагрегата. Остывание фундамента зависит от температуры окружающего воздуха в турбинном зале, и в среднем оно происходит через 7–8 суток.

По результатам нивелирования марок верхней плиты определяется:

- величины тепловых деформаций верхнего строения фундамента;
- расчетные величины удлинения колонн, обусловленных качеством их изоляции от расположенных рядом паропроводов;
- разности расчетных и фактических величин тепловых деформаций стоек фундамента;
- величины прогиба верхней плиты;
- значения изменения центровок роторов, обусловленные тепловыми деформациями верхнего строения фундамента и нижней части цилиндров.

По маркам, заложенным на горизонтальном разъеме, определяются величины деформаций линии роторов (валопровода) на уровне горизонтального разъема.

Завершающим этапом производства инженерно-геодезических работ является расчет изменения центровок роторов по геодезическим данным.

Переход от возведения фундамента и монтажа турбоагрегата к постоянной эксплуатации системы ТФО приводит к изменению взаимного положения опор (подшипников) роторов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Это изменение в свою очередь приводит к изменению значений центровок роторов: раскрытию полумуфта по торцу и их взаимному смещению по окружности. Суммарная величина изменения взаимного положения опор роторов в вертикальной плоскости на уровне горизонтального разъема, вследствие влияния различных факторов, выражается формулой [43]

$$\Delta = \delta_{\text{ст}} + \delta_{(t)}^{\phi} + \delta_{(t)}^{\text{ц}} + \delta_{\text{сез}} + \delta_{\text{дин}}, \quad (3.1)$$

где  $\delta_{\text{ст}}$  – статическая деформация, вызванная общей осадкой фундамента турбоагрегата;

$\delta_{\text{дин}}$  – динамическая (тепловая) деформация колонн фундамента, вызванная различными режимами работы турбоагрегата (валоповорот, набор веса воды и вакуума, пуск, рабочий режим, останов и т. д.);

$\delta_{\phi(t)}$  – деформация фундамента, обусловленная изменением температуры в турбинном цехе;

$\delta_{\text{ц}(t)}$  – деформация нижней части цилиндров, вызванная изменением их температуры при различных режимах работы турбоагрегата;

$\delta_{\text{сез}}$  – сезонные деформации, обусловленные сезонным оттаиванием грунтов и изменением режима вод в непосредственной близости к турбинному залу.

Наибольшее влияние на положение опор роторов в вертикальной плоскости оказывает величина  $\delta_{\text{дин}}$ , которая для высоких колонн фундамента может достигать 4,5–5,8 мм.

Расчет величины  $\delta_{\text{дин}}$  производится конструкторами на стадии проектирования фундамента. Однако расчетная величина  $\delta_{\text{дин}}$  в подавляющем большинстве случаев не согласуется с фактическими из-за следующих основных факторов:

- отклонения фактического расположения паропроводов по отношению к колоннам фундамента от расчетного;
- различного качества теплоизоляции паропроводов;
- нарушения теплоизоляции паропроводов во время эксплуатации турбоагрегата.

Необходимо отметить, что несмотря на стандартную конструкцию всех фундаментов конкретного типа, величины  $\delta_{\text{дин}}$  для них различаются.

Неравномерное перемещение опор роторов в вертикальной плоскости приводит к изменению значений центровок и в горизонтальной плоскости [43]

$$\Delta = \Delta_{\text{ст}} + \Delta_{(t)}^{\Phi} + \Delta_{(t)}^{\Pi} + \Delta_{\text{сез}} + \Delta_{\text{дин}}, \quad (3.2)$$

где  $\Delta_{\text{ст}}$  – статистическая деформация, вызванная общей осадкой фундамента турбоагрегата и его наклоном;

$\Delta_{(t)}^{\Phi}$  – температурная деформация фундамента в горизонтальной плоскости вследствие общего изменения внешней температуры;

$\Delta_{(t)}^{\Pi}$  – деформация нижней части цилиндров, вызванная изменением их температуры при различных режимах работы, которые приводят к неравномерному наклону колонн;

$\Delta_{\text{сез}}$  – сезонные деформации, обусловленные сезонным оттаиванием вечномерзлых грунтов и изменением режима вод, которые приводят к неравномерному наклону колонн;

$\Delta_{\text{дин}}$  – динамическая деформация в горизонтальной плоскости, вызванная следующими режимами работы турбоагрегата: валоповорот, набор веса воды и вакуума, пуск, рабочий режим, останов, и т. д.

При первом после монтажа пуске турбоагрегата проектировщиков фундамента и службы эксплуатации станции интересует фактическая величина тепловой деформации данного фундамента. Фактическая величина изменения длин колонн фундамента определяется инженерно-геодезическими измерениями с применением элеватора высот. К настоящему времени разработаны целый ряд схем элеваторов высот, основанных на применении следующих видов высокоточных инженерно-геодезических измерений следующими способами [43]:

- геометрическим нивелированием и стальной компарированной рулеткой (инварной проволокой или лентой);
- высокоточным геометрическим нивелированием короткими лучами;
- постоянно подвешенными возле колонн инварными стержнями;
- высокоточным тригонометрическим нивелированием короткими лучами;
- измерением вертикального расстояния между марками на отм.+0,80 м и марками на верхней плите высокоточным тахеометром.

В настоящее время наиболее широкое применение получили элеваторы высот, основанные на применении высокоточного геометрического нивелирования короткими лучами, при реализации которого связь осадочных марок на отм. +0,60-0,80 и марок на верхней плите производится проложением нивелирного хода (снизу вверх) с установкой нивелира на расположенные на разной высоте строительные конструкции. Достоинством данного способа является определение изменения величины температурной деформации при режимах работы турбоагрегата «останов-работа» и «работа-останов» с СКО порядка 0,25–0,30 мм с учетом того, как уже указывалось выше, что величины этих деформаций для высоких колонн фундамента могут достигать 4,5–5,8 мм.

Применение тригонометрического нивелирования короткими лучами при создании элеватора высот целесообразно при свободной площадке на нулевой отметке. Данный метод нивелирования обеспечивает измерения превышения на станции в зависимости от влияния внешних условий с СКО порядка 0,05–0,12 мм.

При использовании данного способа высокоточное нивелирование выполняется по программе ЗЗПП при двух горизонтах инструмента. Для передачи превы-

шения с отм. +0,60-0,80 на верхнюю плиту потребуется 4–5 станций. Затем после передачи отметки на марку верхней плиты производится нивелирование всех марок верхней плиты с вычислением их высотных отметок.

Величина допустимой невязки при передаче превышения на верхнюю плиту вычисляется по формуле

$$m_h = 0,20 \text{ мм} \sqrt{n}, \quad (3.3)$$

где  $n$  – число станций в нивелирном ходе.

Как показывает практика выполнения высокоточного нивелирования по верхней плите, даже при работающем турбоагрегате величины этих невязок, как правило, не превосходят 0,25–0,30 мм (при измерении четырех превышений на станции).

Необходимо отметить, что применение цифровых нивелиров для выполнения высокоточного нивелирования при работающем турбоагрегате часто не представляется возможным из-за наличия вибрации. Особенно данный факт имеет место при выполнении нивелирования в районе турбоагрегата. Применение амортизационных подкладок также затруднительно при амплитуде вибрации больше 35–40 мкм.

### 3.3 Расчет и отображение изменений значений центровок роторов валопровода

После выполнения очередного цикла наблюдений производится расчет значений центровок (раскрытие полумуфт) роторов (по торцу полумуфт), полученных по результатам нивелирования, для данного режима работы турбоагрегата (рисунок 3.1) с целью определения изменения линии валопровода.

Значения центровок роторов могут быть получены из результатов нивелирования по осадочным маркам верхней плиты или макам, заложенным на горизонтальном разъеме цилиндров. Полученные значения центровок роторов при работающем турбоагрегате будут свидетельствовать о правильности их установок во время его ремонта.



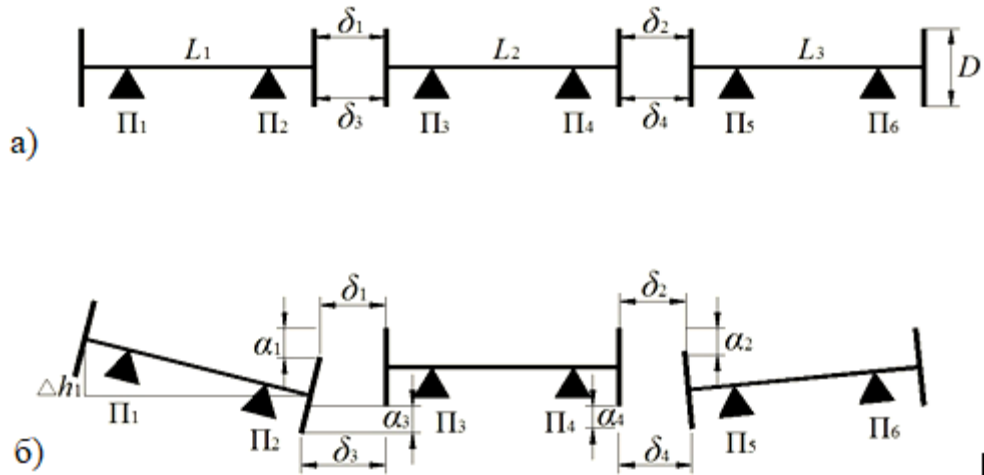


Рисунок 3.1 – Схема расположения роторов и подшипников валопровода:

- а) при отсутствии смещения и раскрытия полумуфт;  
 б) при наличии смещения и раскрытия полумуфт

Изменение значений центровок роторов вызывается прогибом линии валопровода, который в свою очередь вызывается прогибом нижней плиты и температурными деформациями колонн фундамента.

Выше указывалось, что за одни сутки величина прогиба (выгиба) линии валопровода составляет 0,8–1,0 мм. Принимая  $\Delta x = 1,0$  мм, получим  $m_{\text{пред}} = 0,40$  мм и  $m = 0,13$  мм. Так как изменение прогиба происходит по всей длине валопровода, то и значения центровок роторов будут изменяться по-разному на каждой муфте.

Установление нормативных значений центровок роторов производится при ремонте турбоагрегата перемещением вкладышей подшипников или корпусов подшипников.

Величина этих перемещений вычисляется по следующим формулам [1, 38]

$$\begin{aligned}
 x_1 &= (\delta_1 - \delta_3) \frac{L-l}{D} + \frac{a_1 - a_3}{2}, \\
 x_2 &= (\delta_2 - \delta_4) \frac{L-l}{D} + \frac{a_2 - a_3}{2}, \\
 y_1 &= (\delta_1 - \delta_3) \frac{L-l}{D} + \frac{a_1 - a_3}{2}, \\
 y_2 &= (\delta_2 - \delta_4) \frac{L-l}{D} + \frac{a_2 - a_3}{2},
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

где  $L$  – расстояние от полумуфта до дальнего подшипника (см. рисунок 3.1);

$l$  – расстояние между осями подшипников;

$\delta$  – расстояние между торцами полумуфт;

$a_1, a_2, a_3, a_4$  – значения центровок (смещение полумуфта) по окружности, полученные при совместных поворотах ротора на 0, 90, 180 и 270°.

Завод изготовитель задает в формуляре допусковое отклонение на раскрытие  $\delta_1$ - $\delta_3$  и  $\delta_2$ - $\delta_4$  полумуфт роторов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, которое должно удовлетворять условию

$$\delta_1 - \delta_2 \leq \pm 0,03 \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Величина раскрытия  $\delta_1$ - $\delta_2$  полумуфт роторов в вертикальной определяется из результатов высокоточного нивелирования по маркам верхней. В этом случае смещение (превышение) одного конца ротора валопровода относительно другого будет равно

$$h = \frac{\delta \cdot L}{D}, \quad (3.6)$$

где  $L$  – длина ротора;

$D$  – диаметр полумуфты.

На рисунке 3.2 приведена схема расположения марок на верхней плите турбоагрегата мощностью 500 МВт.

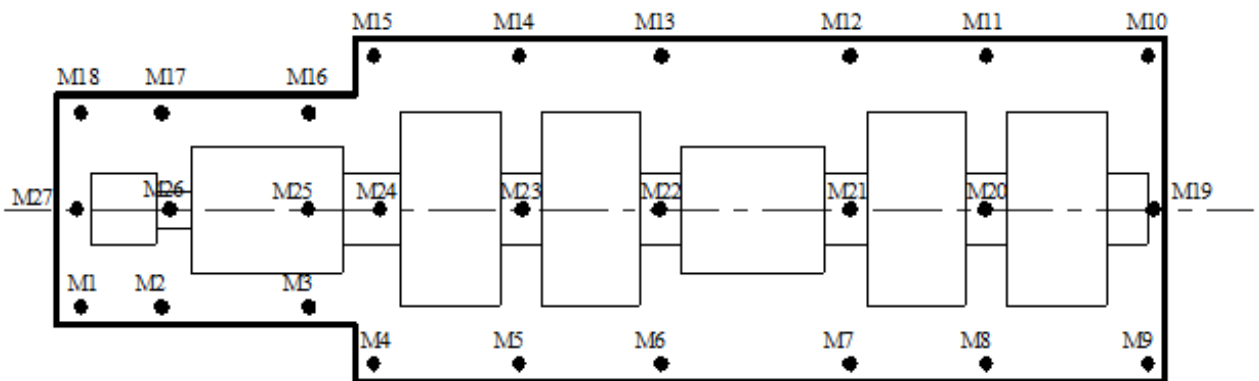


Рисунок 3.2 – Схема расположения марок на верхней плите

Таким образом, по результатам высокоточного нивелирования имеется возможность определить изменение высотного положения роторов валопровода и по величине этого смещения определить фактическую величину раскрытия полумуфта при работающем турбоагрегате.

В таблице 3.3 приведены результаты наблюдений за тепловыми деформациями верхней плиты турбоагрегата мощностью 500 МВт при различных режимах его работы.

Таблица 3.3 – Величины деформаций марок для фундамента турбоагрегата № 4

№ марок	Координаты расположения марок, мм		Величины относительных осадок марок за 10 лет эксплуатации ТА № 4, мм			
	X	Y	ТА № 4 останов	ТА № 4 останов-пуск (24 часа)	ТА № 4 работа (48 часов)	ТА № 4 работа (5 суток)
1	2	3	4	5	6	7
M1	1500	500	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
M2	1500	6050	1,28 (-2,10)	1,06 (-2,10)	1,38 (-2,10)	1,53 (-2,10)
M3	1500	12100	-2,28 (-2,68)	1,14 (-2,68)	1,64 (-2,68)	1,83 (-2,68)
M4	500	15800	-1,65 (-3,05)	1,35 (-3,05)	1,92 (-3,05)	2,15 (-3,05)
M5	500	23100	-2,98 (-3,65)	2,08 (-3,65)	2,35 (-3,65)	2,62 (-3,65)
M6	500	30300	-3,09 (-3,68)	2,88 (-3,68)	3,19 (-3,68)	3,44 (-3,68)
M7	500	39800	-3,20 (-3,70)	3,00 (-3,70)	3,26 (-3,70)	3,42 (-3,70)
M8	500	46950	-3,50 (-3,78)	3,10 (-3,78)	3,23 (-3,78)	3,36 (-3,78)
M9	500	54500	-3,12 (-3,30)	3,02 (-3,30)	3,22 (-3,30)	3,41 (-3,30)
M10	6300	54500	-2,83 (-3,18)	2,33 (-3,18)	2,38 (-3,18)	2,67 (-3,18)
M11	6300	46900	-2,45 (-3,06)	2,45 (-3,06)	2,66 (-3,06)	2,75 (-3,06)
M12	6300	39800	-2,80 (-3,45)	2,90 (-3,45)	3,30 (-3,45)	3,50 (-3,45)
M13	6300	30400	-2,60 (-3,00)	3,10 (-3,00)	3,58 (-3,00)	3,73 (-3,00)
M14	6300	23050	-2,84 (-3,16)	2,80 (-3,16)	3,24 (-3,16)	3,36 (-3,16)
M15	6300	15800	-3,64 (-4,12)	2,16 (-4,12)	2,37 (-4,12)	2,46 (-4,12)
M16	5300	12150	-3,48 (-4,56)	1,68 (-4,56)	2,08 (-4,56)	2,23 (-4,56)
M17	5300	6050	-4,14 (-5,25)	1,14 (-5,25)	1,35 (-5,25)	2,45 (-5,25)
M18	5300	500	-4,34 (-5,78)	1,34 (-5,78)	1,23 (-5,78)	1,51 (-5,78)

*Примечание:* верхние цифры – верх фундамента; нижние цифры – низ фундамента

В таблице 3.4 приведены результаты тепловых деформаций верхней плиты турбоагрегата по его оси (оси валопровода).

Таблица 3.4 – Величины деформаций марок для оси фундамента турбоагрегата № 4

№ марок	Координаты марок, мм		Величины относительных осадок марок за 10 лет, мм			
	X	Y	ТА № 4 останов	ТА № 4 останов- пуск (24 часа)	ТА № 4 работа (48 часов)	ТА № 4 ра- бота (5 суток)
1	2	3	4	5	6	7
M27	3400	54500	-2,17 (-2,89)	0,67 (-2,89)	0,62 (-,89)	0,76 (-,89)
M26	3400	46950	2,71 (-3,68)	1,10 (-3,68)	1,36 (-3,68)	1,99 (-3,68)
M25	3400	39800	-2,88 (-3,62)	1,41 (-3,62)	2,15 (-3,62)	2,29 (-3,62)
M24	3400	30300	-2,64 (-3,58)	2,08 (-3,58)	2,14 (-3,58)	2,19 (-3,58)
M23	3400	23100	-2,91 (-3,40)	2,24 (-3,40)	2,80 (-3,40)	2,99 (-3,40)
M22	3400	15800	-2,84 (-3,34)	2,99 (-3,34)	3,38 (-3,34)	3,58 (-3,34)
M21	3400	12100	-3,00 (-3,58)	2,95 (-3,58)	3,28 (-3,58)	3,46 (-3,58)
M20	3400	6050	-2,98 (-3,42)	2,78 (-3,42)	2,95 (-3,42)	3,06 (-3,42)
M19	3400	500	-2,98 (-3,24)	2,68 (-3,24)	2,80 (-3,24)	3,04 (-3,24)

*Примечание:* верхние цифры – верх фундамента; нижние цифры – низ фундамента.

Для наглядного отображения характера тепловых деформаций целесообразно применять трехмерное представление деформированных при нагреве поверхностей фундамента (рис. 3.3), что позволяет лучше понять характер деформаций. При создании 3-D модели для последующего расчета центровок учитываются величины тепловых деформаций по оси линии роторов. Величины этих деформаций получают как среднее значение из деформаций левой и правой сторон верхней плиты.

Поверхности деформаций были построены по данным геодезических измерений (таблицы 3.3 и 3.4) в программе SURFER, интерполяция в узлах сетки выполнена методом кригинга, который учитывает закономерности деформаций поверхности.

На рисунке 3.3 отображена в 3D деформационная поверхность нижней плиты фундамента, на которой наглядно показаны участки с различным перемещением осадочных марок.

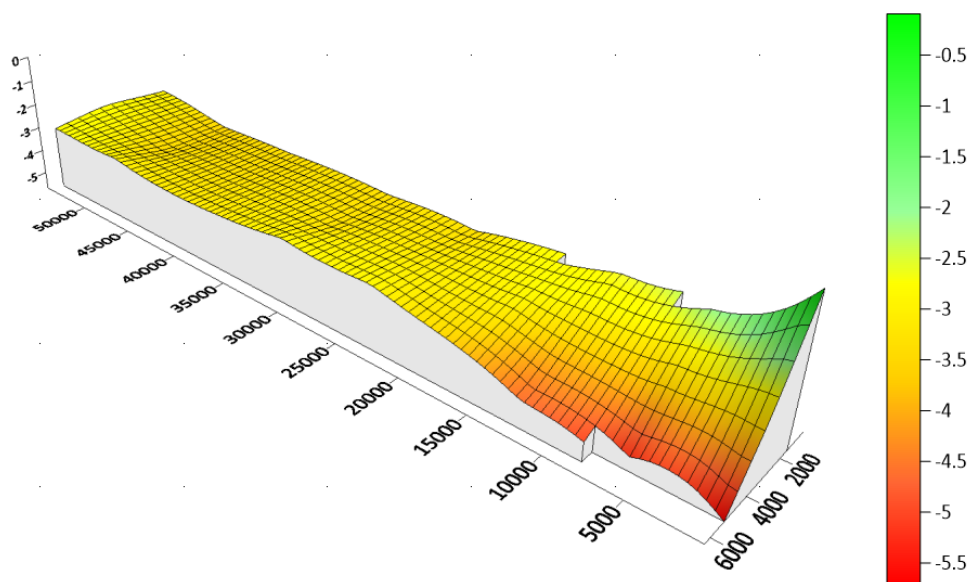


Рисунок 3.3 – Отображение в 3D деформационной поверхности нижней плиты фундамента

На рисунке 3.4 отображена в 3D деформационная поверхность верхней плиты фундамента, на которой также показаны участки с различным перемещением осадочных марок.

Применительно к системе «турбоагрегат – фундамент – основание» важным аспектом является отображение в 3D деформационной поверхности верхней плиты фундамента в зависимости от режима работы турбоагрегата.

На рисунке 3.5 (поверхность 1) показано высотное положение точек (таблица 3.4, 3.5 нижнее значение в строке, колонка 4), относительно точки 1 для низа фундамента во время останова.

На рисунке 3.5 (поверхность 2) это высотное положение точек 1–27 относительно точки 1 верха фундамента (верхнее значение в таблицах 3.4, 3.5 колонка 4) во время останова. На этом рисунке показаны крайние точки М19 и М27, расположенные на оси фундамента.

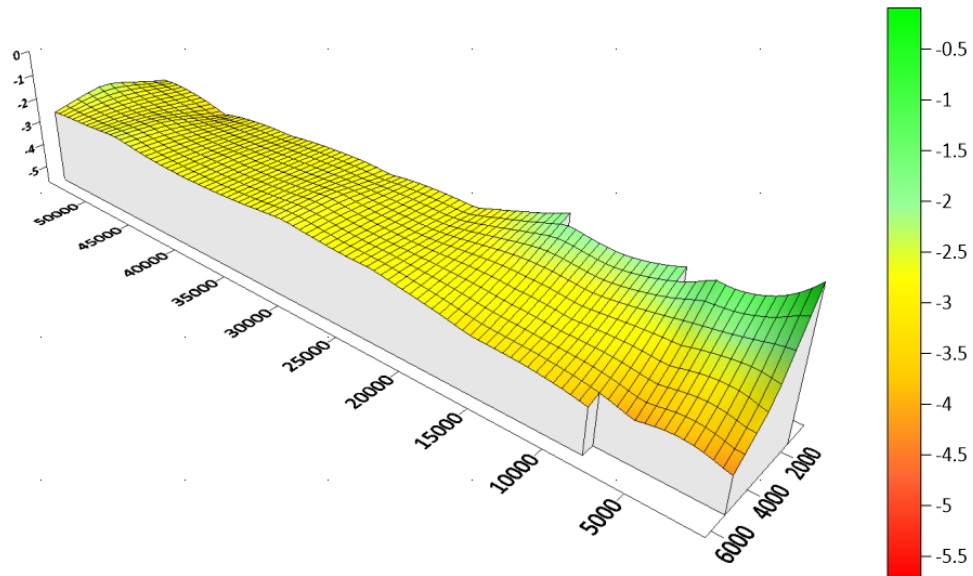


Рисунок 3.4 – Отображение в 3D деформационной поверхности верхней плиты фундамента

Поверхности 3, 4 и 5 показывают температурные деформации верхней плиты фундамента при нагреве верхней части фундамента после 24, 48 и 120 часов работы, соответственно, верхние значения деформаций в таблицах 3.4, 3.5, колонки 5,6 и 7.

Измерение деформации нижней части фундамента при работающем агрегате невозможно по температурным условиям. По мере работы агрегата температура верхней части фундамента изменяется неравномерно, что приводит к неравномерным температурным деформациям верхней части фундамента. На рис. 3.5 поверхности 3, 4, 5 показывают изменение высоты верхней части фундамента по оси агрегата по линии 24-25-26-27 (см. рисунок 3.5) в большей мере, чем по линии 19-20-21-22 (примерно на 1,0 мм), и деформации возрастают в поперечном направлении от точек 21-22-23. Такие деформации необходимо учитывать при монтаже частей агрегата в холодном состоянии, чтобы при температурной деформации после начала работы турбины и её нагреве ось вращения заняла горизонтальное положение.

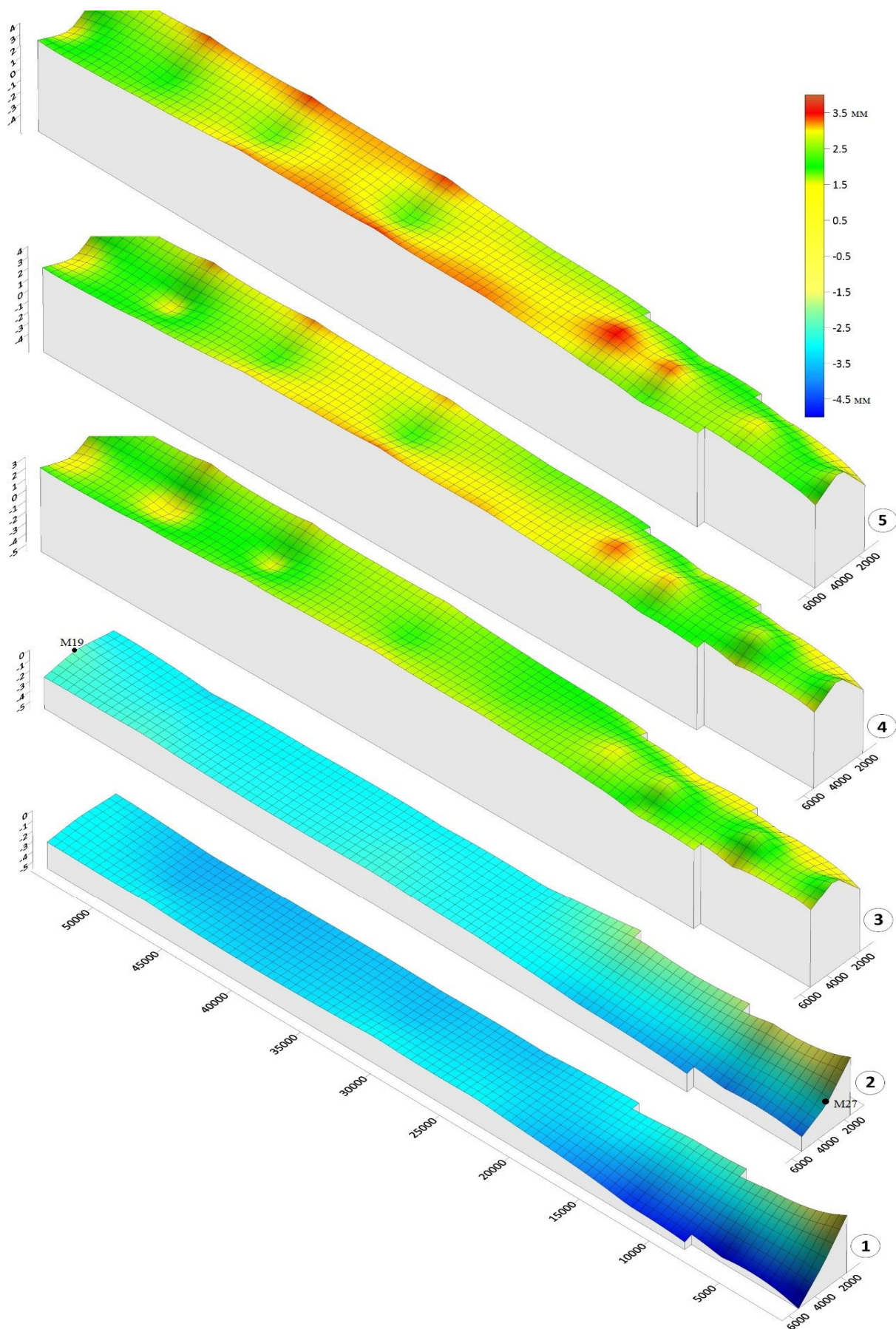


Рисунок 3.5 – Поверхности тепловых деформаций фундамента турбоагрегата

При расчете изменения (прогноза) значений центровок роторов валопровода необходимо знать прогнозное значение деформационного состояния системы «турбоагрегат – фундамент – основание» при различных режимах его работы, на которое влияют следующие основные факторы.

*1 Качественное выполнение инженерно-геологических изысканий в соответствии с требованием существующих нормативных документов.* От выбора площадки и полученных на ее территории результатов инженерно-геологических изысканий для строительства турбинного отделения в значительной мере будет зависеть:

- от применяемой конструкции фундамента под возводимый турбоагрегат;
- величины осадок и деформаций нижней плиты (крен и прогиб) турбоагрегата;
- вибрационного состояния системы «турбоагрегат – фундамент – основание»;
- величины и характера проявления тепловых деформаций фундамента при различных режимах работы турбоагрегата.

*2 Качественное проведение строительно-монтажных работ и последующего монтажа турбоагрегата.* На деформационное состояние системы «турбоагрегат – фундамент – основание» оказывает влияние качество возведения фундамента и монтаж турбоагрегата, особенно его проточной части.

Во время проведения этих работ высокоточное нивелирование выполняется с целью определения осадок фундамента в целом и прогиба верхней плиты с целью установления времени, когда их деформации минимальны и не приводят к заметному изменению значений центровок роторов. Результаты высокоточного нивелирования необходимы только для оценки деформационного состояния системы «основание – фундамент».

Остаточное влияние деформации системы «основание – фундамент» в значительной мере зависит и от времени монтажа турбоагрегата, который может производиться в теплый и в холодный периоды года. При монтаже турбоагрегата, особенно его проточной части, в теплый период года тепловые деформации фунда-



мента незначительны, и они практически не оказывают влияния на центровку роторов валопровода. Если же монтаж турбоагрегата производится в холодный период года, особенно в середине зимы (и если он расположен вблизи временного торца турбинного отделения), разность температур наружного и внутреннего воздуха, а также его непрерывные колебания приводят к изменению положения уже установленных роторов, а значит и центровок всей линии валопровода.

*3 Точность и периодичность выполнения высокоточного геометрического нивелирования.* Как показывает практика эксплуатации турбоагрегатов, наибольшие изменения положения линии роторов происходят в первые 5–6 дней после их пуска. В этот период часто производится внеплановый останов турбоагрегата вследствие появления недопустимой вибрации, которая может быть и следствием прогиба линии валопровода. Поэтому в период пуска турбоагрегата, а также в первые месяцы его работы, необходимо выполнять измерение превышений с СКО, не превышающей 0,08 мм, и с периодичностью не реже одного раза в месяц.

*4 Продолжительность наблюдений за деформационным состоянием системы «турбоагрегат – фундамент – основание».* Данный фактор относится к прогнозированию значений прогиба линии валопровода на последующий период (обычно 2,0–3,0 года) между ремонтами турбоагрегата. За данный период имеется возможность сравнения прогнозного и фактического значений прогиба линии валопровода, а значит и с прогнозными и фактическими значениями центровок роторов. Это сравнение покажет правильность выбора прогнозной модели, а также проводимой в данный интервал времени периодичности наблюдений.

*5 Правильность выполнения расчета центровок и выдача рекомендаций по установлению их значений в период эксплуатации.* Смысл данного фактора заключается в том, что даже при качественно выполненном высокоточном нивелировании могут быть допущены ошибки в расчетах прогнозных значений центровок. В этом случае во время проведения ремонта турбоагрегата на роторах будут установлены ошибочные значения центровок, и линия валопровода будет занимать положение, которое не будет соответствовать прогнозному (эксплуатационному) зна-

чению. Тогда во время пуска турбоагрегата резко возрастает вибрация, что приведет к экстренной его остановке с последующей перецентровкой роторов валопровода.

*б Принятие в полной или частичной мере службой эксплуатации станции рекомендаций по установлению новых значений центровок, выданных геодезической организацией на основе полученных данных из высокоточного геометрического нивелирования.* При ремонте турбоагрегата центрирование роторов валопровода может выполняться тремя вариантами:

- с использованием только рекомендаций, выданных заводом-изготовителем;
- частичным использованием рекомендаций, полученных на основе результатов геодезических измерений и выданных в виде прогнозных значений на ближайшие 2–3 года работы турбоагрегата;
- использованием в полном объеме рекомендаций, полученных на основе результатов геодезических измерений.

Здесь необходимо указать на следующее важное обстоятельство, которое заключается в том, что служба эксплуатации при центрировании роторов не всегда принимает во внимание рекомендуемые прогнозные значения центровок, которые получены по геодезическим данным. В подавляющем большинстве случаев это относится к тем электростанциям, на которых не поставлены должным образом геодезические работы по определению деформационного состояния системы «турбоагрегат – фундамент – основание». На тех электростанциях, где на должном уровне поставлены высокоточные геодезические измерения, учет прогнозных значений центровок производится при ремонте каждого турбоагрегата.

Таким образом, применение высокоточного геометрического нивелирования для наблюдений за деформационным состоянием системы «турбоагрегат – фундамент – основание» в части тепловой составляющей позволяет уточнить заводские значения центровок роторов. Температурные деформации колонн фундамента могут достигать 4,5–5,8 мм для турбоагрегата мощностью 500 МВт. Если не учитывать эти деформации и не изменять значения центровок роторов, установленные

заводом изготовителем, то происходит недопустимая величина раскрытия полу-муфт. Вследствие этого повышается вибрация всей системы в целом и увеличивается температура подшипников, на которые опираются роторы валопровода. Учет значений изменения центровок роторов при проведении их перецентровки позволяет работать турбоагрегату, во-первых, в нормальном режиме и, во-вторых, увеличить срок работы турбоагрегата без проведения их ремонтов, т. е. увеличить межремонтный период, что приведет к значительному увеличению выработки электроэнергии.

### 3.4 Совершенствование методики поверки тахеометров методом сличения способом двух станций

При создании планово-высотного обоснования на промплощадке, определении тепловых деформаций фундамента турбоагрегата высокоточным тригонометрическим нивелированием короткими лучами с СКО 0,20–0,25 мм, а также координировании марок на поверхности промышленной трубы с требуемой точностью необходимо применять тахеометры, которые прошли метрологическую поверку. Обеспечение единства геодезических измерений, например, линейных, выполняемых геодезическими приборами различного назначения и точности, осуществляется путем выполнения требований соответствующих нормативных документов [10, 11, 34, 33, 36, 52, 59]. Собственно, обеспечение единства измерений (поверка, аттестация) производится с применением установленных нормативными документами эталонов соответствующего разряда на основании локальных поверочных схем (ЛПС).

Применительно к проведению метрологических поверок тахеометров в качестве эталонов единицы длины предписывается использовать линейные отрезки стационарных эталонных базисов соответствующего разряда (1, 2-го и 3-го разрядов) [32, 59, 96]. С использованием этих базисов поверка осуществляется методом прямых измерений линейных отрезков в различных комбинациях. В свою очередь, эти линейные отрезки должны проходить периодическую поверку путем

их измерения базисным прибором БП-1 или группой (не менее трех) высокоточных фазовых светодалномеров.

В работах [97, 98] указывается, что в настоящее время стационарные линейные базисы, за редким исключением, не могут использоваться для проведения поверок тахеометров (светодалномеров) по причине утраты части центров эталонного базиса данного разряда, а также прекращения их периодических метрологических поверок. Тем самым не обеспечивается сохранение эталонной длины линейных отрезков и длины базиса в целом в течение межповерочного интервала.

С учетом этого в работах [74, 85, 86, 97, 98, 119] предлагаются способы проведения метрологической поверки тахеометров без применения стационарных линейных базисов методом непосредственного сличения с применением высокоточных фазовых светодалномеров (тахеометров).

Достоинствами рассмотренных способов является отсутствие необходимости создания стационарных линейных базисов в различных регионах страны, включая регионы с наличием вечной мерзлоты, а также введения поправок за метеоусловия, так как измерения эталонным и поверяемым тахеометрами выполняются практически одновременно при одинаковых значениях температуры, влажности и давления воздуха.

Для повышения точности получаемых результатов метрологической поверки нами [98] предлагается методика ее проведения способом «двух станций». При реализации данного способа могут быть применены две схемы выполнения измерений:

– со стационарной установкой нескольких штативов  $A, C, D, E, F, K$  и  $B$  (рисунок 3.6) и применением одного отражателя, который во время выполнения измерений последовательно переставляется в трегерах этих штативов;

– с произвольной установкой одного штатива с отражателем, который во время выполнения измерений последовательно переставляется вдоль линии  $AB$  в точках  $A, C, D, E, F, K$  и  $B$ .

Для выполнения метрологической поверки методом сличения должен применяться эталонный тахеометр. При этом, согласно требованиям метрологии, эталон-

ный тахеометр должен обеспечивать измерение расстояний с СКО меньше минимум в три раза.

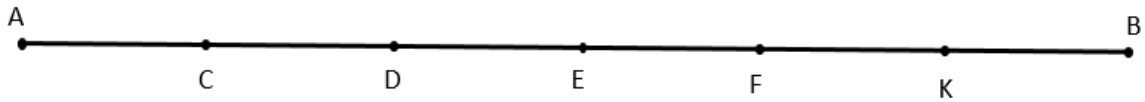


Рисунок 3.6 – Схема поверки тахеометра с двух станций

При реализации первой схемы в точке *A* на штативе или тумбе устанавливается эталонный тахеометр, а в точках *C*, *D*, *E*, *F*, *K* и *B*, расположенных по створу с отклонением от него не более чем 50 мм, заранее устанавливаются штативы с трегерами (в нашем случае их семь). При выполнении измерений в эти трегеры поочередно будет устанавливаться отражатель.

Если применяются штативы, то для получения качественных результатов измерений необходимо выполнять следующие требования:

- измерения в полевых условиях необходимо производить в пасмурную погоду при слабом ветре;
- штативы должны быть без люфтов в соединениях и устанавливаться на бетонное основание или твердый грунт;
- при выполнении измерений в зимнее время грунт или бетонное основание должны быть тщательно очищены от снега и льда;
- для увеличения устойчивости штативов к их станковому винту необходимо подвешивать груз весом до 5–6 кг;
- должна быть тщательно выполнена поверка уровня отражателя.

Если будут применяться стационарные тумбы, то они должны обеспечить принудительное центрирование тахеометров.

После расстановки штативов и стабилизации их положения производится измерение расстояния *AC* эталонным тахеометром тремя сериями по 15 раз в одной серии. Затем эталонный тахеометр аккуратно вынимается из трегера, на его место устанавливается поверяемый тахеометр и также производится измерение расстояния *AC* тремя сериями по 15 раз в одной серии.

Тем самым производится измерение одного расстояния  $AC$  эталонным и поверяемым тахеометрами.

После этого отражатель аккуратно вынимается из трегера штатива  $C$ , переносится и устанавливается в трегер штатива  $D$  с последующим измерением расстояния  $AD$  эталонным и поверяемым тахеометрами также тремя сериями по 15 раз в одной серии.

Аналогичным образом производятся измерения расстояний  $AE$ ,  $AF$ ,  $AK$  и  $AB$  с использованием отражателей, установленных на штативах в точках  $E$ ,  $F$ ,  $K$  и  $B$  (таблица 3.5). Указанные действия составляют прямой ход, после чего измерения выполняются в обратном ходе. Для этого тахеометр переносится и устанавливается по створу в точке  $B$  с последующим измерением расстояний  $BK$ ,  $BF$ ,  $BE$ ,  $BD$ ,  $BC$  и  $BA$ .

Таблица 3.5 – Результаты поверки тахеометра в лабораторных условиях с двух  $A$  и  $B$  станций (стационарная установка штативов)

$S$	ТМ30 (средние значения из 15 измерений, мм)		GeoMax (средние значения из 15 измерений, мм)		Разности, мм		Среднее значение разностей, мм $\Delta_3$
	штатив в точке $A$	штатив в точке $B$	штатив в точке $A$	штатив в точке $B$	$\Delta_1=A-A$	$\Delta_2=B-B$	
$AC$ ( $BK$ )	8246,2	4416,1	8246,8	4416,8	-0,6	-0,7	-0,6
$AD$ ( $BF$ )	28482,8	31886,1	28483,3	31886,7	-0,5	-0,6	-0,6
$AE$ ( $BE$ )	49356,6	49186,6	49357,2	49187,4	-0,6	-0,8	-0,7
$AF$ ( $BD$ )	66657,0	70060,8	66657,5	70061,4	-0,5	-0,6	-0,6
$AK$ ( $BC$ )	94127,6	90297,0	94128,4	90297,7	-0,8	-0,7	-0,8
$AB$ ( $BA$ )	98543,7	98543,4	98544,4	98544,2	-0,7	-0,8	-0,8

При выполнении измерений с точки  $B$  отражатель поворачивается на  $180^\circ$ , что в общем случае может привести к изменению длин расстояний из-за смещения отражающих плоскостей призмы относительно вертикальной оси отражателя. Но так как величина этого смещения будет одинакова для всех расстояний, то полученные результаты не будутотягощены данным фактором.

По окончании измерений приступают к обработке полученных результатов измерений. Для этого вычисляются:

- величины СКО измерений в каждой серии для всех линий, измеренных эталонным и поверяемым тахеометрами, вычисленные по формуле Бесселя;
- величины СКО измерений также в каждой серии для всех значений длин линий, вычисленные по формуле Гаусса;
- разности  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  средних значений длин линий, измеренных эталонным и поверяемым тахеометрами;
- среднее значение  $\Delta_3$  разности длин каждой линии.

Применительно к нашим результатам СКО измерений, вычисленная по формуле Бесселя, для тахеометра ТМ30 оказалась равной 0,58 мм, а для GeoMax, вычисленные по формулам Бесселя и Гаусса, соответственно, 0,76 и 0,62 мм.

При реализации схемы с использованием одного штатива с отражателем путем установки его в произвольно выбранных точках  $A, C, D, E, F, K$  и  $B$  измерения выполняются тахеометрами с установкой их только в точках  $A$  и  $B$ . Для этого эталонный тахеометр устанавливается в точке  $A$ , штатив с отражателем в точке  $C$  и производятся измерения не менее чем тремя сериями (таблица 3.6). Затем эталонный тахеометр аккуратно вынимается из трегера, на его место устанавливается поверяемый тахеометр, и измерения повторяются. После этого штатив с отражателем переносится и устанавливается в произвольно выбранную точку  $D$ , затем в  $E$  и т. д. в точку  $B$ , где и производятся аналогичные измерения эталонным и поверяемым тахеометрами. По окончании измерений тахеометр с точки  $A$  переносится и устанавливается в точке  $B$ , и измерения продолжаются с установкой штатива с отражателем в произвольно выбранных точках  $K, F, E, D, C$  и  $A$ .

Так как штатив с отражателем в прямом и обратном ходах устанавливается произвольно, то будут отсутствовать стационарные эталонные отрезки.

Таблица 3.6 – Результаты поверки тахеометра в лабораторных условиях с двух *A* и *B* станций (произвольная установка отражателя)

<i>S</i>	TM30 (средние значения из 15 измерений, мм)		GeoMax (средние значения из 15 измерений, мм)		Разности, мм	
	штатив в точке <i>A</i>	штатив в точке <i>B</i>	штатив в точке <i>A</i>	штатив в точке <i>B</i>	$\Delta_1=A-A$	$\Delta_2=B-B$
AC (BK)	7846,3	4247,3	7846,8	4247,8	-0,5	-0,5
AD (BF)	28245,2	32012,3	28245,7	32012,9	-0,5	-0,6
AE (BE)	49411,5	49542,0	49411,9	49542,7	-0,4	-0,7
AF (BD)	67157,0	70111,8	67157,6	70112,5	-0,6	-0,7
AK (BC)	94338,4	90405,1	94338,8	90405,7	-0,4	-0,6
AB (BA)	98410,7	98390,2	98411,5	98390,8	-0,8	-0,6

По окончании измерений вычисляются:

- величины СКО измерений в каждой серии для всех линий, измеренных эталонным и поверяемым тахеометрами, вычисленные по формуле Бесселя и Гаусса;
- разности  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  средних значений длин линий, измеренных эталонным и поверяемым тахеометрами.

Преимущество данной схемы перед первой состоит в использовании только одного штатива с отражателем, а недостаток – в отсутствии контроля результатов из прямого и обратного ходов.

Следует отметить, что при реализации данного способа поверки измерения расстояний эталонным и поверяемым тахеометрами в точках *A* и *B* производятся с определенным интервалом во времени, что приводит к некоторому изменению метеоусловий. Но так как этот интервал времени между измерениями тахеометрами не превышает в среднем 5–7 минут, то изменение метеоусловий будет незначительным, его влияние на результаты измерений также будет незначительным.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе на основании теоретических исследований и практической апробации решена научно-техническая задача по совершенствованию методик определения деформационного состояния инженерных сооружений башенного типа атомных и тепловых электростанций, а также применяемого на них технологического оборудования. В ходе диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

– выполнен анализ существующих способов, методик, средств и нормативной литературы по выполнению инженерно-геодезических измерений, предназначенных для определения деформационного состояния инженерных сооружений башенного типа, который показал, что в настоящее время применяемые методики не в полной мере отражают возможности современных геодезических приборов и БАС в части получения требуемой точности измерений с гораздо меньшими трудовыми затратами;

– на основе применения БАС разработана методика определения крена инженерных сооружений башенного типа, на которую получен патент РФ, позволяющая в стесненных условиях промплощадки выполнять геодезические измерения с сохранением требуемой точности;

– на основе использования результатов высокоточного геометрического нивелирования предложена технологическая схема визуализации тепловых деформаций фундамента турбоагрегата в зависимости от режима его работы, позволяющая определять характер и величину изменений значений центровок роторов валопровода;

– усовершенствована технологическая операция поверки тахеометра, основанная на методе сличения без использования эталонного линейного базиса, с применением в качестве эталона высокоточного тахеометра, которая позволяет в условиях промплощадки производить поверку при различных расстояниях и внешних условиях;

– поставленные задачи исследований решены в полном объеме, разработанная методика определения деформационного состояния инженерных сооружений башенного типа и предложенная технологическая схема отображения тепловых деформаций фундаментов турбоагрегатов в 3D-формате, а также технологическая операция поверки тахеометра апробированы и рекомендованы к использованию в геодезическом производстве, результаты исследований опубликованы.

Результаты исследований рекомендованы к использованию при производстве инженерно-геодезических измерений определения крена инженерных сооружений башенного типа и деформационного состояния работающих на АЭС и ТЭС турбоагрегатов.

Перспектива дальнейших исследований заключается в разработке обобщенной технологической схемы определения деформационного состояния инженерных сооружений башенного типа и применяемого технологического оборудования, включающей в себя высокоточные инженерно-геодезические измерения и программный комплекс, который позволит выполнять паспортизацию геометрических параметров указанных сооружений и турбоагрегатов АЭС и ТЭС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Абалаков, Б. В. Монтаж паровых турбин и вспомогательного оборудования / Б. В. Абалаков, В. П. Банник, Б. И. Резников. – Москва : Энергия, 1966. – 152 с. – Текст : непосредственный.

2 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. / К. М. Антонович. – Москва : Картоцентр, 2005. – 334 с. – Текст : непосредственный.

3 Астапов, А. М. Методика создания вертикальных инженерных планов для реконструкции инженерных сооружений / А. М. Астапов, Г. А. Уставич, В. Г. Сальников. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. научн. техн. конгр., 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – С. 41–47. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-41-47.

4 Астапов, А. М. Способ определения крена дымовой трубы с помощью беспилотной авиационной системы / А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 5–15. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-5-15.

5 Асташенков, Г. Г. Геодезические работы при эксплуатации крупногабаритного промышленного оборудования / Г. Г. Асташенков. – Москва : Недра, 1986. – 150 с. – Текст : непосредственный.

6 Афонин, Д. А. Оптимизационная модель выбора схемы плановой геодезической разбивочной сети на застроенной территории / Д. А. Афонин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2011. – № 9. – С. 16–22.

7 Баширова, Д. Р. Применение мобильного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотной авиационной системы и съемки с комплексной дорожной лаборатории при эксплуатации автомобильных дорог / Д. Р. Баширова, М. Я. Брынь. – Текст : непосредственный // Транспорт: проблемы, идеи, перспек-

тивы : сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 13–15.

8 Береговой, Д. В. Методика автоматизированного создания топографического плана на основе съемки с беспилотного летательного аппарата / Д. В. Береговой, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 9. – С. 30–36.

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

10 Бронштейн, Г. С. Выявление и учет постоянной ошибки светодальномера при измерении расстояний в комбинациях / Г. С. Бронштейн, В. Н. Симонович. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1973. – № 7. – С. 17–25.

11 Бронштейн, Г. С. О методике определения постоянной поправки светодальномера / Г. С. Бронштейн. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1983. – № 6. – С. 27–29.

12 Брынь, М. Я. Сравнительная оценка эффективности мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов при съемке автомобильных дорог / М. Я. Брынь, Д. Р. Баширова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 20–27.

13 Буш, В. В. Геодезические работы при строительстве сооружений башенного типа / В. В. Буш, В. В. Калугин, А. И. Саар. – Москва : Недра, 1985. – 216 с. – Текст : непосредственный.

14 Васютинский, И. Ю. Гидронивелирование / И. Ю. Васютинский. – Москва : Недра, 1983. – 179 с. – Текст : непосредственный.

15 Визиров, Ю. В. Линейно-угловые построения в закрытой местности с использованием спутниковой геодезической аппаратуры / Ю. В. Визиров. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2020. – № 6. – С. 13–19.

16 Визиров, Ю. В. Наклонное проектирование при определении крена высокого сооружения / Ю. В. Визиров. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2006. – № 3. – С. 15–19.

17 Войтенко, А. В. Определение крена рабочей башни элеватора на основе данных спутникового позиционирования и наземных геодезических наблюдений / А. В. Войтенко. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2011. – № 12. – С. 10–15.

18 ВСН 430–82. Инструкция по возведению монолитных железобетонных труб и башенных градирен. – Москва : Стройиздат, 1983. – 84 с. – Текст : непосредственный

19 Генике, А. А. О методах метрологического контроля спутниковых координатных определений / А. А. Генике, Л. М. Бланк, В. С. Чудковский. – Текст : непосредственный. // Геодезия и картография. – 2002. – № 12. – С. 25–29.

20 Геодезические работы при монтаже и эксплуатации турбоагрегатов / Г. А. Уставич, А. Л. Малиновский, Д. А. Черепанов, К. В. Александров. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1979. – № 10. – С. 12–16.

21 Геодезическое обеспечение эксплуатации промышленных предприятий / В. Б. Жарников, Б. Н. Дьяков, Б. Н. Жуков и др. – Москва : Недра, 1992. – 160 с. – Текст : непосредственный.

22 ГКИНП (ГНТА) 17-195–99. Инструкция по проведению технологической поверки геодезических приборов. – Москва : ЦНИИГАиК, 1999. – Текст : непосредственный.

23 ГКИНП (ГНТА)-03-010–03.2004. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – Москва : ЦНИИГАиК, 2004. – 226 с. – Текст : непосредственный.

24 ГКИНП (ОНТА)-01-271–03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS : утверждено Роскартографией 13.05.2003 № 84-пр. – Москва : ЦНИИГАиК, 2003. – 182 с. – Текст : непосредственный.

25 ГКИНП (ОНТА)-02-262–02. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных

спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – Москва : ЦНИИГАиК, 2002. – 55 с. – Текст : непосредственный.

26 Горяинов, И. В. О наилучшей конфигурации обратной линейно-угловой засечки и необходимом количестве пунктов для достижения заданной точности / И. В. Горяинов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 4. – С. 41–47.

27 ГОСТ 21780–2006. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности. – Москва : Центр метрологии нормирования и стандартизации в строительстве, 2008. – Текст : непосредственный.

28 ГОСТ 24846–2012. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений : межгосударственный стандарт. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 22 с. – Текст : непосредственный.

29 ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. – Москва : Центр метрологии нормирования и стандартизации в строительстве, 2014. – Текст : непосредственный.

30 ГОСТ 58942–20. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски. – Москва : Издательство стандартов, 2020. – Текст : непосредственный.

31 ГОСТ 58943–20. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Контроль точности. – Москва : Издательство стандартов, 2020. – Текст : непосредственный.

32 ГОСТ 8.020–75. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений длины. – Москва : Издательство стандартов, 1986. – Текст : непосредственный.

33 ГОСТ 8.061–80. Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1980. – Текст : непосредственный.

34 ГОСТ 8.503–84. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне 24–75000 м. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. – 5 с. – Текст : непосредственный.

35 ГОСТ Р 51774–2001. Тахеометры электронные. Общие технические условия. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. – Текст : непосредственный.

36 ГОСТ Р ИСО 17123-5–2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Оптика и оптические приборы. Методики полевых испытаний геодезических и топографических приборов. Часть 5. Электронные тахеометры. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 14 с. – Текст : непосредственный.

37 Долгополов, Д. В. Возможности использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 85–95.

38 Дон, Э. А. Расцентровка подшипников турбоагрегатов / Э. А. Дон, В. П. Осоловский. – Москва : Энергия, 1994. – 273 с. – Текст : непосредственный.

39 Жуков, Б. Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий : монография / Б. Н. Жуков. – Новосибирск : СГГА, 2003. – 356 с. – Текст : непосредственный.

40 Жуков, Б. Н. Определение крена высоких дымовых труб методом измерения горизонтальных направлений / Б. Н. Жуков. – Текст : непосредственный // Пром. стр-во. – 1973. – № 4. – С. 35–38.

41 Зайцев, А. К. Исследование точности передачи координат и высот на монтажные горизонты построением сети обратных линейно-угловых засечек / А. К. Зайцев, И. В. Горяинов, А. А. Шевчук. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – № 3. – С. 271–276.

42 Зубов, А. В. Программный комплекс для определения кренов сооружений башенного типа по данным наземного лазерного сканирования / А. В. Зубов, Н. Н. Елисеева. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2020. – № 7. – С. 2–7.

43 Инженерно-геодезические работы при строительстве и эксплуатации тепловых электростанций. В 2 ч. : монография / Г. А. Уставич, В. Г. Сальников, Н. М. Рябова, М. Е. Рахымбердина, К. Б. Хасенов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – Текст : непосредственный.

44 Ипатов, И. И. Некоторые исследования светодальномеров 2СМ-2 / И. И. Ипатов, А. Н. Марков. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1982. – № 5.

45 Исследование влияния вибрации на точность измерений цифровыми нивелирами и электронными тахеометрами / А. Бешр. Ашраф, В. Г. Сальников, М. Е. Рахымбердина, А. Н. Теплых. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – № 3. – 2012. – С. 123–126.

46 Исследование деформации верхнего строения фундамента турбоагрегатов / Г. А. Уставич, Б. Н. Жуков, О. Л. Тыщук, А. Л. Малиновский, Г. Д. Соловьянов, Д. А. Черепанов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1978. – № 9. – С. 23–24.

47 Карлсон, А. А. О классификации точного нивелирования короткими лучами / А. А. Карлсон. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1993. – № 6. – С. 11–13.

48 Кафтан, В. И. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых наблюдений. / В. И. Кафтан, П. А. Докунин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2007. – № 9. – С. 18–21.

49 Кислый, И. М. Определение центра инженерного сооружения цилиндрической или конусообразной формы / И. М. Кислый, В. С. Сова. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1963. – № 9. – С. 29–31.

50 Комбинированный способ создания инженерно-топографических планов масштаба 1 : 500 промышленных территорий и отдельных промплощадок / Г. А. Уставич, В. А. Середович, Я. Г. Пошивайло, А. В. Середович, А. В. Иванов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2009. – № 1. – С. 31–37.



51 Комиссаров, А. В. Исследование точности определения деформаций сооружений при помощи электронного тахеометра и наземного лазерного сканера / Ашраф А. Бешр, А. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // Материалы IV Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2008», 22–24 апр. 2008 г., Новосибирск. – Новосибирск, 2008. – Т. 1, ч. 1. – С. 107–111.

52 Крылов, В. Д. Роль компараторов в обеспечении единства измерений / В. Д. Крылов, А. И. Спиридонов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2003. – № 10. – С. 46–50.

53 Кузнецов, П. Н. Геодезическое инструментоведение / П. Н. Кузнецов, И. Ю. Васютинский, Х. К. Ямбаев. – Москва : Недра, 1984. – 364 с. – Текст : непосредственный.

54 Кузнецова, А. А. Применение наземного лазерного сканирования для выявления отклонений конструкций от проектных значений / А. А. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 12. – С. 2–7.

55 Левчук, Г. П. Прикладная геодезия: Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ : учебник для вузов / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, В. Г. Конусов. – Москва : Недра, 1981. – 438 с. – Текст : непосредственный.

56 Методика института. Светодальномеры. Методы и средства поверки. – Москва : ЦНИИГАиК, 2003. – 31 с. – Текст : непосредственный.

57 Методика передачи координат тахеометром на пункты обоснования инженерного сооружения / Г. А. Уставич, Н. С. Косарев, Д. А. Баранников, И. А. Мезенцев, Д. В. Бирюков. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 142–150.

58 Методика производства инженерно-геодезических работ для создания 3D-модели архитектурных объектов / Г. А. Уставич, А. В. Иванов, А. С. Горилько, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный / Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. Научн. техн. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 49–56. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-1-49-56.

59 МИ БГЕИ 40–03. Базисы эталонные. Методы поверки. Методика института. – Москва : ЦНИИГАиК, 2003. – 6 с. – Текст : непосредственный.

60 Михелев, Д. Ш. Анализ современных методов создания крупномасштабных топографических планов застроенной территории / Д. Ш. Михелев, А. А. Лобанов. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 6. – С. 3–12.

61 Михелев, Д. Ш. Координатный метод разбивочных работ / Д. Ш. Михелев, В. А. Шлепы, Ю. Д. Михелев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – № 1. – С. 17–21.

62 Михелев, Ю. Д. О точности топографической съемки в масштабе 1 : 200 / Ю. Д. Михелев, А. А. Лобанов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 2. – С. 21–28.

63 Мустафин, М. Г. Оценка влияния линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки на точность построения модели объекта / М. Г. Мустафин, Х. М. Шокер. – Текст : непосредственный // Маркшейдерский вестник. – 2020. – № 6. – С. 42–50.

64 Найденов, Д. А. Общность способов определения кренов башенных сооружений геодезическими методами / Д. А. Найденов. – Текст : непосредственный // Геодезическое обеспечение строительства. – Москва, 1987. – С. 114–120.

65 Нестеренок, В. Ф. О точности упрощенных способов определения крена башенных сооружений / В. Ф. Нестеренок. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1977. – № 8. – С. 31–34.

66 Никитин, А. В. Геодезический контроль строительства опор мостов / А. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 70–80.

67 Никитин, А. В. Координатный способ определения радиусов кривых на автомобильных дорогах / А. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 2-2 (56). – С. 49–52.

68 Никонов, А. В. Методика тригонометрического нивелирования первого и второго разрядов / А. В. Никонов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 39–45.

69 О выборе местоположения станций лазерного трекера для установки технологического оборудования / Л. Е. Сердаков, Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2019. – № 11. – С. 22–25.

70 О геодезическом обеспечении создания комплекса «Скиф» / А. В. Полянский, В. С. Крапивин, Д. Б. Буренков, Е. С. Вонда, Л. Е. Сердаков. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 67–76.

71 Об аттестации светодальномеров, электронных тахеометров и GPS-приемников на эталонных линейных базисах / А. В. Кошелев, Г. А. Уставич, В. А. Кошелев, С. С. Титов, Ю. В. Скипа, А. А. Дубинина, Н. В. Заржецкая. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2011. – № 6. – С. 18–21.

72 Оперативный геодезический мониторинг осадок зданий в зонах проходки тоннелей Московского и Самарского метрополитенов на основе видеогидростатического нивелира / Н. А. Кузянов, И. Ю. Васютинский, С. И. Васютинская, О. В. Вшивкова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 5. – С. 32–38.

73 Определение крена и деформаций дымовых труб средствами наземного лазерного сканирования / В. А. Середович, А. В. Иванов, А. В. Середович, А. В. Усиков // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. – С. 75–78.

74 Патент № 2745635 Российская Федерация, МПК G01C 25/00 (2006.01), G01C 25/00 (2020.08). Универсальный полевой стенд для поверки геодезических приборов : № 2020111970 : заявл. 23.03.2020 : опубл. 29.03.2021 / Уставич Г. А., Косарев Н. С., Мезенцев И. А., Баранников Д. А. ; заявитель СГУГиТ. – 9 с. – Текст : непосредственный.

75 Патент № RU 2808389 C1, МПК G01C 11/18 (2006.01), B64C 39/02 (2006.01), B64U 101/32 (2023.01). Способ определения кренов дымовых труб с помощью беспилотного летательного аппарата : 2023108302 : заявл. 04.04.2023 :

опубл. 28.11.2023 : бюл. № 34 / Астапов А. М., Косарев Н. С., Уставич Г. А. – 2023. – 8 с. – Текст : непосредственный.

76 Пискунов, М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений / М. Е. Пискунов. – Москва : Недра, 1980. – 248 с. – Текст : непосредственный.

77 Пособие по производству геодезических работ в строительстве (к СНиП 3.01-03–84). – Москва : Стройиздат, 1985. – 123 с. – Текст : непосредственный.

78 Пошивайло, Я. Г. Создание топографо-информационной системы для целей проектирования инженерных сооружений в горных условиях / Я. Г. Пошивайло, А. П. Чахлова, Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2013. – № 3. – С. 17–21.

79 Применение БПЛА в качестве подвижной вехи / В. Г. Сальников, А. М. Астапов, А. Ш. Тюндешева, Д. А. Баранников. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 45–50. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-45-50.

80 Применение современных методов сбора геоданных для целей мониторинга территорий / А. А. Панютищева, Е. Д. Беркова, Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко. – Текст : непосредственный // Астраханский вестник экологического образования. – 2023. – № 6 (78). – С. 58–63.

81 Прусаков, А. Н. О современном состоянии метрологического обеспечения единства измерений при осуществлении геодезической и картографической деятельности / А. Н. Прусаков, А. И. Спиридонов. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2017. – № 6-7. – С. 28–37.

82 Радченко, Е. С. Высотное обследование дымовых труб с использованием беспилотника / Е. С. Радченко. – Текст : непосредственный // Вестник промышленности, бизнеса и финансов. – 2020. – № 6. – С. 74–76.

83 Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом / Г. А. Уставич, М. Е. Рахымбер-

дина, А. В. Никонов, С. А. Бабасов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22.

84 Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования / Г. А. Уставич, С. В. Демин, Е. Л. Шалыгина, Я. Г. Пошивайло. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2004. – № 7. – С. 6–13.

85 Разработка стационарного лабораторного стенда для поверки тахеометров / Г. А. Уставич, И. Ю. Васютинский, Д. А. Баранников, А. С. Горилько. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Том 29, № 1. – С. 45–53.

86 Разработка универсального полевого стенда для поверки геодезических приборов / Г. А. Уставич, Н. С. Косарев, И. А. Мезенцев, Д. А. Баранников, Д. В. Бирюков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 379–387.

87 Раинкин, В. Я. Определение деформаций сооружений башенного типа посредством измерения горизонтальных и вертикальных углов с одного пункта / В. Я. Раинкин. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1972. – № 3. – С. 27–33.

88 РД 68-8.17–98 Локальные поверочные схемы (ЛПС) для средств измерений (СИ) топографо-геодезического и картографического назначения. – Москва : ЦНИИГАИК, 1999. – 26 с. – Текст : непосредственный.

89 Руководство по определению кренов инженерных сооружений башенного типа геодезическими методами. – Москва : Стройиздат, 1981. – 56 с. – Текст : непосредственный.

90 Руководство по эксплуатации промышленных дымовых и вентиляционных труб. – Москва, 1993. – 103 с. – Текст : непосредственный.

91 Сальников, В. Г. Использование данных цифровых инженерно-топографических планов на территории строительной площадки / В. Г. Сальников, А. С. Горилько, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. научн. техн. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск: сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформа-

тика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 51–56. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-51-56.

92 Сальников, В. Г. Современная методика выноса главных осей турбоагрегатов. / В. Г. Сальников. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2014. – № 1 (25). – С. 27–34.

93 Сальников, В. Г. Технология геодезических работ при строительстве фундамента турбоагрегата мощностью 420 МВт / В. Г. Сальников. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшедерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 1, ч. 1. – С. 18–24.

94 Сердаков, Л. Е. Геодезическое сопровождение на этапах сборки и эксплуатации модернизируемого источника синхротронного излучения Е8ВГ / Л. Е. Сердаков, П. П. Мурзинцев, Д. Мартин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 11. – С. 2–8.

95 СНиП 3.01.03–84. Геодезические работы в строительстве. – Москва : ГП ЦПП, 1995. – 28 с. – Текст : непосредственный.

96 СО 153-34.21.322–2003. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадками фундаментов и деформациями зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – Москва : Орггрэс, 2005. – 61 с.– Текст : непосредственный.

97 Совершенствование методики метрологической аттестации тахеометров и светодальномеров / Г. А. Уставич, Н. С. Косарев, Д. А. Баранников, И. А. Мезенцев, Д. В. Бирюков. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Том 26, № 4. – С. 146–159. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-4-146-159.

98 Совершенствование методики поверки тахеометров методом сличения без компаратора / Г. А. Уставич, И. Ю. Васютинский, Д. А. Баранников, А. С. Горилько, А. М. Астапов, И. А. Мезенцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 17–30. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-17-30.

99 Создание геодезической основы для строительства объектов энергетики / Г. А. Уставич, Г. Г. Китаев, А. В. Никонов, В. Г. Сальников. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 48–54.

100 Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В. А. Вальков, К. П. Виноградов, Е. О. Валькова, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2022. – № 11. – С. 40–49.

101 Соловицкий, А. Н. Геоинформационное обеспечение проектирования геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 333–339.

102 Соловицкий, А. Н. Геоинформационное обеспечение проектирования геодезического мониторинга деформаций земной коры в Кузбассе / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». Международная научная конференция «Высокие технологии и инновации в науке» ; Всероссийская научно-практическая конференция «Национальная безопасность России: актуальные аспекты». – 2019. – С. 44–50.

103 Соустин, В. Н. О методах определения радиуса и координат центра сооружений, имеющих в плане форму круга / В. Н. Соустин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1970. – № 12. – С. 40–43.

104 СП 126.13330.2012. Геодезические работы в строительстве Актуализированная редакция СНиП 3.01.03–84. – Москва : Минрегион России, 2012. – 79 с. – Текст : непосредственный.

105 СП 126.13330.2017. Свод правил. Геодезические работы в строительстве / Утв. и введен в действие приказом Минстроя России от 24.10.2017 № 1469/пр. – Москва : Минстрой России, 2017. – 67 с. – Текст : непосредственный.

106 СП 13-101–99. Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб. – Москва : Госстрой России, 1999. – 22 с. – Текст : непосредственный.

107 СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – Москва : Минстрой России, 2017. – 79 с. – Текст : непосредственный.

108 СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02–96. – URL: <https://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

109 СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-67. – URL: <https://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

110 Спиридонов, А. И. Основы геодезической метрологии. – Москва : Картогеоцентр – Геодезиздат, 2003. – 247 с. – Текст : непосредственный.

111 Сравнение способов создания обоснования на промплощадке / А. С. Горилько, М. А. Минаева, Н. М. Рябова, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. научн. техн. конгр., 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – С. 60–64. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-60-64.

112 СТО СРО-Г6054295400007–2020. Геодезический мониторинг. Наблюдение за осадками и кренами зданий и сооружений. – Москва : Союзатомгео, 2020. – 160 с. – Текст : непосредственный.

113 СТО-02570823-19–05. Базисы линейные эталонные. Общие технические требования. – Москва : ЦНИИГАиК, 2005. – 42 с. – Текст : непосредственный.

114 Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры / Е. И. Аврунев, Г. А. Уставич, А. О. Грекова, А. В. Никонов, В. А. Мелкий, Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 7. – С. 188–201.



115 Тревого, И. С. Об эталонировании малых светодальномеров / И. С. Тревого, Я. М. Костецкая. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1980. – № 2. – С. 37–41.

116 Тревого, И. С. Об эталонировании топографических светодальномеров / И. С. Тревого. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1987. – № 1. – С. 20–24.

117 Уставич, Г. А. Влияние внешних факторов при наблюдениях за оборудованием / Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1979. – № 5. – С. 31–33.

118 Уставич, Г. А. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации крупных энергетических объектов / Г. А. Уставич, Г. Д. Костина. – Москва : Недра, 1983. – 130 с. – Текст : непосредственный.

119 Уставич, Г. А. К вопросу создания эталонных базисов для аттестации спутниковой аппаратуры и светодальномеров / Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1999. – № 9. – С. 7–14.

120 Уставич, Г. А. Определение деформаций турбоагрегатов АЭС методом створных измерений / Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1979. – № 6. – С. 18–22.

121 Уставич, Г. А. Определение крена сооружений башенного типа GPS-приемниками и тахеометрами / Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2003. – № 9. – С. 15–18.

122 Уставич, Г. А. Опыт работы с авторедукционными нивелирами в условиях вибрации / Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1974. – № 11. – С. 23–24.

123 Уставич, Г. А. Разработка технологической схемы создания вертикальных топографических планов / Г. А. Уставич, Т. А. Хлебникова, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. научн. техн. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 57–63. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-57-63.

124 Уставич, Г. А. Технологическая схема геодезических работ при монтаже турбоагрегатов / Г. А. Уставич, В. Г. Сальников, Н. М. Рябова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 45–51.

125 Хлебникова, Т. А. Разработка методики создания цифровых инженерно-топографических планов с использованием материалов съемки беспилотной авиационной системы на малых высотах / Т. А. Хлебникова, А. С. Горилько, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. научн. техн. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 57–64. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-1-57-64.

126 Чахлова, А. П. Вертикальные топографические планы / А. П. Чахлова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА, 2014. – С. 116–120.

127 Шевченко, Г. Г. Геодезический мониторинг зданий и сооружений : монография // Г. Г. Шевченко, М. Я. Брынь, Д. А. Гура. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2022. – 199 с. – Текст : непосредственный.

128 Шеховцов, Г. А. Способы контроля пространственного положения сооружений башенного типа треугольной формы : монография / Г. А. Шеховцов, В. Н. Мамонов. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2008. – 52 с.

129 Ямбаев, Х. К. Геодезическое инструментоведение / Х. К. Ямбаев. – Москва : Академический проект, 2011. – 585 с. – Текст : непосредственный.

130 Ямбаев, Х. К. О возможности использования спутниковых GPS/ГЛОНАСС измерений для контроля вертикальности при возведении высотных сооружений / Х. К. Ямбаев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 4. – С. 36–40.

131 A set of standards for support of the uniformity of measurements of length in the range above 24 m: current state and prospects for further development /

A. N. Shchipunov, V. M. Tatarenkov, O. V. Denisenko, I. S. Sil'vestrov, V. N. Fedotov, M. Yu. Vasil'ev, D. A. Sokolov. – Текст : непосредственный // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 57, № 11. – P. 1228–1232.

132 Golygin, N. K. Metrological support for opto-electronic coordinate measurements / N. K. Golygin, V. A. Khizhnyakov, V. G. Lysenko. – Текст : непосредственный // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 59, № 10. – P. 1073–1077.

133 Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurement / A. P. Karpik, N. S. Kosarev, K. M. Antonovich, I. G. Ganagina, V. Yu. Timofeev. – Текст : непосредственный // Geodesy and Cartography. – 2018. – Vol. 44, № 4. – P. 140–145.