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

На правах рукописи

Горилько Александр Сергеевич

Разработка методики выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений на техногенных геодинамических полигонах особо опасных и технически сложных инженерных сооружений

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Уставич Георгий Афанасьевич

Новосибирск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ВЫПОЛНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ 10

1.1 Виды инженерных сооружений и требования к точности их возведения 10

1.2 Виды инженерно-геодезических работ, выполняемых на промплощадках инженерных сооружений 17

1.3 Анализ способов создания высотной сети на промплощадках 19

1.4 Анализ нормативных документов для создания плановой основы на промплощадках 27

1.5 Обоснование постановки задач исследований 31

2 РАЗРАБОТКА СХЕМ СОЗДАНИЯ ПЛАНОВОГО ОБОСНОВАНИЯ И МЕТОДИКИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ 34

2.1 Краткая характеристика особо опасных и технически сложных инженерных сооружений 34

2.2 Состав основных инженерно-геодезических работ, выполняемых на промплощадках особо опасных и технически сложных инженерных сооружений 43

2.3 Анализ способов и схем создания планового обоснования на промплощадках АЭС линейно-угловыми построениями 50

2.4 Разработка технологической схемы создания планово-высотного обоснования на ТГП объектов атомной промышленности 64

2.5 Разработка методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений при создании плановой деформационной сети на техногенном геодинамическом полигоне АЭС 72

2.6 Исследование точности измерения расстояний в условиях тумана 86

2.7 Совершенствование схем метрологической поверки тахеометров методом сличения 95

2.8 Исследование стабильности положения пунктов обоснования при их закреплении на разных горизонтах инженерных сооружений 103

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОТНОГО ОБОСНОВАНИЯ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ 110

3.1 Анализ методики выполнения высокоточного геометрического нивелирования на объектах атомной промышленности 110

3.2 Особенности методики выполнения высокоточного геометрического нивелирования I и II класса цифровыми нивелирами 119

3.3 Влияние перемещения системы «штатив – цифровой нивелир» на измеряемое превышение 125

3.4 Совершенствование методики выполнения высокоточного нивелирования I класса на ТГП с применением одной линии нивелирного хода 130

3.5 Общий подход к составлению методик и программ наблюдений для определения деформационного состояния особо опасных инженерных сооружений АЭС 142

3.6 Методика определения деформационного состояния особо опасного инженерного сооружения в горизонтальной плоскости 144

3.7 Методика определения деформационного состояния особо опасного инженерного сооружения АЭС в вертикальной плоскости..... 151

3.8 Обоснование цикличности выполнения высокоточного нивелирования на техногенных геодинамических полигонах АЭС..... 159

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 164

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Возведение промышленных и гражданских зданий и сооружений требует проведения соответствующих инженерно-геодезических работ на всех этапах производства комплекса строительно-монтажных работ. От их своевременного и качественного выполнения в значительной степени зависят сроки проведения работ, следовательно, и долговечность эксплуатации инженерных сооружений, включая особо опасные и технически сложные, к которым относятся ускорители заряженных частиц, атомные и гидроэлектростанции (АЭС и ГЭС и др.) Для обеспечения безопасного строительства и эксплуатации подобных инженерных сооружений на их промышленных площадках создаются техногенные геодинамические полигоны (ТГП).

Согласно существующей нормативно-технической документации, к обеспечению необходимой точности выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений предъявляются повышенные требования как на стадии строительства, так и эксплуатации таких инженерных сооружений.

К настоящему времени в технической литературе и нормативных документах достаточно хорошо освещены вопросы производства высокоточных инженерно-геодезических измерений на промышленных площадках различных сооружений. Однако, особенно в условиях сейсмической активности территории и обеспечения единого координатного пространства для последующего деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, требуется проведение дальнейших исследований, заключающихся в разработке и исследовании новых схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, метрологической аттестации средств измерений и изучении влияния различных неблагоприятных природных факторов при производстве геодезических работ.

Степень разработанности темы. Разработкой и совершенствованием методик и технологических схем выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений для геодезического обеспечения процесса строительства и эксплуатации инженерных сооружений различного назначения, а также метрологической поверки

применяемых геодезических средств измерений занимались такие ученые, как Асташенков Г. Г., Брайт П. И., Бронштейн Г. С., Брынь М. Я., Буюкян С. П., Васютинский И. Ю., Ганьшин В. Н., Генике А. А., Жуков Б. Н., Зайцев А. К., Карлсон А. А., Карпик А. П., Кафтан В. И., Клюшин Е. Б., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Михелев Д. Ш., Мустафин М. Г., Новак В. Е., Ознамец В. В., Пискунов М. Е., Рязанцев Г. Е., Сердаков Л. Е., Соловицкий А. Н., Спиридонов А. И., Столбов Ю. В., Сучков О. П., Уставич Г. А., Федосеев Ю. Е., Хорошилов В. С., Шоломицкий А. А., Шторм В. В., Ямбаев Х. К. и многие другие.

Целью исследований является разработка методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений для создания ТГП и обеспечения единого координатного пространства для выполнения деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений атомной промышленности.

Основные задачи исследований:

– выполнить информационно-аналитический обзор существующих методов, средств и технологических схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, применяемых для определения деформационного состояния инженерных сооружений при их строительстве и эксплуатации;

– на основании современного уровня развития геодезического измерительного оборудования предложить методику производства высокоточных инженерно-геодезических измерений и выполнить исследования различных вариантов построения ТГП на территории АЭС и обеспечения единого координатного пространства для последующего проведения деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружениях атомной промышленности;

– выполнить исследование влияния неблагоприятных погодных условий (тумана) на точность производства высокоточных инженерно-геодезических измерений;

– разработать схему выполнения метрологической поверки электронных тахеометров непосредственно на промышленной площадке АЭС без применения эталонных линейных базисов;

– для проведения деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, расположенных на территории АЭС, предложить и выполнить исследование различных схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений с установлением их совмещенной цикличности измерений при создании ТГП;

– выполнить апробацию разработанной методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений при построении ТГП и определении деформационного состояния особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, расположенных на территории АЭС.

Объектом исследования является геодезическое обеспечение строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе атомных электростанций, а также метрологическое обеспечение геодезических средств измерений.

Предметом исследования является разработка методики выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений при создании ТГП и обеспечении единого координатного пространства при проведении деформационного мониторинга земной поверхности и особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, расположенных на территории АЭС в процессе их строительства и эксплуатации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработана методика производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, позволяющая построить ТГП и обеспечить единое координатное пространство для проведения деформационного мониторинга земной поверхности промышленной площадки АЭС и расположенных на ней особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, включая реакторное отделение;

– выполнено исследование влияния внешних негативных факторов (тумана) на точность результатов линейных измерений сторон ТГП электронными тахеометрами и определены области погодных условий их применения;

– для повышения точности и надежности измерения расстояний электронными тахеометрами разработана схема их метрологической поверки непосредственно на промышленной площадке АЭС методом сличения без использования эталонных линейных базисов.

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании повышения точности выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений при построении ТГП и обеспечении единого координатного пространства для проведения деформационного мониторинга земной поверхности промышленной площадки АЭС и расположенных на ней особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, включая реакторное отделение.

Практическая значимость работы заключается в возможности соответствующим структурным подразделениям использовать разработанную методику для проведения деформационного мониторинга технически сложных и особо опасных инженерных сооружений и при необходимости своевременно производить профилактические мероприятия по обеспечению их безопасной эксплуатации.

Методология и методы исследования заключаются в использовании теории математической обработки результатов геодезических измерений. Для обработки результатов измерений использовалось программное обеспечение КРЕДО ГНСС и КРЕДО ДАТ.

Положения, выносимые на защиту:

– разработанная методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений позволяет с заданной нормативной точностью построить ТГП и в едином координатном пространстве выполнить деформационный мониторинг земной поверхности, а также расположенных на промышленной площадке АЭС особо опасных и технически сложных инженерных сооружений при их строительстве и эксплуатации;

– результаты экспериментальных исследований влияния неблагоприятных погодных условий позволяют без снижения точности установить области выполнения линейных измерений электронными тахеометрами в соответствии с предложенной классификацией плотности тумана;

– предложенная схема метрологической поверки методом сличения без использования эталонных линейных базисов позволяет непосредственно на промышленной площадке АЭС выполнять метрологическую поверку электронных тахеометров.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим 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. Основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в 2018–2025 гг.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 8 научных статьях, 3 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 182 страницы машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, включающего 136 наименований, содержит 50 таблиц и 40 рисунков.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ВЫПОЛНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Виды инженерных сооружений и требования к точности их возведения

Все возводимые строительные объекты подразделяются на две основные группы: здания и инженерные сооружения. При этом различают объекты промышленного, гражданского, сельскохозяйственного и транспортного строительства, а именно:

– промышленные (комбинаты, заводы, фабрики);

– энергетические объекты (тепловые и атомные электростанции, теплоэлектроцентрали;

– гидротехнические (плотины ГЭС, каналы и т. д.);

– транспортные (железные и автомобильные дороги, мосты, аэропорты);

– жилищно-гражданские (жилые, общественные и административные здания);

– объекты инженерной инфраструктуры (водоснабжение, канализация, теплоснабжение, линии электропередач и связи и др.);

– прецизионные и уникальные (ускорители заряженных частиц, солнечные печи, высотные телебашни и т. д.);

– сельскохозяйственные (элеваторы, фермы, силосные башни).

Здания предназначены для проживания или пребывания в нем людей с целью выполнения различных производственных работ, которые бывают одноэтажные и многоэтажные.

Инженерные сооружения характеризуются следующими основными параметрами:

– функциональным назначением;

– размером (габаритами);

– геометрической формой;

– сложностью (ответственностью);

– точностью взаимного расположения элементов строительных конструкций;

– местом возведения.

Все указанные параметры влияют на технологию производства инженерно-геодезических работ. Особенно это касается точности выполнения измерений с целью обеспечения требуемого взаимного расположения строительных конструкций. В связи с этим инженерные сооружения по точности взаимного расположения строительных конструкций принято подразделять на следующие:

– прецизионные (отклонение элементов строительных конструкций от их проектных значений взаимного расположения находится в пределах от 0,2 до 1,0 мм);

– повышенной точности (отклонение элементов строительных конструкций от их проектных значений взаимного расположения находится в пределах от 1,0 до 10,0 мм);

– технической точности (отклонение элементов строительных конструкций от их проектных значений взаимного расположения находится в пределах от 10,0 мм и более).

По уровню ответственности здания и инженерные сооружения согласно требованиям нормативного документа [28] подразделяются на четыре класса:

– особо высокий уровень (γ =1,2);

– высокий уровень (γ =1,1);

– нормальный уровень (γ = 1,0);

– пониженный уровень (γ =0,8).

Коэффициент γ учитывает возможные неблагоприятные отклонения расчетной схемы инженерного сооружения от фактических условий его эксплуатации.

При возведении зданий и инженерных сооружений основными этапами являются:

– изготовление строительных конструкций;

– разбивка места их расположения в пространстве (на промплощадке);

– монтаж строительных конструкций.

Если на всех этапах будут соблюдаться требования нормативных документов, то будет обеспечена собираемость отдельных строительных конструкций возводи-

мого инженерного сооружения в единое целое. Применительно к инженерно-геодезическим измерениям это этап разбивки места расположения на промплощадке строительных конструкций, а также контроль их установки в проектное положение [24, 27, 29, 111].

Собираемость строительных конструкций в единое целое с требуемой точностью достигается системой обеспечения геометрических параметров (технологического допуска) в строительстве. Значения технологических допусков в миллиметрах вычисляются по формуле [26, 29, 30]

$$\Delta x = iK, \tag{1.1}$$

где i – единица допуска, которая определяется в зависимости от значения нормируемого геометрического параметра;

K – коэффициент точности, устанавливающий число единиц допуска для данного класса точности возводимого инженерного сооружения.

Класс точности возводимого инженерного сооружения устанавливается на стадии его проектирования.

Формулы для вычисления i приведены 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 α
Изготовление	Допуск линейного размера	$i = \alpha_i \left(0{,}8 + 0{,}001\sqrt{L}\right) \times$	1,0
	Допуск прямолинейности	$\times \left(\sqrt[3]{L+25} + 0{,}01\sqrt[3]{L^2}\right),$	1,0
	Допуск плоскостности	где L, мм	1,0
	Допуск перпендикулярности		0,6
	Допуск равенства диагоналей		1,0

Окончание таблицы 1.1

Характеристика технологического процесса или операции	Вид допуска геометрического параметра	Формула для вычисления, мм	Значение α
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	$i = \alpha_i \left(0,8 + 0,001\sqrt{L}\right) \times$	1,6
	Допуск симметричности установки	$\times\left(\sqrt[3]{L+25} + 0,01\sqrt[3]{L^2}\right)$, где L, мм	0,6

Применительно к разбивочным работам допуски на выполнение работ в плане и по высоте приведены в таблицах 1.2 и 1.3.

Для указанных допусков предельная ошибка выполнения инженерно-геодезических измерений вычисляется по формуле [29, 30]

$$m_{\text{пред}} < 0,4\Delta x, \tag{1.2}$$

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

Δx – допуск на отклонение контролируемого параметра.

Если принять коэффициент перехода к СКО равным 2,5, то будем иметь

$$m_1 < 0,16\Delta x. \tag{1.3}$$

Часто также используется формула [100]

$$m_2 < 0,2\delta, \tag{1.4}$$

где m – СКО инженерно-геодезических измерений;

δ – допустимое отклонение контролируемого параметра.

Таблица 1.2 – Допуски разбивки точек и осей в плане согласно ГОСТ 58942-20, мм

Интервал номинального размера *L*	Значение допуска для класса точности					
	1	2	3	4	5	6
До 2500	0,6	1,0	1,6	2,4	4	6
Св. 2500 до 4000	1,0	1,6	2,4	4,0	6	10
“ 4000 “ 8000	1,6	2,4	4,0	6,0	10	16
“ 8000 “ 16000	2,4	4,0	6,0	10,0	16	24
“ 16000 “ 25000	4,0	6,0	10,0	16,0	24	40
“ 25000 “ 40000	6,0	10,0	16,0	24,0	40	60
“ 40000 “ 60000	10,0	16,0	24,0	40,0	60	100
“ 60000 “ 100000	16,0	24,0	40,0	60,0	100	160
“ 100000 “ 160000	24,0	40,0	60,0	100,0	160	-
Значения К	0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Таблица 1.3 – Допуски разбивки и передачи высотных отметок согласно ГОСТ 58942-20, мм

Интервал номинального размера		Значение допуска для класса точности					
H	*L*	1	2	3	4	5	6
До 2500	До 8000	-	0,6	1,0	1,6	2,4	4
Св. 2500 до 4000	Св. 8000 до 16000	0,6	1,0	1,6	2,4	4,0	6
“4000“ 8000	“16000“ 25000	1,0	1,6	2,4	4,0	6,0	10
“8000“ 16000	“25000“ 40000	1,6	2,4	4,0	6,0	10,0	16
“16000“ 25000	“40000“ 60000	2,4	4,0	6,0	10,0	16,0	24
“25000“ 40000	“60000“ 100000	4,0	6,0	10,0	16,0	24,0	40
“40000“ 60000	“100000“ 160000	6,0	10,0	16,0	24,0	40,0	60
“60000“ 100000	-	10,0	16,0	24,0	40,0	60,0	100
“100000“ 160000	-	16,0	24,0	40,0	60,0	100,0	160
Значения К		0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Выполним расчет величины допуска Δx и величины СКО измерений с использованием формул (1.1), (1.2) и (1.4) для случая производства инженерно-геодезических работ на промплощадке атомной электростанции, главный корпус которой требует выполнения измерений второго класса точности.

Примем расстояние между осями турбинного отделения равным 45,0 м. Тогда для планового положения будем иметь при К = 0,4 (см. таблицу 1.2)

$$\Delta x = iK = 1{,}0 \times 45{,}0 \times 0{,}4 = 18{,}0 \text{ мм}.$$

Следовательно, согласно формулам (2.3) и (2.4) будем иметь, соответственно,

$$m_1 < 0{,}16\Delta x = 2{,}9 \text{ мм} \qquad (1.5)$$

и

$$m_2 < 0{,}2\delta = 1{,}8 \text{ мм}. \qquad (1.6)$$

Если сравнивать результаты вычислений по формулам (1.5) и (1.6), то можно сделать следующее заключение. В условиях промплощадки обеспечить СКО 1,8 мм для расстояния между осями 45,0 м, да еще при значительном влиянии внешних условий (дождь, снег, температура воздуха, состояние грунта, на который устанавливается штатив с тахеометром) представляется сложной задачей, даже не учитывая ошибки исходных данных (ошибки взаимного расположения исходных пунктов обоснования). Если, согласно требованиям [100], принимать для расчетов СКО величину предельной ошибки взаимного планового положения смежных пунктов разбивочной основы, равную $m_{\text{пред}}$ =50,0 мм, то будем иметь, соответственно, m_1 = 8,0 мм и m_2 = 5,0 мм даже без учета значений, приведенных в (1,5) и (1,6).

В то же время, согласно таблице 7.1 указанного нормативного документа, предельная ошибка взаимного расположения выносимых в натуру габаритных осей не должна превышать 5,0 мм. В этом случае СКО измерений должна быть равна 1,5–2,0 мм (но не 8,0 или 5,0 мм).

Для передачи высотных отметок будем иметь при H = 25,0 м

$$\Delta x = iK = \alpha \times 25{,}0 \times 0{,}4 = 0{,}25 \times 25{,}0 \times 0{,}4 = 2{,}5 \text{ мм}.$$

Тогда также согласно формулам (1.3) и (1.4) будем иметь

$$m_1 < 0{,}16\Delta x = 0{,}4 \text{ мм} \tag{1.7}$$

и

$$m_2 < 0{,}2\delta = 0{,}25 \text{ мм}. \tag{1.8}$$

Также обеспечить СКО передачи отметки на монтажный горизонт, равную 0,25 мм, с использованием формулы (1,4) можно только высокоточным геометрическим нивелированием.

Выполненный расчет необходимой точности инженерно-геодезических измерений для целей разбивки осей инженерных сооружений в плане и по высоте показывает, что:

– требуемая расчетная величина СКО измерений зависит от используемых формул и отличается на 40–50 % друг от друга;

– современные геодезические приборы позволяют обеспечить необходимую точность измерений разными методами, например, в высотном отношении геометрическим и тригонометрическим нивелированием короткими лучами;

– необходимая точность измерений может уверенно обеспечиваться увеличением длин измеряемых расстояний или длин плеч.

При выполнении расчета можно принимать следующее:

– указанное влияние внешних условий практически отсутствует (измерения выполняются при благоприятных внешних условиях);

– измерения выполняются при неблагоприятных внешних условиях.

Необходимо отметить, что в целом ряде случаев при строительстве уникальных и особо опасных, а также технически сложных инженерных сооружений расчет требуемой точности производства инженерно-геодезических измерений выполняет заказчик (проектировщик), исходя из конструктивных особенностей данного сооружения.

Приведенные выше допуски и точность выполнения инженерно-геодезических измерений в значительной степени справедливы и при ведении деформационного мониторинга зданий и инженерных сооружений.

С целью обеспечения надежности получаемых результатов геодезических измерений будем предполагать, что измерения могут выполняться как при благоприятных внешних условиях, так и при значительном влиянии этих условий.

1.2 Виды инженерно-геодезических работ, выполняемых на промплощадках инженерных сооружений

При изыскании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений производятся соответствующие виды инженерно-геодезических работ, к которым относятся [1, 41, 53, 62, 73, 91, 92, 97, 114, 126, 128, 132]:

– производство инженерно-геодезических изысканий и топографических съемок масштабов 1 : 5 000 и 1 : 2 000 для выбора размещения промплощадки под строительство инженерного сооружения;

– создание планово-высотного обоснования на выбранной промплощадке и его дальнейшее сгущение (на этапе возведения сооружения);

– производство топографических съемок масштабов 1 : 1 000 и 1 : 500 (в зависимости от вида инженерного сооружения);

– производство разбивочных работ;

– выполнение инженерно-геодезических измерений различной точности и назначения на стадии строительства инженерного сооружения и монтажа применяемого технологического оборудования;

– ведение деформационного мониторинга состояния инженерного сооружения и технологического оборудования с созданием геодинамических полигонов (для промплощадок уникальных, а также особо опасных и технически сложных инженерных сооружений);

– выполнение инженерно-геодезических работ при реконструкции инженерного сооружения или замене технологического оборудования.

С учетом уровня ответственности инженерного сооружения некоторые виды инженерно-геодезических работ не выставляются на торги и они производятся специализированными организациями, а полученные результаты измерений более тщательно контролируются заказчиком.

Как правило, к таким работам относятся:

– создание геодинамических полигонов на промплощадках АЭС;

– создание высокоточной планово-высотного обоснования на промплощадках и локального высокоточного обоснования, например, для строительства реакторного отделения ВВЭР или ускорителя заряженных частиц;

– ведение деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений и применяемого на них технологического оборудования.

С целью обеспечения необходимой точности измерений в этих случаях также повышаются требования к метрологическому обеспечению применяемых геодезических приборов.

Для каждого вида выполняемых инженерно-геодезических работ обязательным требованием является выполнение точности измерений с учетом технологических допусков, указанных в соответствующих нормативных документах. При ведении деформационного мониторинга дополнительным требованием является соблюдение цикличности выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений.

Выполнение измерений на промплощадке производится как в общегосударственной системе координат, так и в условной системе. При этом инженерно-геодезические измерения, выполняемые в условной системе координат (системе координат промплощадки), как правило, производятся в несколько раз точнее, особенно при монтаже технологического оборудования и ведении деформационного мониторинга.

Необходимо отметить, что, как будет показано ниже, в настоящее время целый ряд инженерно-геодезических работ не регламентируются имеющимися и выпущенными ранее нормативными документами, так как постановлением Правительства РФ от 11.09. 2019 года № ДМ-П36-7717 (п.2939) наряду с другими нормативными документами (ГОСТ и СНиП) были отменены. Это привело к частичной утрате общих требований к технологии выполнения измерений, точности и надежности выполнения различных видов инженерно-геодезических работ, к которым

относятся, например, способы создания планово-высотного обоснования, производство топографических съемок различных масштабов и назначения, методик выполнения государственного нивелирования I, II, III и IV классов нивелирами с визуальным отсчитыванием. Необходимо отметить, что применительно к выполнению нивелирования указанных классов, а также нивелирования на геодинамических полигонах и промплощадках цифровыми нивелирами нормативный документ (методические указания, инструкция или руководство) вообще не разрабатывался. Также отсутствует нормативный документ по требованиям при выполнении тригонометрического нивелирования III и IV классов даже на промплощадках. Вместе с тем тригонометрическое нивелирование III и IV классов может применяться при сгущении высотного обоснования для целей производства строительных работ (земляные и бетонные работы) и выполнения топографических съемок.

С учетом сказанного рассмотрим ниже ряд вопросов производства инженерно-геодезических работ на промплощадке площадного инженерного сооружения. При этом необходимо учитывать ответственность проектируемого инженерного сооружения, в нашем случае особо опасного и технически сложного инженерного сооружения.

1.3 Анализ способов создания высотной сети на промплощадках

Создание высотного обоснования на промплощадке особо опасных и технически сложных инженерных сооружений производится с целью обеспечения:

– строительных и монтажных работ;

– ведения деформационного мониторинга инженерных сооружений и применяемого технологического оборудования;

– ведения мониторинга земной поверхности на геодинамическом полигоне.

Создаваемое высотное обоснование привязывается к реперам I, II класса государственной нивелирной сети, которая является главной высотной основой России и стран СНГ. Она предназначена для распространения на территорию нашей страны, а также территорию сопредельных государств единой системы нормальных высот,

называемой Балтийской. С ее помощью решаются следующие научно-технические задачи [18]:

– изучение фигуры физической поверхности Земли и ее внешнего гравитационного поля;

– определение разностей высот и наклонов среднеуровенных поверхностей морей и океанов;

– изучение современных вертикальных движений земной поверхности и выявление предвестников землетрясений;

– создание техногенных геодинамических полигонов с целью изучения движений земной поверхности на территории добычи нефти и газа, а также на промплощадках ответственных и уникальных инженерных сооружений;

– создание исходной высотной основы на промплощадках для целей строительства инженерных сооружений;

– определение деформационного состояния инженерных сооружений и применяемого оборудования в период строительства и эксплуатации указанных объектов.

Нивелирная сеть I класса представляет собой схему нивелирных ходов, образующих замкнутые полигоны с определённым периметром, который зависит от регионов страны:

– для обжитых районов периметр достигает 1 100 – 1 200 км;

– для малообжитых районов периметр достигает 1 800 – 2 000 км.

На геодинамических и техногенных полигонах периметр этих полигонов уменьшается до 20–40 км.

Нивелирная сеть II класса опирается на реперы I класса и создается как отдельными линиями, так в виде нескольких линий с узловыми пунктами, которые образуют полигоны. Периметр полигонов также зависит от решаемых задач и они равны следующим значениям:

– для обжитых районов периметр 300–400 км;

– для малообжитых районов периметр 800–1 000 км;

– на промплощадках периметр 60–80 км;

– на геодинамических полигонах периметр, как правило, не превышает 20 км.

В состав нивелирных сетей I и II классов также включаются пункты государственной спутниковой геодезической сети:

– фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС);

– высотной геодезической сети (ВГС);

– спутниковой геодезической сети 1-го класса (СГС-1).

В зависимости от класса нивелирования применяются разная схема и методика выполнения нивелирования. Так, нивелирование I класса выполняется в прямом и обратном направлениях, одновременно, по двум парам костылей (кольев), которые образуют две параллельные линии нивелирования – правую и левую. Нивелирный ход должен прокладываться отдельными участками, состоящими из смежных нивелирных секций общей длиной 25–30 км.

Нивелирование II класса выполняется по одной линии в прямом и обратном направлениях.

Линии нивелирования I и II классов прокладываются по заранее выбранным трассам, которые должны удовлетворять следующему требованию – грунтовые условия должны способствовать надежному и устойчивому закреплению костылей (кольев) во время выполнения нивелирования на станции. Для этого линии прокладываются вдоль шоссейных или железных дорог, а в труднодоступных районах – по берегам рек, тропам и зимникам [18]. На промплощадках линии нивелирования прокладываются при установке штатива на твердый грунт или бетонное основание. При этом не допускается установка штатива на асфальтовое покрытие из-за влияния солнечных лучей его плотность.

Сгущение нивелирных сетей производится нивелированием III, IV классов и они являются высотным обоснованием для производства топографических съемок в масштабе 1 : 500–1 : 5000, а также для решения инженерно-геодезических задач различного назначения при строительстве инженерных сооружений.

Выполнение нивелирования производится нивелирами с визуальным отсчитыванием, а также цифровыми нивелирами [18, 52, 130, 131, 133, 135]. При использо-

вании нивелиров с визуальным отсчитыванием при нивелировании I, II классов применяется симметричная программа работ на станции: ЗППЗ (четная станция) и ПЗЗП (нечетная станция).

Закрепление нивелирных сетей в зависимости от класса нивелирования производится реперами следующих типов: вековыми, фундаментальными, скальными (грунтовыми) и стенными.

Основные технические характеристики государственного нивелирования I, II, III и IV классов, которое выполнялось нивелирами с визуальным отсчитыванием согласно требованиям нормативного документа [18], представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные характеристики нивелирования I, II, III и IV классов

Наименование показателя	I класс	II класс	III класс	IV класс
СКО (из обработки нивелирования), не более, мм/км	0,8	2,0	5,0	10,0
Допустимая невязка в полигонах и по линиям, мм	3 мм $\sqrt{L}$	5 мм $\sqrt{L}$	10 мм $\sqrt{L}$	20 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	2	5	10
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^x и хорошей видимости. ** При увеличении зрительной трубы не менее 35^x и хорошей видимости.				

В настоящее время нивелирование I и II классов выполняется в основном цифровыми нивелирами. С их появлением в геодезическом производстве общая схема

построения нивелирных сетей не изменилась за исключением методики нивелирования на станции и в нивелирном ходе в целом.

Применительно к выполнению нивелирования на промплощадке согласно требованиям нормативного документа [27] нивелирование I, II, III и IV классов должно выполняться с другими техническими характеристиками и допусками (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Характеристики геометрического нивелирования при наблюдениях за осадками зданий и сооружений [27]

Условия геометрического нивелирования	Основные технические характеристики и допуски для геометрического нивелирования классов			
	I	II	III	IV
Применяемые нивелиры	с ошибкой 0,3-0,5 мм на 1 км двойного хода		с ошибкой 1,0-3,0 мм на 1 км двойного хода	
Применяемые рейки	инварные		двухсторонние шашечные, складные штрихкодовые	
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 ($f_{доп}$) 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 $m_{ст} = f_{доп} / 2$, мм	0,15	0,25	0,75	2,50
Допускаемая ошибка измерения вертикальных перемещений, мм	1,0	2,0	5,0	10,0

Основное отличие технических характеристики допусков в данной классификации заключается в уменьшении длины визирного луча и подсчете невязки в нивелирном ходе.

Как показывает практика выполнения высокоточного нивелирования на промплощадке, требуемые величины средних квадратических ошибок (СКО), равные

0,15 и 0,25 мм, соответственно, для нивелирования I и II классов не в полной мере удовлетворяют требованиям ведения деформационного мониторинга, особенно за технологическим оборудованием. Поэтому применительно к выполнению высокоточного нивелирования на гидротехнических объектах автором [47] была разработана классификация разрядного геометрического нивелирования короткими лучами (таблица 1.6). В данной классификации кроме числа направлений вводится еще и требование к числу горизонтов нивелира на станции.

Таблица 1.6 – Технические характеристики разрядного нивелирования для измерения осадок гидротехнических сооружений (выписка из [47])

Наименование характеристик	Разряд нивелирования		
	I	II	III
Средняя длина визирного луча, м	25,0	25,0	50,0
Неравенство длин визирных лучей	0,5	0,5	1,0
Накопление неравенств длин в ходе, м	1,0	1,0	2,0
Высота визирного луча над препятствием, м (не более)	0,8	0,8	0,3
Число горизонтов нивелира	2	2	1
Число направлений	2	1	1
СКО измерения среднего превышения на станции, мм (не более)	0,08	0,13	0,40
Предельное расхождение прямого и обратного ходов (для III – невязка), мм	$0{,}3\sqrt{n}$	$0{,}5\sqrt{n}$	$1{,}2\sqrt{n}$
Примечание. Данные требования относятся к нивелирам с визуальным отсчитыванием.			

При выполнении нивелирования согласно программам наблюдений на станции данной классификации требуемая величина СКО измерения превышения на станции уменьшается примерно в два раза.

Также уменьшить величину СКО измерения превышения на станции предлагают и авторы работ [37, 38]. Такая величина СКО также достигается увеличением числа горизонтов нивелира. При этом величину СКО измерения превышения они предложили разделять в соответствии с классом нивелирования (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Технические характеристики разрядного геометрического нивелирования (выписка из [37])

№ 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
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	СКО определения среднего превышения на станции (не более), мм	0,05	0,10	0,25	0,50

Появление в геодезическом производстве цифровых нивелиров привело к изменению программы работы на станции. Для выполнения нивелирования предложена классификация разрядов геометрического инженерно-геодезического нивелирования короткими лучами [117] (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Классификация разрядов инженерно-геодезического нивелирования с применением цифровых нивелиров (выписка из [117])

Разряд	Предельная длина визирного луча, м	$m_{ст}$, мм	Число превышений на станции	Допустимая высота луча над пяткой рейки, мм	Неравенство расстояний, м		Точность компенсатора m″к
					на станции	в секции	
1	10	0,15	4	0,2 – 0,5	0,1	–	0,1"
2	25	0,25	4	0,2 – 1,5	0,3	2,0	0,1"
3	50	0,50	2	1,0 – 2,0	1,0	2,0	0,5"
4	75	1,00	2	1,0 – 3,0	2,0	5,0	0,5"
5	100	3,00	2	–	–	–	1,0"

Так как штрихкодовые рейки имеют одну шкалу, то для получения необходимой точности высокоточное измерение превышения на станции производится при нескольких горизонтах нивелира.

Наряду с цифровыми нивелирами в геодезическом производстве для тригонометрического нивелирования различной точности начали широко применяться тахеометры. Применение высокоточных тахеометров позволяет измерить превышение на станции с СКО не хуже 0,15–0,20 мм.

Нормативным документом [27] регламентируются требования к точности измерения расстояний и углов наклона в зависимости от величины этого угла (таблица 1.9). Недостатком данных требований является тот факт, что при углах наклона, близких к 30–40°, практически невозможно получить заявленную точность измерений.

Таблица 1.9 – Требования к измерениям при тригонометрическом нивелировании согласно [27]

Класс точности измерений	Допустимая ошибка измерений			
	Расстояний, мм, при значении вертикальных углов		Вертикальных углов, при их значениях:	
	До 10°	Свыше 10° до 40°	До 10°	Свыше 10° до 40°
II	7	1	2,5″	1,5″
III	15	3	5,0″	3,0″
IV	35	8	12,0″	10,0″

Для достижения такой высокой точности необходимо применять соответствующую программу наблюдения на нивелирной станции, которую предлагают авторы работы [85]. В таблице 1.10 приведены предлагаемые разряды тригонометрического нивелирования короткими лучами.

Таблица 1.10 – 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_{hcm}, мм	Неравенство плеч, м
1	10	2,0"	2,0	4	0,3	2°	0,15	2,0
2	25	2,0"	2,0	2	0,5	3°	0,25	5,0
3	50	2,0"	2,0	2	1,0	3°	0,50	10,0
4	75	3,0"	5,0	2	1,0	5°	1,00	10,0
5	100	3,0"	5,0	1	2,0	10°	3,00	–

Из таблицы следует, что для получения требуемой точности измерения превышения необходимо выполнять эти измерения несколькими приемами. При этом также необходимо соблюдать допустимое расстояние до визирных целей.

Гидростатическое нивелирование применяется для определения деформационного состояния наблюдаемых объектов [11, 89].

Тригонометрическое нивелирование короткими лучами может применяться при ведении деформационного мониторинга инженерных сооружений, включая особо опасные и технически сложные. Достоинством такого нивелирования является возможность выполнять нивелирование без установки реек на осадочные марки и использовать в качестве них заранее закрепленные светоотражающие пленки. Данный факт имеет место при наблюдении за зданиями хранения и переработки отработанного ядерного топлива.

Выполненный анализ показывает, что к настоящему времени нет единого мнения в отношении методик выполнения нивелирования даже с учетом наличия нормативного документа [27].

1.4 Анализ нормативных документов для создания плановой основы на промплощадках

После проведения инженерно-геодезических изысканий на месте будущей промплощадки наряду с высотным обоснованием создается и плановое. Схема его создания зависит от формы и геометрических параметров инженерного сооружения, а также требуемой точности взаимного расположения пунктов обоснования. На сегодняшний день применяются различные способы создания планового обоснования, а также и ее сгущения.

Создание планового обоснования производится, как правило, в несколько этапов по принципу от общего к частному на основании требований нормативных документов [100, 103].

В упомянутых выше нормативных документах приводятся требования к точности выполнения инженерно-геодезических работ на всех этапах строительства.

Для целей проведения инженерно-геодезических изысканий требования к точности создания обоснования приведены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Основные технические требования к созданию опорных и съемочных сетей согласно СП 47.13330.2012

Вид сети	СКП определения координат относительно исходных пунктов, мм, не более	Значения СКП взаимного положения смежных пунктов в плане, мм, не более	Значения СКП взаимного положения смежных пунктов по высоте, мм, не более
КСГС и (или) сеть постоянно действующих базовых (референцных) станций ГНСС	20	15	20
СГСС и (или) сеть постоянно действующих базовых (референцных) станций ГНСС	20	20	25
Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 4-го класса, сети, создаваемые спутниковыми определениями	20	25	-
Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 1-го разряда, сети сгущения, создаваемые спутниковыми определениями	50	30	-
Примечания 1 Показатели СКП положения пунктов, определяемых ГНСС-измерениями, относительно исходных применяют в случаях, когда исходными являются пункты сетей ВГС и СГС-1. 2 В случае использования исходных пунктов, точность положения которых, несмотря на представленный в каталогах класс (разряд), старший к классу (разряду) создаваемой сети, может быть ниже точности измерений, выполняемых современными геодезическими приборами, при уравнивании рекомендуется применять обоснованные в программе методы, позволяющие ослабить потерю точности взаимного положения создаваемой опорной геодезической сети (или сети специального назначения) вследствие неудовлетворительного качества исходных пунктов.			

Выполним теперь анализ требований, указанных в нормативном документе [100]. Необходимо отметить, что данный нормативный документ является вторым

изданием документа [100], который, в свою очередь, является актуализированной редакцией СНиП 3.01.03-84. После выхода нормативного документа [100] к его содержанию было много замечаний, например, из-за ошибочности многих требований к точности выполнения инженерно-геодезических измерений. В результате этого он не был принят к исполнению. Впоследствии была выполнена незначительная его редакция и он был заменен на новую редакцию нормативного документа [100] с сохранением неправомерных требований к точности выполнения инженерно-геодезических измерений. В этом отношении характерны требования (таблица 1.12), приведенные в таблице 5.1 указанного нормативного документа [100].

Таблица 1.12 – Основные технические требования к точности разбивочной основы согласно СП 126.13330.2017

Характеристика объекта строительства	Величины средних квадратических ошибок построения разбивочной основы строительства			Предельная ошибка взаимного планового положения смежных пунктов разбивочной основы X, Y, мм	Предельная погрешность взаимного высотного положения смежных пунктов разбивочной основы,	Плотность пунктов разбивочной основы на застроенной (незастроенной) территории
	Угловые измерения, с	Линейные измерения	Определение превышения на 1 км хода или отметок смежных реперов на застроенной (незастроенной) территории, мм			
1 Предприятия и группы зданий (сооружений) на участке площадью более 1 км^2; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки более 100 тыс. м^2	3	$\frac{1}{25000}$	3 (10)	50	10	16(4)
2 Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью менее 1 км^2; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки от 10 до 100 тыс. м^2	5	$\frac{1}{10000}$	6	30	5	9

Окончание таблицы 1.12

Характеристика объекта строительства	Величины средних квадратических ошибок построения разбивочной основы строительства			Предельная ошибка взаимного планового положения смежных пунктов разбивочной основы X, Y, мм	Предельная погрешность взаимного высотного положения смежных пунктов разбивочной основы,	Плотность пунктов разбивочной основы на застроенной (незастроенной) территории
	Угловые измерения, с	Линейные измерения	Определение превышения на 1 км хода или отметок смежных реперов на застроенной (незастроенной) территории, мм			
3 Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки менее 10 тыс. м^2; сети инженерно-технического обеспечения в пределах застраиваемых территорий	10	$\frac{1}{5000}$	10	20	5	4 (16)*
4 Сети инженерно-технического обеспечения вне застраиваемых территорий; земляные ооружения, в том числе вертикальная планировка	30	$\frac{1}{2000}$	5	50	10	**
Примечание * – для сетей инженерно-технического обеспечения пункты следует располагать не реже чем через 100 м, параллельно осям трасс и в точках резкого излома трасс; ** – для сетей инженерно-технического обеспечения – то же, что и в пункте 3; для земляных сооружений и вертикальной планировки – согласно ППГР и картограмме земляных работ.						

Так, для промплощадки площадью более 1 км^2 предельная ошибка взаимного положения пунктов разбивочной основы допускается равной 50,0 мм (СКО 20,0-25,0 мм) в плане. Данная величина является недопустимой для дальнейшего производства разбивочных работ, так как при выносе осей строящегося сооружения, особенно опасного и технически сложного, от разных пунктов обоснования их положение может отличаться на эту величину (при допустимом значении 3,0–5,0 мм). Кроме того, при измерении расстояний тахеометрами со СКО порядка 2,0–3,0 мм

и углов 2,0–3,0″ ошибка взаимного положения двух смежных пунктов при расстоянии до них даже 200,0 м будет определена с СКО порядка 5,0–7,0 мм. В высотном отношении также указывается, что допустимая величина ошибки взаимного положения пунктов может быть равной 10,0 мм без указания расстояния между ними (например, 100,0 или 300,0 м), что также является необоснованным утверждением.

Рассмотренные допуски справедливы также и при эксплуатации инженерного сооружения для целей ведения деформационного мониторинга, а также при его реконструкции.

1.5 Обоснование постановки задач исследований

1 *Выполнение анализа существующих методов, методик и средств производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, применяемых при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений, а также определении их деформационного состояния.* Выполнение данного анализа обусловлено необходимостью выбора методов и средств производства высокоточных инженерно-геодезических измерений для целей ведения деформационного мониторинга ТГП, на которых располагаются объекты атомной промышленности, в частности АЭС на быстрых нейтронах. Особенностью АЭС на быстрых нейтронах является повторное использование отработанного ранее облученного ядерного топлива, что повышает требования к радиационной безопасной их эксплуатации в части ведения деформационного мониторинга ТГП и расположенных на нем особо опасных и технически сложных инженерных сооружений.

2 *На основе применения различных геодезических приборов предложить схемы создания высокоточного планово-высотного обоснования для ведения деформационного мониторинга ТГП и расположенных на них особенно опасных и технически сложных инженерных сооружениях атомной промышленности*. При создании обоснования на ТГП АЭС с реакторами на быстрых нейтронах необходимо учитывать тот факт, что на промплощадке будут располагаться инженерные сооружения, предназначенные для хранения, переработки и повторного использо-

вания отработанного ядерного топлива. Это приводит к необходимости более тщательного ведения деформационного мониторинга как ТГП, так и расположенных на них указанных инженерных сооружений с целью обеспечения радиационной безопасной эксплуатации и предотвращения возможных аварий, обусловленных различными деформациями.

3 *Разработать методику производства высокоточных инженерно-геодезических измерений с целью ведения деформационного мониторинга ТГП, а также расположенных на нем особо опасных и технически сложных инженерных сооружений атомной промышленности*. Разработанные технологическая схема и методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений должны учитывать требуемую точность и безопасность выполнения работ в условиях наличия на промплощадке инженерных сооружений с высоким уровнем радиационного излучения, за которыми также необходимо будет вести регулярный деформационный мониторинг.

4 *Выполнить исследование точности измерения расстояний тахеометрами в условиях тумана при ведении деформационного мониторинга ТГП.* Необходимость в выполнении данных исследований обусловлена тем, что высокоточные линейно-угловые измерения производятся в различных условиях в том числе и при наличии тумана (весна, осень). При наличии тумана существенно изменяются метеорологические параметры атмосферы, например, влажности, что приводит к изменению величин стандартных поправок в измеряемые расстояния. Величины этих поправок особенно важны при выполнении высокоточных линейных измерений. Такие исследования позволят определить величины таких поправок, которые могут отличаться от стандартных.

5 *С целью определения осадок реакторного отделения, в зависимости от деформационного состояния ТГП, разработать совмещенную цикличность выполнения высокоточного нивелирования реперов и осадочных марок*. Одним из основных инженерных сооружений АЭС является здание реактора, деформация которого (крен) зависит в том числе и от величины деформации участка земной поверхности

ТГП, на котором размещается это здание. Так как цикличность определения деформационного состояния здания реактора и ТГП регламентируется соответствующими нормативными документами, то для обоснования причин возникновения деформаций необходимо циклы высокоточного нивелирования выполнять одновременно.

6 *Разработать схемы выполнения метрологической поверки тахеометров без применения эталонных линейных базисов непосредственно на промплощадке*. Необходимость в разработке такой схемы обусловлена тем, что во время выполнения измерений на промплощадке случаются случайные механические удары по корпусу тахеометра, что может привести к нарушению точностных характеристик линейных измерений. В этом случае повторная метрологическая поверка тахеометра в специализированной организации потребует времени и финансовых затрат. В связи с этим технологическая поверка тахеометра после удара непосредственно на промплощадке позволит быстро определить его метрологическую характеристику точности измерения расстояния.

7 *Провести апробацию разработанной методики выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений при определении деформационного состояния ТГП и расположенных на них особо опасных и технически сложных инженерных сооружений атомной промышленности*. Такая апробация на строящемся объекте АЭС позволит более объективно судить о выполненных исследованиях по разработке технологической схемы и методики выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений, а также наметить пути дальнейших исследований. Также апробация и последующее внедрение результатов исследований позволят внести рекомендации в существующие нормативные документы.

2 РАЗРАБОТКА СХЕМ СОЗДАНИЯ ПЛАНОВОГО ОБОСНОВАНИЯ И МЕТОДИКИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

2.1 Краткая характеристика особо опасных и технически сложных инженерных сооружений

К особо опасным и технически сложным инженерным сооружениям относятся [36, ст. 48.1]:

– атомные и гидравлические электростанции;

– ускорители заряженных частиц;

– металлургические заводы;

– гидротехнические сооружения;

– большие нефтеперерабатывающие заводы и т. д.

При строительстве и эксплуатации особое внимание уделяется атомным электростанциям и исследовательским реакторам. На территории РФ возводятся и эксплуатируются АЭС с различными типами реакторов: РБМК-1000, ВВЭР- 440, ВВЭР-1000, ВВЭР -1200 и БН-800 [77].

Ленинградская АЭС располагается в г. Сосновый Бор Ленинградской области и она является крупнейшей в России по установленной мощности. На этой АЭС первый энергоблок с реактором РБМК-1000 был введен в строй в 1975 г. Всего было построено четыре энергоблока с данным типом реактора. Проектный эксплуатационный ресурс каждого из четырех реакторов и основного технологического оборудования был установлен сроком на 30 лет. После проведенной модернизации эксплуатационный срок для каждого реактора был увеличен еще на 15 лет.

Так как реакторы РБМК-1000 с течением времени начали постепенно выводиться из эксплуатации, то для замещения выбывающих мощностей на новой площадке началось строительство АЭС с реакторами ВВЭР-1200 [77], первый пуск которого был в 2018 г. (рисунок 2.1). Проектный эксплуатационный ресурс реакторов

данного типа и основного технологического оборудования установлен сроком на 60 лет.

Рисунок 2.1 – Трехмерная цифровая модель промплощадки Ленинградской АЭС

На рисунке 2.2 приведена промплощадка строящихся энергоблоков Ленинградской АЭС С реакторами ВВЭР-1200 [77].

Рисунок 2.2 – Строительство Ленинградской АЭС

На Курской АЭС первый энергоблок также с реактором РБМК-1000 был введен в эксплуатацию в 1976 г. В настоящее время для замещения выбывающих мощностей также возводится энергоблок (рисунок 2.3) с модифицированным реактором ВВЭР-ТОИ [77].

Рисунок 2.3 – Трехмерная цифровая модель промплощадки Курской АЭС

Проектный эксплуатационный ресурс реакторов данного типа и основного технологического оборудования установлен также сроком на 60 лет.

Реакторы РБМК и ВВЭР работают на тепловых нейтронах. В СССР в 1980 г. на Белоярской АЭС были установлен реактор БН-600 на быстрых нейтронах (рисунок 2.4), а в 2015 г. в эксплуатацию был пущен реактор БН-800 [77].

Рисунок 2.4 – Трехмерная цифровая модель промплощадки Белоярской АЭС

Особенностью конструкции данного типа реакторов является возможность получения замкнутого ядерно-топливного цикла.

Рисунок 2.5 – Общий вид промплощадки Белоярской АЭС

Дальнейшее развитие и возведение таких реакторов на быстрых нейтронах осуществляется в г. Северск Томской области [77]. Рассматриваемым проектом строительства инженерного сооружения является ядерно-энергетический комплекс «Прорыв», который реализуется мировым флагманом в области ядерной энергетики – госкорпорацией «Росатом». Проект «Прорыв» нацелен на достижение нового качества ядерной энергетики и предназначен для развития крупномасштабной ядерной энергетики, включает в себя разработку, создание и промышленную реализацию замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) на базе реакторов на быстрых нейтронах. Задачей проектного направления «Прорыв» является создание ядерно-энергетических комплексов, включающих в себя:

– атомную электростанцию с реакторами на быстрых нейтронах;

– производство по регенерации (переработке) и рефабрикации ядерного топлива;

– подготовку всех видов РАО к окончательному удалению из технологического цикла для крупномасштабной ядерной энергетики, отвечающих основным базовым требованиям.

К таким требованиям относятся:

– формирование ЗЯТЦ для полного использования энергетического потенциала природного уранового сырья;

– укрепление режима нераспространения оружейного плутония и сокращение транспортировки ядерных материалов;

– исключение аварий на АЭС, требующих эвакуации, а тем более отселения населения;

– обеспечение конкурентоспособности ядерной энергетики в сравнении с альтернативной генерацией, в первую очередь, с парогазовыми установками, а также солнечными и ветровыми станциями при учёте всех затрат топливных циклов.

Данный объект возводится на территории Сибирского химического комбината [77] и включает в себя (рисунок 2.6):

Рисунок 2.6 – Общий вид промплощадки ОДЭК БРЕСТ-ОД-300

– энергоблок с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем;

– модуль фабрикации/рефабрикации для изготовления исходных тепловыделяющих сборок (твэлов), а впоследствии и твэлов из переработанного облученного ядерного топлива.

Трехмерная цифровая модель опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК) приведена на рисунке 2.7 [77].

Рисунок 2.7 –Схема расположения объектов на промышленной площадке строящейся АЭС на быстрых нейтронах

Опытно-демонстрационный энергетический комплекс должен впервые в мире продемонстрировать устойчивую работу полного комплекса по обеспечению замкнутого топливного цикла. Объект БРЕСТ-300 состоит из комплекса зданий и сооружений, каждое из которых обладает своими характеристиками.

Энергоблоки на промплощадке АЭС с любым типом реактора включают в себя следующие основные инженерные сооружения:

– здания реакторов;

– здания турбоагрегатов (машинный зал);

– градирни;

– вентиляционные трубы;

– здание хранения отработанного ядерного топлива;

– здание фабрикации и рефабрикации топлива (для реакторов на быстрых нейтронах);

– здания трансформаторов и распределительных устройств.

Для обеспечения безаварийной эксплуатации зданий и сооружений АЭС необходимо проведение высокоточных инженерно-геодезических измерений для целей ведения деформационного мониторинга земной поверхности и расположенных на ней зданий и инженерных сооружений. Деформационный мониторинг в полном

объеме обязательно должен быть предусмотрен для тех зданий и сооружений, которые являются уникальными и особо опасными объектами в соответствии с требованиями нормативных документов [20, 33, 68, 67, 69, 70, 74, 80, 107, 113].

Для решения задач по обеспечению строительно-монтажных работ и ведения деформационного мониторинга за состоянием зданий и инженерных сооружений требуется создание на промплощадке высокоточного планово-высотного обоснования.

Инженерно-геодезические работы для целей строительства включают в себя:

– выполнение высокоточных разбивочных работ с последующим производством исполнительных съемок строительных конструкций и элементов применяемого технологического оборудования;

– ведение деформационного мониторинга земной поверхности промплощадки, возводимых инженерных сооружений, а также применяемого технологического оборудования как на стадии строительства, так и в период эксплуатации.

Схема создания планово-высотного обоснования, а также места размещения пунктов должны учитывать динамику и объемы ведения земляных работ, размещение возводимых инженерных сооружений, особенности последующей их эксплуатации и возможной реконструкции.

Выполнение высокоточных инженерно-геодезических работ на промплощадках АЭС должны соответствовать требованиям п. 1.3 нормативного документа [109], согласно которому деформационный мониторинг производится на следующих объектах:

– с промышленными и исследовательскими ядерными реакторами, ритическими и подкритическими ядерными стендами;

– с ядерным топливом и материалами, в том числе с установками для их производства, использования и последующей переработки;

– стационарных объектах и сооружениях, предназначенных для хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранения или захоронения радиоактивных отходов.

Для реализации деформационного мониторинга на площадке строительства особо опасного и технически сложного инженерного сооружения разрабатывается программа ведения геотехнического мониторинга. Программа геотехнического мониторинга объекта строительства включает в себя:

– состав, объемы, периодичность и технологическую схему выполнения инженерно-геодезических работ с учетом результатов инженерных изысканий на площадке строительства;

– учет конструктивных решений проектируемого или реконструируемого инженерного сооружения, а также зданий окружающей застройки;

– учет последовательности выполнения строительно-монтажных работ, а также работ по установке технологического оборудования.

При разработке программы геотехнического мониторинга необходимо учитывать особенности расположения площадки проектируемого сооружения на территориях с распространением специфических грунтов, подрабатываемых территориях, в сейсмических районах, а также возможность проявления опасных геологических процессов, так как разрушение массивного объекта (здания или сооружения) может иметь чрезвычайные последствия. По этой причине раннее выявление опасности имеет решающее значение и обуславливает потребность в надежной методологии для регулярного, структурного и мобильного геотехнического мониторинга деформации. Если на строительной площадке на рядом расположенных строящихся инженерных сооружениях выполняются значительные выемки грунта (производится открытая разработка котлована) и изменяются геологические свойства грунтов на всей площадке строительства, то по этой причине все ответственные сооружения должны быть подвергнуты постоянным наблюдениям за их деформационным состоянием.

Применительно к особо опасным инженерным сооружениям на методику определения их деформационного состояния существенное влияние будет оказывать наличие ионизирующего излучения от зданий (таблица 2.1), предназначенных для переработки и хранения ядерного топлива и его отходов (см. рисунок 2.2).

Таблица 2.1 – Классы опасности и категории ответственности инженерных сооружений объектов атомной промышленности согласно таблице А.1 [69,109]

Наименование сооружений и конструкций объектов наблюдения	Класс безопасности элементов и установок	Категория ответственности за ядерную и радиационную безопасность и сейсмостойкость	Уровень ответственности
Фундаментная плита, стены и перекрытия фундаментной части реакторного отделения	2	1; I	Повышенный
Несущие конструкции внутри герметичной части реакторного отделения: опорная плита, внутренние перекрытия, стены, облицовка	2	1; I	Повышенный
Облицовка бассейна выдержки и перегрузки	2, 1	1; I	Повышенный
Несущие конструкции хранилищ свежего радиоактивного топлива и твердого радиоактивного топлива, зацементированных, средне- и слабоактивных хранилищ радиоактивных отходов, узла переработки отходов (категория зависит от месторасположения)	3	1 и 2; I или II	Повышенный
Конструкции хранилища свежего топлива или узла свежего топлива спецкорпуса (класс или категория зависят от местоположения хранилища или узла)	2	1; I	Повышенный
Конструкции хранилища отработанного ядерного топлива	2	1; I	Повышенный
Несущие конструкции здания, включающего узел переработки отходов	3	2; II	Повышенный
Эстакады технологических и электрических коммуникаций	4	2; II	Повышенный
Несущие конструкции очистных сооружений, вспомогательных корпусов	4	3; III	Повышенный

Также на общую технологическую схему ведения деформационного мониторинга на таких объектах значительное влияние оказывает выбранная (разработанная) методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений, их цикличность, а также применяемые для измерений геодезические приборы.

2.2 Состав основных инженерно-геодезических работ, выполняемых на промплощадках особо опасных и технически сложных инженерных сооружений

В настоящее время при строительстве, а также определении осадок и деформаций ответственных и особо опасных инженерных сооружений, таких как гидроэлектростанции (ГЭС) и атомные станции, производятся различные инженерно-геодезические работы. К таким работам относятся:

– создание инженерно-топографических планов различными способами, в том числе с применением беспилотных авиационных систем [106];

– развитие на промплощадке высокоточного геодезического обоснования для целей строительства, а также для создания техногенного геодинамического полигона;

– высокоточное геометрическое нивелирование, в том числе короткими лучами;

– высокоточные створные измерения по маркам, расположенным по гребню ГЭС и внутри ее плотины;

– наблюдения за наклонами плотины ГЭС с помощью прямых и обратных отвесов;

– наблюдение за деформационным состоянием здания реакторного отделения, турбоагрегатов, градирен и вытяжных труб.

Применительно к ГЭС выполнение инженерно-геодезических измерений происходит при благоприятных внешних условиях. Целый ряд наблюдений за деформационным состоянием плотины производится с использованием автоматизированных систем геодезического назначения [122].

Применительно к эксплуатации АЭС инженерно-геодезические измерения производятся с применением высокоточного геометрического нивелирования короткими лучами по маркам, расположенным по периметру главного корпуса и внутри него, здании хранения отработанного ядерного топлива, на фундаментах турбоагрегатов и технологическом оборудовании реакторного отделения [105, 109].

Одними из таких ответственных инженерных сооружений являются, как уже указывалось выше, строящиеся в г. Сосновый Бор Ленинградской области, а также в целом ряде стран (Китай, Индия, Египет и др.) АЭС нового поколения с реакторами ВВЭР-1200. В г. Томске строится АЭС на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 мощностью 300 МВт [77]. Особенностью строящейся в г. Томске АЭС является тот факт, что отработанное на других реакторах ядерное топливо будет снова использоваться и перерабатываться бесконечное число раз, вследствие чего ресурсная база атомной энергетики станет практически неисчерпаемой.

Как и на всех промплощадках, при изыскании, строительстве и эксплуатации АЭС также должны выполняться различные высокоточные инженерно-геодезические измерения [68, 80, 101, 103, 107]. Основными этапами производства высокоточных инженерно-геодезических работ на промплощадке АЭС являются:

– проведение инженерно-геодезических изысканий с созданием инженерно-топографических планов, в основном, масштаба 1 : 500 при окончательном выборе промплощадки АЭС;

– создание на промплощадке высокоточного планово-высотного обоснования для обеспечения строительства;

– производство разбивочных работ;

– создание внутреннего высокоточного планово-высотного обоснования;

– производство высокоточных инженерно-геодезических измерений при возведении сооружений (в первую очередь здания реактора) и монтаже технологического оборудования;

– производство высокоточных инженерно-геодезических измерений при эксплуатации сооружений и применяемого технологического оборудования (определение деформационного состояния);

– создание на промплощадке техногенного геодинамического полигона;

– производство высокоточных инженерно-геодезических измерений на техногенном геодинамическом полигоне.

При разработке технологической схемы ведения деформационного мониторинга необходимо руководствоваться требованиями нормативного документа (таблица 2.2), а также требованиями проектной организации к точности выполнения соответствующих высокоточных инженерно-геодезических измерений.

Таблица 2.2 – Класс точности измерений вертикальных и горизонтальных перемещений согласно [27]

Класс точности измерений	Допустимая погрешность измерения смещений, мм	
	вертикальных	горизонтальных
I	1	2
II	2	5
III	5	10
IV	10	15
П р и м е ч а н и е – Класс точности измерений вертикальных и горизонтальных перемещений допускается устанавливать: I – для зданий и сооружений: исторической застройки, аварийных, технически сложных, длительное время (более 50 лет) находящихся в эксплуатации, возводимых на скальных и полускальных грунтах; II – в остальных случаях для зданий и сооружений; III – для сооружений, расположенных на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах; IV – для земляных сооружений.		

Согласно п. 7.3.1.6. [109] для оснований сооружений АЭС I и II категории безопасности устанавливается I класс точности измерений.

Для ведения геодинамического мониторинга на промплощадке АЭС согласно требованиям проекта и нормативного документа [109] необходимо создавать высотную нивелирную сеть, состоящую из сети глубинных реперов. При этом перечень объектов и периодичность проведения циклов деформационного мониторинга устанавливаются в зависимости:

– от классов (1, 2, 3 и 4) безопасности элементов объекта наблюдения согласно [67];

– категорий зданий и сооружений по условиям их ответственности за радиационную и ядерную безопасность (I, II или III) согласно [69];

– категории сейсмостойкости, которые устанавливают требования к обеспечению безопасности АЭС с реакторами всех типов.

При выполнении высокоточных инженерно-геодезических измерений за деформационным состоянием инженерных сооружений АЭС (здание реактора, турбинное отделение, хранилище отработанного ядерного топлива) и технологического оборудования обязательным условием является соблюдение требований радиационной безопасности.

Применительно к зданию реактора повышенные требования к соблюдению требований радиационной безопасности предъявляются при выполнении инженерно-геодезических измерений непосредственно в реакторном отделении (корпус реактора, полярный кран, перегрузочная машина, парогенератор).

Повышенные требования к соблюдению требований радиационной безопасности при выполнении инженерно-геодезических измерений в турбинном отделении предъявляются только для реакторных блоков РБМК, так как перегретый пар поступает на турбину с первого контура.

Особое внимание уделяется радиационной безопасности хранилища отработанного ядерного топлива, включая определение его деформационного состояния [105, 109, 108]. Отработанные тепловыделяющие сборки обладают высокорадиоактивными отходами, подлежащими хранению и последующей переработке. Поэтому определению деформационного состояния хранилища этих отходов предъявляются повышенные требования.

На различных этапах строительства особо опасных и технически сложных инженерных сооружений должны с повышенными требованиями производиться виды работ, указанные в нормативном документе [109]. Применительно к данному объекту эти работы подразделяются на три вида:

– инженерно-геодезические работы различной точности с целью обеспечения производства общестроительных работ при возведении различных инженерных сооружений;

– высокоточные инженерно-геодезические работы для ведения мониторинга состояния земной поверхности на промплощадке и прилегающей к ней территории;

– высокоточные инженерно-геодезические работы для определения деформационного состояния инженерных сооружений, а также применяемого технологического оборудования.

При этом на промплощадке создается два вида планово-высотного обоснования, которые предназначены:

– для производства строительства зданий и сооружений;

– ведения геодинамического и геотехнического мониторинга.

Производство инженерно-геодезических изысканий. С учетом опасности возводимого инженерного сооружения данный вид работ проводился согласно требованиям нормативных документов [20, 101]. Данный вид работ является общим для дальнейшего производства общестроительных работ и ведения деформационного мониторинга.

В настоящее время сложившиеся подходы к геодезическому обеспечению проектирования, изысканий, строительства и реконструкции зданий и сооружений различного назначения не в полной мере удовлетворяют потребностям строительного производства. Цифровые топографические планы крупных масштабов не отображают в полной мере ситуацию на строительной площадке. В этой связи нами предлагается [123] дополнять цифровые инженерно-топографических планы информацией, получаемой с использованием материалов съемки беспилотных авиационных систем (БАС). В настоящее время информация о рельефе и ситуации местности представляется в виде крупномасштабных топографических планов масштабов 1 : 500 и 1 : 200, созданных различными способами. Сложившиеся в настоящее время подходы к геодезическому обеспечению проектирования, изысканий, строительства и реконструкции не полностью удовлетворяют потребностям строительного производства. Получаемая информация в виде топографических планов масштаба 1 : 500 и 1 : 200 не отображает в полной мере ситуацию на строительной площадке с учетом особенностей её детального строения и расположения различных коммуникаций. Более полную информацию возможно получить путем отображения всех

форм рельефа и коммуникаций, а также элементов зданий и сооружений необходимого участка местности в масштабе 1 : 500 или 1 : 200 с дополнительной информацией в виде цифровых моделей и фотографий различных объектов. Такая информация позволит более объективно разработать схему расположения пунктов планово-высотной и деформационной сети на геодинамическом полигоне промплощадки с учетом минимального их повреждения в процессе строительства и дальнейшей эксплуатации.

Требования указанного нормативного документа обязывают получить достаточно полную информативность результатов изысканий, что минимизирует возможность ошибочного принятия проектных решений. Однако, для некоторых требований и задач сложно достоверно отобразить ситуацию и местность в масштабе 1 : 500 и 1:200. Поэтому для таких участков целесообразно создавать топографические планы с элементами визуализации данных. Под элементами визуализации данных будем понимать цифровые снимки местности, цифровые модели местности и 3D-модели, на основании которых предполагается производить принятие проектных решений.

Также для решения данной задачи нами предлагается [90, 123] создавать цифровые инженерно-топографические планы с использованием данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов – квадрокоптеров, а именно ортофотопланы, фотоснимки и цифровые модели. Главное достоинство вышеперечисленных материалов – их дешевизна, скорость получения результатов, возможность использования в любой базе данных при помощи гиперссылок, малый объем файлов (за исключением цифровой модели), отсутствие субъективного фактора, а также достоверность полученных материалов.

Применение данных технологий позволяет получать материалы и для создания карт и планов более мелкого масштаба с целью:

– предварительного изучения района (радиусом примерно 100–200 км) возможного расположения АЭС;

– выбора и изучения нескольких вариантов расположения АЭС в пределах территории площадью100–150 км^2;

– окончательного выбора промплощадки под строительство площадью 8–10 км^2.

Так как основным методом изучения современных перемещений земной поверхности является высокоточное геометрическое нивелирование, то после выбора места расположения промплощадки проектируются линии проложения нивелирных ходов I и II классов с учетом возможного наличия тектонических разломов. При этом реперы должны закладываться на глубину, исключающую возможное влияние сезонных, климатических (замачивание) и техногенных факторов (влияние движения транспорта, исключение возможного изменения проекта, строительные работы) на их устойчивость. Применительно к АЭС с реакторами типа ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ и БН-800 куст реперов необходимо размещать в местах, на которых в зимний период будет минимальный снежный покров и будет свободный доступ к ним. При этом расстояние между реперами в среднем должно составлять 1,0–1,5 км.

Горизонтальные перемещения земной поверхности в настоящее время на промплощадках уникальных и ответственных инженерных сооружений определяются в основном спутниковыми технологиями и линейно-угловыми построениями. Для этого на промплощадке проектируются и закладываются пункты, в основном, с принудительным центрированием.

Спустя два месяца после закладки пунктов и реперов производится первый цикл наблюдений в рамках ведения геодинамического мониторинга за современными движениями земной поверхности.

В общем случае на промплощадке проводятся следующие виды мониторинга: геодинамический, геотехнический, гидрологический, гидрогеологический, сейсмический, аэрометеорологический и экологический.

В дополнение к указанным видам мониторинга обязательным является метрологическое обеспечение применяемых средств измерений. Кроме того, согласно п. 13.3 нормативного документа [107], при необходимости может проводиться дополнительная метрологическая поверка (калибровка) применяемого средства измерений.

Применительно к геодезическим работам после завершения инженерно-геодезических изысканий на стадии строительства и эксплуатации относятся геодинамический и геотехнический мониторинг, а также метрологическая поверка применяемых геодезических приборов.

Геодинамический мониторинг проводится с целью ведения контроля за состоянием земной поверхности на территории промплощадки и прилегающей территории с целью определения возможных негативных геологических процессов. Он проводится высокоточным геометрическим нивелированием и линейно-угловыми измерениями. Также производятся гравиметрические наблюдения [46, 98, 99].

Геотехнический мониторинг проводится с целью определения величин деформаций оснований фундаментов зданий и сооружений и их конструкций. При этом также применяются высокоточное геометрическое нивелирование и линейно-угловые измерения.

Периодичность и точность выполнения измерений регламентируется соответствующими нормативными документами или расчетами проектной организации. В конечном итоге эти параметры выполнения измерений указываются в программе производства инженерно-геодезических работ.

С учетом сказанного рассмотрим технологическую схему выполнения инженерно-геодезических работ на техногенных геодинамических полигонах АЭС.

Данная технологическая схема предусматривает определение деформационного состояния земной поверхности на промплощадке АЭС, а также особо опасных и технически сложных инженерных сооружений.

2.3 Анализ способов и схем создания планового обоснования на промплощадках АЭС линейно-угловыми построениями

Согласно требованиям нормативных документов [108, 109] требуется определение деформационного состояния инженерных сооружений и в горизонтальной плоскости с соблюдением цикличности. Для этого согласно п. 8.2 этого документа

при выполнении измерений могут применяться, спутниковые технологии, полигонометрия, микротриангуляция, трилатерация, створные измерения разными способами и линейно-угловые построения. Разрешается также применять комбинированные способы измерений, которые позволяют одновременно определять деформационное состояние сооружений в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

При организации геодезического обеспечения строительства и последующей эксплуатации указанного объекта целесообразно на начальной стадии создание двух типов обоснований, предназначенных:

– для целей проведения общестроительных работ;

– определения деформационного состояния инженерных сооружений в период их эксплуатации.

Создание на промплощадке обоснования первого типа может производиться следующими способами:

– с применением спутниковых технологий;

– линейно-угловыми построениями;

– комбинированным способом.

Применение спутниковых технологий на промплощадке позволяет уверенно определять координаты пунктов с СКО порядка 4,0–5,0 мм в зависимости от условий выполнения измерений. Спутниковые технологии применяются, в основном, для создания первичного обоснования (еще на стадии предварительного выноса основных осей в натуру). Также согласно п. 8.2.4.1 [109] применение спутниковых наблюдений за горизонтальными смещениями допускается при больших расстояниях до исходных пунктов или при отсутствии взаимной видимости между ними.

После начала производства земляных и разбивочных работ дополнительно начинают применяться наземные технологии в виде линейно-угловых построений [10, 63, 97, 100]. К таким линейно-угловым построениям можно отнести:

– полярную засечку (полярных координат);

– биполярную засечку;

– обратную линейно-угловую засечку;

– комбинированную засечку (обратную линейно-угловую и полярную засечки);

– высокоточные полигонометрические ходы.

Согласно требованиям нормативных документов [100, 103] основными этапами геодезических работ, выполняемых на промплощадке, являются:

– проведение комплекса инженерно-геодезических изысканий на территории выбранной промплощадки;

– создание внешнего и внутреннего разбивочного обоснования для выноса в натуру осей инженерных сооружений и зданий, а также обеспечения монтажа технологического оборудования;

– производство детальных разбивочных работ для монтажа применяемых строительных конструкций;

– вынос осей в натуру технологического оборудования;

– периодический геодезический контроль геометрических параметров инженерных сооружений в процессе их строительства;

– геодезические измерения для обеспечения деформационного мониторинга конструкций инженерных сооружений и применяемого технологического оборудования.

Для целей проведения инженерно-геодезических изысканий требования к точности создания обоснования приведены в таблице 1.11, а для проведения разбивочных работ на промплощадке требования к точности выполнения инженерно-геодезических измерений – в таблице 1.12.

Как уже указывалось выше, при тщательном применении спутниковых технологий СКО определения координат пунктов внешнего обоснования может составлять 4,0–5,0 мм в зависимости от размеров промплощадки и степени стабильности заложенных в грунте пунктов. При наличии неустойчивых, а также вечномерзлых грунтов, стабильность некоторых пунктов обоснования нарушается, порой значительно, и их положение может измениться до 10,0–20,0 мм. В связи с этим часто производится переопределение их координат. Поэтому применение

спутниковых технологий для деформационного мониторинга, в целом ряде случаев, ограничивается СКО определения координат. Если необходимая точность измерений будет меньше 3,0 мм, то необходимо будет применять линейно-угловые построения. Поэтому получаемая точность определения координат спутниковыми технологиями часто не соответствует требованиям проекта при детальной разбивке осей элементов строительных конструкций или технологического оборудования. Кроме того, необходимо будет учитывать наличие многопутности сигнала.

В связи с этим для ведения последующего деформационного мониторинга рассматриваемого особо опасного и технически сложного объекта требуется повышенная точность (в отличие от требований к точности, приведенной в таблицах 1.13, 1.14) определения координат пунктов обоснования, а затем элементов строительных конструкций и применяемого технологического оборудования. В связи с этим рассмотрим возможности повышения точности измерений с применением линейно-угловых построений с применением высокоточных тахеометров. При этом будем учитывать тот факт, что при ведении деформационного мониторинга ряд источников ошибок не влияют на точность измерений или компенсируются в циклах измерений.

Способ полярных координат. Применение способа полярных координат удобно в тех случаях, когда имеется возможность установки тахеометра с принудительным центрированием на исходном пункте *A* (рис. 2.8, *а*) обоснования и визирования на другой пункт *B*. С одного пункта можно выносить в натуру точки (оси) ближайших различных по назначению строительных конструкций инженерных сооружений (подземных коммуникаций) и технологического оборудования, а также вести деформационный мониторинг в каждом цикле наблюдений.

В общем случае величина СКО определения координат наблюдаемой точки *a* выразится формулой

$$m_{раз.} = \sqrt{m_l^2 + (\frac{m_\beta}{\rho})^2 \cdot l^2 + m_{\text{ц.р.}}^2 + m_{\text{исх.}}^2 + m_{\text{фик.}}^2} \qquad (2.1)$$

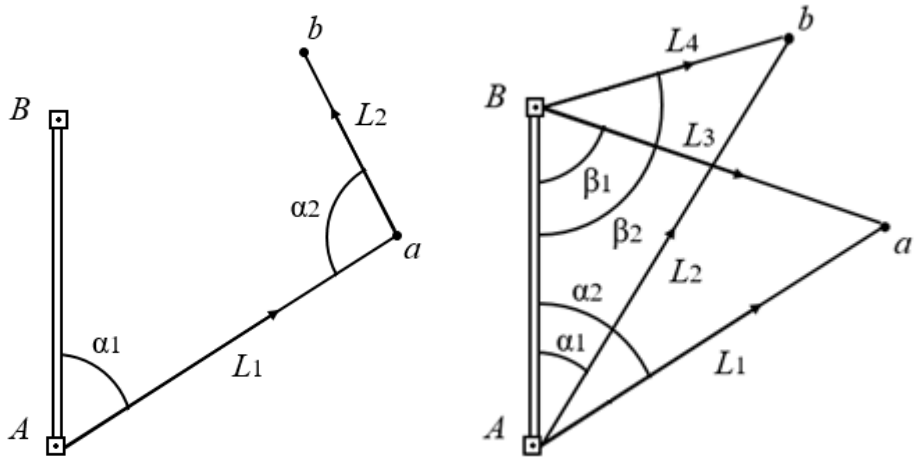
где m_l – ошибка измерения расстояния;

$m_{\text{исх.}}$ – ошибка исходных данных;

$m_{ц.р.}$– ошибки центрирования и редукции;

m_{β} – ошибка измерения угла;

$m_{фик.}$ – ошибка фиксации выносимой точки.



а) *б*)

Рисунок 2.8 – Реализация способа полярных координат

Так как при ведении деформационного мониторинга за объектами рекомендуется применять принудительное центрирование и положение деформационной марки на сооружении не изменяется, то при применении постоянно закрепленных отражателей или светоотражающих пленок влияние ошибки $m_{ц.р.}$ за центрирование и редукцию будет отсутствовать. Также будет отсутствовать ошибка за фиксацию выносимой точки.

Величина ошибки исходных данных в данном случае будет представлять собой взаимную нестабильность пунктов обоснования между циклами измерений.

Тогда, принимая m_l = 1,0 мм, m_{β} =1,0″ и остаточное влияние нестабильность пунктов обоснования $m_{нестаб}$ = 0,5 мм, получим величины ошибок измерений одним приемом, (таблица 2.3). Если измерения выполнять тремя приемами, то величина СКО уменьшится.

Таблица 2.3 – Значения СКО измерений

Параметры расчета $m_\beta = 1{,}0''$, $m_l = 1{,}0$ мм	Расстояние (м)							
	10,0	20,0	30,0	50,0	100,0	150,0	200,0	250,0
Величина СКО, мм	1,12	1,12	1,13	1,14	1,22	1,33	1,48	1,65

Величины СКО при $m_l = 2{,}0$ мм, $m_\beta = 2{,}0''$ и $m_{нестаб} = 0{,}5$ мм даны в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения СКО измерений

Параметры расчета $m_\beta = 2{,}0''$, $m_l = 2{,}0$ мм	Расстояние (м)							
	10,0	20,0	30,0	50,0	100,0	150,0	200,0	250,0
Величина СКО, мм	2,06	2,07	2,08	2,12	2,28	2,52	2,83	3,18

В целом ряде случаев в стесненных условиях выполнить определение координат определяемого пункта (деформационной марки), например, *b* с одного исходного пункта не представляется возможным. В этом случае сначала определяется положение переходной точки *a*, а затем марки *b* (величина СКО ее положения будет находиться по формуле (2.1)). Тем самым к марке *b* будет прокладываться висячий ход и величина СКО определения ее координат увеличится.

Способ биполярных координат. Реализация данного способа (рисунок 2.8, *б*) позволяет производить контроль координат выносимых точек (деформационных марок) *а* и *б* путем выполнения измерений с двух исходных пунктов *A* и *B*. Так как определение будет производиться с двух пунктов, то СКО получения координат будет меньше.

Способ обратной линейно-угловой засечки. В настоящее время данный способ получил широкое применение на промплощадке при решении следующих задач [1, 14, 24, 25, 78, 115]:

– создание (сгущение) обоснования;

– производство разбивочных работ способом приближений;

– определение деформационного состояния инженерных сооружений (при установке тахеометра на пункте деформационной сети).

При таком способе измерений достаточно наличие как минимум двух исходных пунктов. В основном на производстве используется два пункта, так как видимость на третий (четвертый) пункт может отсутствовать из-за выполняемых различных строительных работ. При измерении расстояний и горизонтальных направлений более чем на три и более пункта увеличивается жесткость геодезического построения, что является подтверждением и повышением точности положения определяемого пункта.

На промплощадке между исходными пунктами расстояние обычно относительно не превышает 100–150 м. Выполним предрасчет точности положения определяемой (деформационной марки) точки при 2 и 3 исходных пунктах. Расчет выполним по формуле [1, 14, 24, 25]

$$m = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{S_{\text{мед.}}}{S_{\text{исх.}}} (m_s^2 + S_{\text{мед.}}^2 \cdot \frac{m_\beta^2}{\rho})}, \qquad (2.2)$$

где n – количество исходных пунктов; $S_{\text{мед.}}$ – медианное значение измеряемого расстояния (среднее значение); $S_{\text{исх.}}$ – расстояние между исходными пунктами; m_S – СКО измерения расстояния; m_β – СКО измерения угла.

При расчете примем $S_{\text{исх.}}$ между сходными пунктами равным 100,0 м, а между определяемыми пунктами – 200,0 м. Тогда среднее значением будет равно 100 и 150 м. Измеряемые расстояния от тахеометра до каждого исходного пункта примем равным 80, 90 и 100 м, соответственно. Тогда $S_{\text{мед.}}$ будет равна 85 и 90 м. При СКО измерения расстояния m_S = 2,0 мм (при измерении на призменный отражатель), СКО измерения угла m_β 2,0″, m_S равным 3,0 мм (при измерении на пленочный отражатель), а m_β 2,0″ получим результаты, представленные в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчетов оценки точности определения координат искомого пункта обратной линейно-угловой засечкой

Параметры расчета				Величина СКО, мм
Параметры точности	Количество исходных пунктов	$S_{мед.}$, м	$S_{исх.}$, м	
m_S = 2,0 мм, m_β = 2,0″	2	85,0	100,0	1,4
	3	90,0	150,0	1,0
m_S = 3,0 мм, m_β = 2,0″	2	85,0	100,0	2,4
	3	90,0	150,0	1,7

Как видно из таблицы 2.5, при увеличении количества исходных пунктов до трех точность определения координат искомого пункта обратной линейно-угловой засечкой возрастает. Рассчитанной выше точности достаточно для развития (сгущения) геодезической основы на промплощадке.

Также при расчете можно пользоваться известными формулами (без учета влияния ошибок $m_{ц.р.}$, $m_{фик.}$ и $m_{исх.}$)

$$m_{x_i} = \sqrt{m_s^2 cos_\alpha^2 + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} S_i sin_\alpha^2}, \quad (2.3)$$

$$m_{yi} = \sqrt{m_s^2 sin_\alpha^2 + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} S_i cos_\alpha^2}, \quad (2.4)$$

где α – дирекционный угол линии.

Полученные значения ошибок приведены в таблице 2.6.

При использовании формул (2.2) и (2.3) не учитывалось влияние внешних условий, к которым относятся боковая рефракция, в летний период – турбулентность воздуха, вибрация от работающей рядом строительной техники и метеоусловия. Это влияние, в зависимости от расстояния, может достигать 2,0–3,0 мм.

Таблица 2.6 – Результаты расчетов оценки точности определения координат искомого пункта обратной линейно-угловой засечкой

При параметрах точности ms = 2,0 мм m_α = 2,0″						
Параметры точности	Расстояние, м					
	20	30	80	100	150	200
m_x (мм)	1,64	1,65	1,70	1,73	1,84	1,98
m_y (мм)	1,16	1,17	1,31	1,40	1,65	1,96
При параметрах точности ms = 3,0 мм mα = 2,0″						
m_x (мм)	2,46	2,46	2,50	2,52	2,60	2,70
m_y (мм)	1,73	1,74	1,83	1,90	2,09	2,34

Из сравнения таблиц 2.5 и 2.6 следует, что получаемые величины СКО определения координат (измерения расстояний) значительно меньше, чем указывается в нормативных документах [100, 103].

Комбинированный способ. Данный способ реализуется путем последовательного использования способов обратной линейно-угловой засечки и полярных координат. При его реализации сначала способом обратной линейно-угловой засечки определяются координаты точки *К* стояния тахеометра, а затем, способом полярных координат, – положение выносимых точек (деформационных марок) 1, 2, …, *n*. В этом случае СКО положения деформационных марок можно в первом приближении выразить формулой

$$m^2 = m^2_{\text{обр.зас}} + m^2_{\text{пол.зас}}, \qquad (2.5)$$

где $m_{\text{обр. зас.}}$ – СКО определения координат точки *К* стояния тахеометра обратной линейно-угловой засечкой;

$m_{\text{пол. зас.}}$ – СКО определения координат выносимых точек (деформационных марок) 1, 2, 3 полярной засечкой.

Если принять, например, для расстояния до деформационной марки 30,0 м величины СКО, соответственно, 1,5 и 0,6 мм, то получим (без учета накопления ошибок и влияния внешних условий) $m_{\text{точ}}$ = 1,6 мм.

Способ цепочек обратных-линейно угловых засечек. В работах [2, 24, 25] рассматривается способ построения (сгущения) обоснования на промплощадке путем прокладывания хода в виде цепочек, состоящих из последовательных линейно-угловых засечек (рисунок 2.9). При реализации данного способа развитие обоснования производится путем последовательного определения координат предыдущих в ходе пунктов сети. При этом в качестве исходных пунктов в ходе может использоваться два пункта, например А и В, или несколько пунктов.

Реализация данного способа может осуществляться с использованием следующих схем выполнения измерений:

– с привязкой конечной точки хода к двум исходным пунктам *C* и *D* (рисунок 2.9, *а*);

– с привязкой конечной точки хода к одному исходному пункту С (рисунок 2.9, *б*);

– без привязки конечной точки хода к исходным пунктам (рисунок 2.9, *в*).

Для удобства реализации данного способа в качестве связующих пунктов 1, 2, 4, 5, 8, 9 и т. д. хода целесообразно использовать светоотражающие пленки и измерения выполнять в безотражательном режиме.

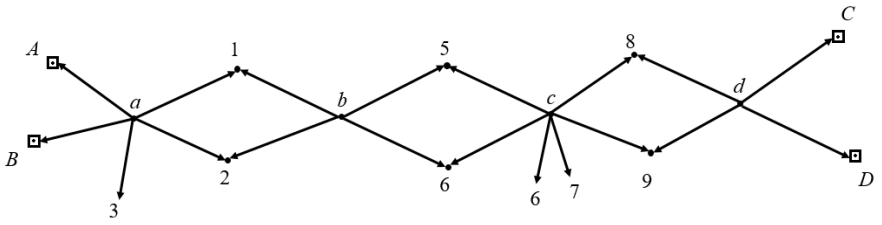
Одновременно с прокладыванием такого хода могут выполняться разбивочные работы, например, вынос точек 3, 6, 7. В этом случае могут быть следующие варианты выполнения разбивочных работ:

– вынос точек в натуру производится непосредственно в процессе выполнения измерений без уравнивания всего хода;

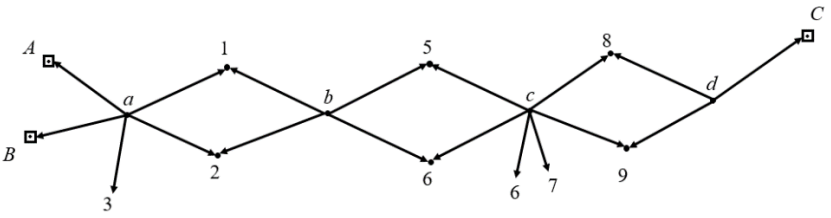
– вынос точек в натуру производится после уравнивания всего хода.

В первом случае после определения координат точки *а* стояния тахеометра и оценки точности их получения на станции, например, *а* производится вынос способом полярных координат точки 3 строительной конструкции инженерного сооружения, а затем определение координат точек 1 и 2 хода. Можно, конечно, выполнить сначала определение координат точек 1 и 2 хода, а затем произвести вынос точки 3.

а)



б)



в)

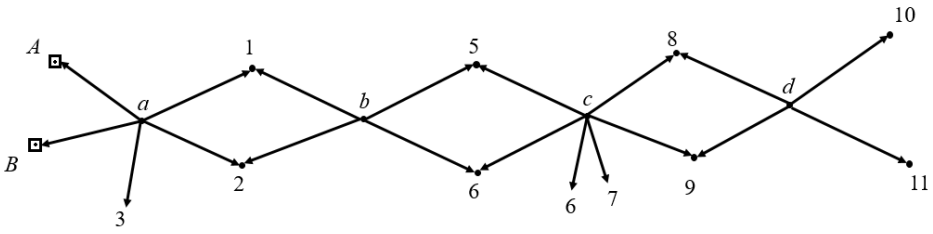


Рисунок 2.9 – Схема развития обоснования цепочкой обратных линейно-угловых засечек

При этом полученные координаты выносимых точек принимаются за окончательные. Затем аналогичным образом производятся и последующие измерения в ходе.

Данный вариант выноса точек в натуру на промплощадке во время строительства инженерного сооружения применяется очень часто, так как монтаж строительных конструкций производится непрерывно и требуется быстрое определение их координат. Необходимо отметить, что привязка к конечным исходным пунктам в данном случае производится только после завершения прокладывания хода.

Во втором случае сначала прокладывается ход между исходными пунктами, вычисляется невязка, затем производится уравнивание точек хода a, b, c, d, 1,2, 4, 5, 8, и 9, после чего, с учетом исправленных (уравненных) координат, выполняется вынос точек 3, 6 и 7 в натуру.

Очевидно, что в данном случае будет определенный промежуток времени между измерениями в ходе и выносом точек в натуру, что в условиях непрерывного строительства не всегда бывает приемлемо.

При реализации схемы, приведенной на рисунке 2.9, *а* привязка хода производится к двум исходным пунктам, а с использованием схемы рисунка 2.9, *б* – к одному.

Из рассмотренных схем прокладывания хода наиболее неблагоприятной является схема, приведенная на рисунке 2.9, *в*. Поэтому применять ее необходимо в крайнем случае, когда на промплощадке в данном месте нет конечных исходных пунктов.

Важным фактором, влияющим на величину СКО определения координат выносимых пунктов (разбивочных точек), является величина ошибки исходных данных. Эта ошибка имеет место на каждой последующей ступени создания обоснования и при производстве разбивочных работ (деформационного мониторинга). При использовании схемы развития обоснования цепочкой обратных линейно-угловых засечек, показанной на рисунке 2.9, влияние ошибки исходных данных будет на каждой ступени. Авторами работы [2] на примере схемы (рисунок 2.10) была установлена зависимость величины СКО определения координат для каждой ступени развития обоснования путем развития цепочки обратных линейно-угловых засечек. Рассмотрим данный вопрос на примере работы [2].

Как указано в рассматриваемой работе [2], пусть в такой сети исходными пунктами на промплощадке выступают пункты П1, П2 и П3 внешнего обоснования и они являются *первой ступенью*. После определения координат пункта Т1 стояния тахеометра он становится *второй ступенью* обоснования. Затем с пункта П1, полярным способом выносятся разбивочные точки М1, М2, М3 и они будут являться уже *третьей ступенью*. С использованием пунктов М1, М2, М3 будет получен пункт Т2 *четвертой ступени*, с которого способом полярной засечки создаются пункты М4 и М5 *пятой ступени*. Опираясь на эти, пункты можно определить координаты пункта Т3 *шестой ступени*.

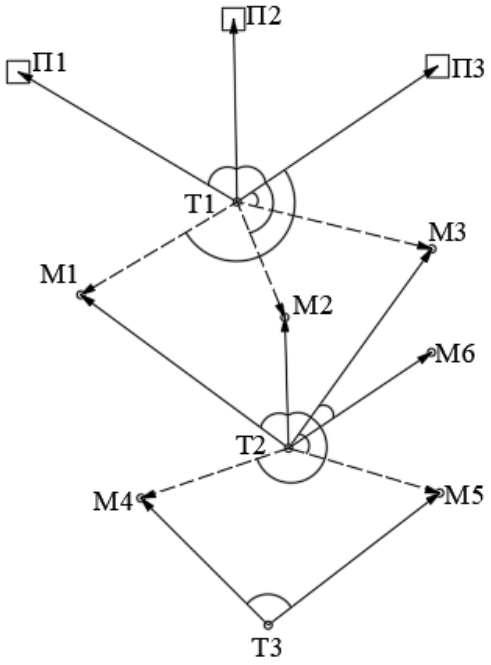


Рисунок 2.10 – Схема создания обоснования цепочкой обратных линейно-угловых засечек

Если принять положение исходных пунктов П1, П2 и П3 *первой ступени* с ошибкой порядка 2,0–3,0 мм, то величины СКО положения пункта Т1 *второй ступени* и разбивочных точек М1, М2 и М3 *третьей ступени* будут равны (таблица 2.7), а для *шестой ступени* величины СКО уже будут равны М = 14,7 мм, Мх = 9,4 мм и Му = 11,3 мм [2].

Таблица 2.7 –Величины СКО положения пункта Т1 второй ступени и разбивочных точек М1, М2 и М3 (взята из [2])

Пункт	М (мм)	Мх (мм)	Му (мм)
1	2	3	4
Т1	3,4	1,9	2,8
М1	6,5	4,1	5,0
М2	6,6	4,2	5,1
М3	6,7	4,4	5,1

Таким образом, данный пример создания обоснования показывает, что при производстве разбивочных работ на промплощадке или определении деформационного состояния инженерных сооружений необходимо иметь в виду факт значительного накопления величин СКО координат на каждой ступени. Получаемые величины СКО в целом ряде случаев не позволят обеспечить необходимую точность, например, при выносе в натуру главных и основных осей инженерных сооружений, а также осей технологического оборудования при их детальной разбивке и деформационном мониторинге инженерных сооружений.

В связи с этим высокоточные разбивочные работы и ведение деформационного мониторинга необходимо производить в условной системе координат. Если при этом будут использоваться пункты последней ступени, то их необходимо снова переопределить в условной системе координат с необходимой точностью.

Данная ситуация, как правило, часто возникает при проведении строительно-монтажных работ, когда после создания и уравнивания первоначального обоснования на промплощадке в дальнейшем разбивочные работы выполняются без периодического уравнивания всей сети и развиваются последовательно отдельными ходами, например, при разбивке центров колонн турбинного или котельного отделений, длина которых доходит до 360–420 м. Также по такой схеме производятся разбивочные работы и при монтаже технологического оборудования, например, вынос осей фундамента турбоагрегата и его цилиндров. При этом длины фундаментов турбоагрегатов мощностью 500 МВт и более могут доходить до 55,0–60,0 м, а число выносимых точек с СКО порядка 1,0–2,0 мм (с учетом влияния внешних возмущающих факторов) до 45–50.

Способ полигонометрии. В настоящее время данный способ создания обоснования на промплощадке применяется значительно реже, чем 15–20 лет назад. Это в значительной степени обусловлено применением рассмотренных выше способов, а также спутниковых технологий. Вместе с тем, при создании внутреннего высокоточного обоснования с короткими, до 10–15 м, сторонами и принудительным центрированием тахеометра при возведении уникальных инженерных сооружений и монтаже технологического оборудования, например, реакторного отделения АЭС

с реакторами ВВЭР-1200 данный способ является наиболее приемлемым по точности получения координат (СКО порядка 1,0–1,5 мм) и удобству выполнения измерений.

Учитывая возможности современных высокоточных тахеометров, данный способ полигонометрии с короткими лучами, при необходимости, позволяет прокладывать полигонометрические ходы для определения деформационного состояния земной поверхности на техногенных геодинамических полигонах.

Таким образом, при длинах сторон до 200,0 м СКО определения координат разбивочных (деформационных) пунктов линейно-угловыми построениями можно уверенно уменьшить до 1,5–2,0 мм. Это позволит, кроме производства строительно-монтажных работ, выполнять и деформационный мониторинг строительных конструкций на этапе строительства и последующей эксплуатации инженерных сооружений, что особенно важно для особо опасных и технически сложных сооружений.

2.4 Разработка технологической схемы создания планово-высотного обоснования на ТГП объектов атомной промышленности

Кроме геодинамических полигонов, предназначенных для наблюдения только за современными движениями земной коры на значительных территориях, создаются техногенные полигоны, предназначенные для наблюдений за вертикальными движениями земной поверхности, вызванными работой различных (линейных и площадных) инженерных сооружений. Эти техногенные полигоны предназначены для наблюдения за деформационным состоянием земной поверхности в местах расположения различных ответственных инженерных сооружений.

В целом ряде случаев ответственные инженерные сооружения, особенно линейные, располагаются на неустойчивых грунтах. Например, нефте- и газопроводы на территории Западной Сибири и на Крайнем Севере прокладываются по болотистым территориям. Тем не менее, для обеспечения их эксплуатации также создаются техногенные геодинамические полигоны с целью определения деформаций трубопроводов. Эти дефор-

мации (изгибы или порывы) вызываются оттаиванием или локальным морозным пучением грунта.

В отличие от линейных инженерных сооружений, площадные сооружения проектируются, в основном, на устойчивых грунтах. В отдельных случаях неустойчивые грунты под такими сооружениями укрепляются свайными фундаментами.

Одной из основных задач обеспечения безопасной эксплуатации таких ответственных инженерных сооружений, как АЭС, ГЭС или ТЭС, является тщательный выбор промплощадки, которая удовлетворяет геологическим требованиям по прочности грунтов, уровню грунтовых вод и сейсмостойкости.

Необходимо отметить, что площади исследования деформационных процессов, происходящих на АЭС или ГЭС, значительно различаются по величине. Так, для ГЭС площадь, на которой создается техногенный геодинамический полигон, может составлять 1 000–1 500 км^2, в то время как для АЭС всего 5–10 км^2 (в зависимости от числа энергоблоков).

Вместе с тем во время строительства инженерных сооружений происходит нарушение устойчивости грунтов на значительной площади (1,0–1,5 км^2) и возможное их замачивание, которое приводит к изменению их состава, следовательно, к изменению расчетных величин осадок и деформаций фундаментов этих сооружений. Поэтому при разработке проекта на строительство особо опасных и технически сложных инженерных сооружений предусматривается выполнение высокоточных инженерно-геодезических работ по определению:

– горизонтальных и вертикальных движений земной коры (ее приповерхностных слоев) на территории промплощадки;

– осадок и деформаций фундаментов инженерных сооружений, а также применяемого на них технологического оборудования.

Кроме того, по результатам выполненных измерений должен производиться прогноз развития деформационного процесса и его влияние на эксплуатируемые инженерные сооружения.

Для решения данных задач на промплощадках таких инженерных сооружений создаются высотные геодинамические полигоны, которые включают в себя схемы

планово-высотного обоснования, количество пунктов и их конструкцию, а также их размещения.

На основании анализа изученных методов и средств измерений нами была разработана технологическая схема производства высокоточных инженерно-геодезических работ на создаваемых ТГП строящихся АЭС (рисунок 2.11) с реакторами различной конструкции. Для решения этой научно-технической задачи предложено в комплексе использовать спутниковые технологии, высокоточное геометрическое и тригонометрическое нивелирование и линейно-угловые построения. При проектировании и построении ТГП предлагается реализовывать следующие научно-методические принципы.

Рисунок 2.11 – Предлагаемая технологическая схема выполнения инженерно-геодезических работ на техногенных геодинамических полигонах АЭС

1 Пункты ТГП необходимо устанавливать на устойчивом геологическом основании в местах, обеспечивающих их долговременную сохранность и с учетом возможного наличия на промышленной площадке АЭС локальных тектонических разломов.

2 Независимо от проектируемых схем измерений между пунктами ТГП, по возможности, должна быть обеспечена прямая оптическая видимость с учетом местоположения строительства новых инженерных сооружений АЭС, особенно для пунктов, расположенных в пределах локальных тектонических разломов.

3 Для исключения ошибок за центрирование средств измерений обеспечить пункты ТГП центрами с принудительным центрированием, обеспечивающими $m_{\text{центр}}$ не более 0,10 мм.

4 Учитывая сложные условия выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений, метрологическую поверку тахеометров выполнять непосредственно на промышленной площадке по разработанным схемам методом сличения без применения эталонных линейных базисов.

5 При априорно неизвестной скорости движения земной поверхности в пределах промышленной площадки АЭС за наиболее технологическую схему следует принять такую, которая обеспечит наивысшую точность определения плановых координат пунктов ТГП.

6 При выполнении всех последующих циклов высокоточных геодезических измерений выполнять анализ стабильности положения пунктов ТГП.

7 Для поддержания единого координатного пространства промышленной площадки АЭС в актуальном состоянии с учетом сейсмической активности района реализовать совмещенную цикличность всей совокупности высокоточных геодезических измерений как при создании ТГП, так и при деформационном мониторинге особо опасных и технически сложных инженерных сооружений.

8 Корректировать интервал времени Δt между циклами геодезических измерений в зависимости от скорости развития динамических процессов земной поверхности и деформационного состояния инженерных сооружений на промышленной площадке.

С учетом современного уровня развития геодезического приборостроения создание на промплощадках геодезических построений производится с применением спутниковых технологий, линейно-угловых построений и нивелированием различных классов точности. В целом ряде случаев пункты плановой и высотной сетей совмещаются. На рисунке 2.12 приведена схема такой сети промплощадки АЭС, плановые пункты и глубинные реперы которой совмещены.

Необходимость в таком совмещении обусловлена тем, что промплощадки технически сложных и особо опасных инженерных сооружений сильно загружены сооружениями различного назначения, а также подземными и наземными коммуникациями. Кроме того, в процессе строительства часто происходят изменения в схеме расположения инженерных сооружений, что может привести к уничтожению пунктов обоснования. Поэтому с учетом современного уровня развития геодезического приборостроения целесообразным является уменьшение на промплощадке количества пунктов обоснования и расположения их в местах, на которых вероятность размещения дополнительных инженерных сооружений не велика. При этом точность получаемых результатов измерений не уменьшается.

Применительно к промплощадкам особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, кроме обеспечения строительства, дополнительно развиваются высокоточные плановые и высотные построения для целей создания техногенных геодинамических полигонов с последующим ведением деформационного мониторинга земной поверхности и расположенных на ней этих сооружений. В настоящее время они, как правило, создаются:

– спутниковыми технологиями с СКО определения координат пунктов сети порядка 3,0–4,0 мм;

– высокоточными линейно-угловыми построениями;

– комбинированными спутниковыми и высокоточными линейно-угловыми построениями.

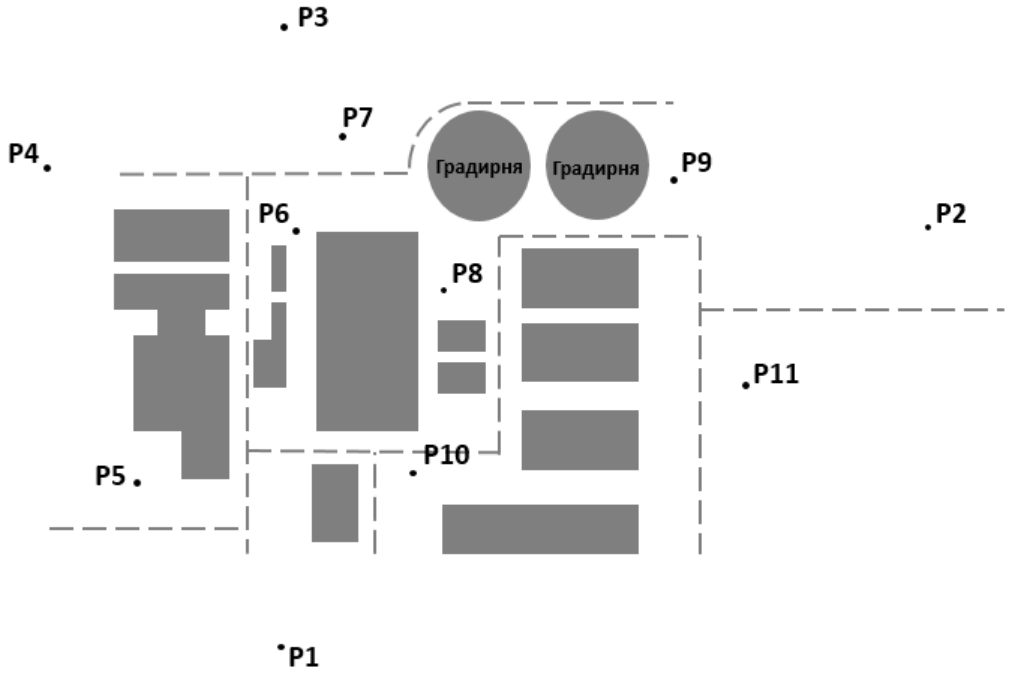


Рисунок 2.12 – Схемы расположения пунктов обоснования и глубинных реперов на ТГП объекта атомной промышленности

Важным моментом при создании высокоточной плановой сети на геодинамическом полигоне является выбор конструкции ее пунктов. Их конструкция может предусматривать расположение верхней части на уровне земли с последующим центрированием применяемых приборов или пунктов с принудительным центрированием. С целью исключения ошибок за центрирование и, следовательно, повышения точности измерений на геодинамическом полигоне могут применяться пункты с принудительным центрированием [71], внешний вид которого приведен на рисунке 2.13.

Высота таких пунктов обоснования на промплощадке геодинамического полигона с принудительным центрированием равна 1,0–1,2 м, что способствует уменьшению влияния рефракции приземного слоя атмосферы на высокоточные угловые измерения, а также измерения превышений. Вместе с тем, такая высота пунктов требует выполнения нивелирования с высокого штатива. Однако, в этом случае возникают определенные затруднения в обеспечении установки рейки в вертикальное положение, а также в выполнении визирование на низ штрихкодовой рейки

для взятия по ней отсчета (высота визирного луча над пяткой должна быть не меньше 200,0 мм).

Рисунок 2.13 – Пример внешнего вида совмещенного пункта на создаваемом техногенном геодинамическом полигоне АЭС

Для определения деформационного состояния инженерных сооружений АЭС на промплощадках развивается высотная сеть с целью создания техногенного геодинамического полигона, состоящая из 10–12 кустов глубинных реперов и реперов, расположенных по линиям нивелирного хода. При размещении глубинных реперов на промплощадке необходимо выполнять следующие требования:

– глубинные реперы должны располагаться в местах минимального влияния экзогенных процессов;

– расстояние до инженерных сооружений не должно быть не меньше 2/3 его высоты или согласно требованиям п. 7.4.3.4 нормативного документа [109] это расстояние не должно быть меньше тройной глубине заложения фундамента наблюдаемого инженерного сооружения;

– располагаться реперы должны в местах, которые позволят обеспечить их сохранность как на период возведения инженерного сооружения, так на период его эксплуатации;

– при этом должно учитываться наличие существующих и проектируемых подземных коммуникаций;

– по возможности, их необходимо располагать в местах, удобных для привязки к ним также и осадочных марок, расположенных на инженерном сооружении и

применяемом технологическом оборудовании.

Таким образом, общим требованием, предъявляемым к расположению реперов, является обеспечение их стабильности, что позволит получить более качественные результаты по характеру и величине движения земной поверхности и, в конечном итоге, к деформационному состоянию инженерных сооружений.

Если проектом строительства предусматривается использование совмещенных пунктов как на стадии строительства инженерного сооружения, так и на стадии его эксплуатации, то также может быть применена рекомендуемая авторами работы [97] конструкция универсального пункта с принудительным центрированием, изготовленного на основе забитой сваи на глубину не менее 6,0 м, приведенная на рисунке 2.14. Достоинством такого пункта является также возможность использования его и для общестроительных инженерно-геодезических измерений путем выполнения линейно-угловых измерений с использованием светоотражающих пленок, наклеенных по бокам сваи. Для выполнения нивелирования внизу сваи закрепляется марка.

Рисунок 2.14 – Конструкция универсального геодезического пункта

Такие универсальные пункты, изготовленные на основе забитой сваи, позволяют выполнять следующие высокоточные инженерно-геодезические измерения:

– высокоточное геометрическое нивелирование I и II классов, а также геометрическое нивелирование короткими лучами;

– спутниковые определения;

– создавать высокоточное плановое обоснование путем линейно-угловых построений различной конфигурации;

– высокоточное тригонометрическое нивелирование короткими лучами.

Достоинством совмещенных и универсальных пунктов является удобство выполнения измерений в зимнее время при наличии значительного снежного покрова. Кроме того, такая конструкция пунктов практически исключает случайное повреждение или даже их уничтожение даже на стадии строительства, так как они визуально хорошо различимы на промплощадке.

2.5 Разработка методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений при создании плановой деформационной сети на техногенном геодинамическом полигоне АЭС

Выше указывалось, что при создании геодезического обоснования на промплощадках в настоящее время применяются два метода измерений: спутниковые технологии и традиционные линейно-угловые построения (высокоточная полигонометрия, обратная линейно-угловая и полярная засечки, а также их комбинации).

Спутниковые технологии несомненно позволяют оптимизировать полевые геодезические работы при создании обоснования, так как не требуется видимость между смежными пунктами. В связи с этим, применение спутниковых технологий при создании обоснования на промплощадках является эффективным способом, когда по условиям технического задания и проекта производства геодезических работ (ППГР) нет необходимости в выполнении высокоточных геодезических определений взаимного положения смежных пунктов с СКО порядка 1,0–2,0 мм. При наличии таких требований, в нашем случае для деформационного мониторинга земной поверхности на техногенном геодинамическом полигоне с целью определения перемещений отдельных блоков (участков) земной поверхности, могут быть применены линейно-угловые построения.

В общем виде способы выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений на техногенных геодинамических полигонах могут быть следующие (рисунок 2.15):

– спутниковые технологии [3, 19, 48, 92, 134, 136];

– полигонометрия с короткими сторонами и принудительным центрированием;

– обратная линейно-угловая засечка;

– полярная засечка;

– отдельные измерения расстояний между пунктами.

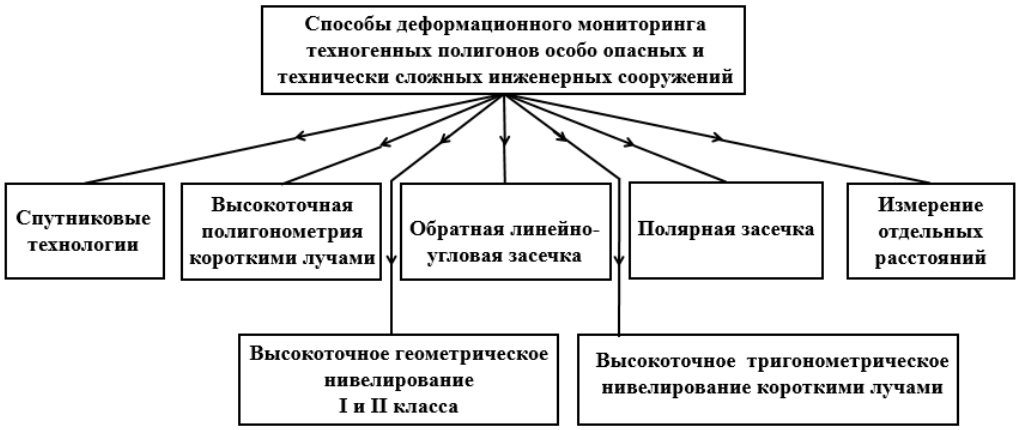


Рисунок 2.15 – Способы выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений на ТГП АЭС

1 Основные требования при реализации спутниковых технологий:

– применение метрологически поверенного оборудования;

– принудительное центрирование;

– измерение на пункте в режиме «Статика» не менее трех часов;

– отсутствие рядом с пунктами сети линий ЛЭП и высотных зданий;

– отсутствие в непосредственной близости высоких деревьев, башенных кранов, работающего сварочного оборудования;

– для горизонтирования приемников дополнительное применение цилиндрического уровня.

2 Основные требования для высокоточной полигонометрии:

– пункты не должны находиться в непосредственной близости к зоне производства земляных работ;

– длины сторон не более 400,0 м;

– СКО измерения расстояния и горизонтальных углов не хуже, соответственно, m_s = 1,0–1,5 мм и m_β = 1,0";

– измерение углов не менее чем тремя приемами;

– выполнение измерений при благоприятных внешних условиях;

– принудительное центрирование тахеометра и отражателя;

– метрологическая поверка тахеометра и отражателя.

3 Основные требования к засечкам:

– СКО измерения расстояния и горизонтальных углов не хуже, соответственно, m_s = 1,0–1,5 мм и m_β = 1,0";

– выполнение измерений при благоприятных внешних условиях;

– принудительное центрирование тахеометра и отражателя.

– длины сторон не более 250,0–300,0 м;

– измерение углов не менее чем тремя приемами;

– при решении обратной линейно-угловой засечки ориентирование не менее чем на три исходных пункта;

– метрологическая поверка тахеометра и отражателя.

4 При измерении отдельного расстояния должен применяться поверенный высокоточный тахеометр и отражатель с СКО измерения расстояния не хуже m_s = 1,0–1,5 мм.

С учетом этих требований для промплощадки строящегося объекта атомной энергетики с применением разработанной технологической схемы (см. рисунок 2.11) можно применять следующие способы выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений:

– высокоточную полигонометрию короткими лучами [22];

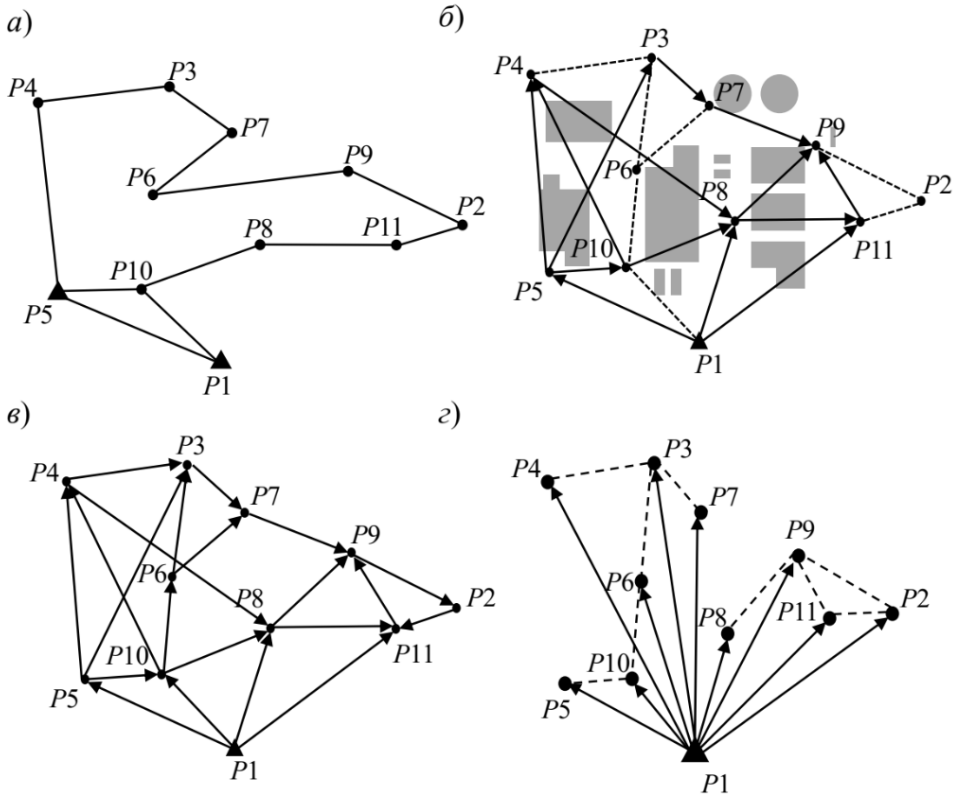
– обратную линейно-угловую и биполярную засечки;

– статические спутниковые определения;

– измерение отдельного расстояния.

Согласно п. 9.2.5.1 [109] для оценки стабильности плановой сети используются значения горизонтальных проложений и направления (дирекционные углы).

Варианты расположения пунктов на промплощадке для применения указанных способов измерений одинаковы, но запланированы разные схемы выполнения измерений (рисунок 2.16). Необходимость создания разных схем измерений обусловлена тем, что в начале строительства практически всегда между пунктами сети имеется прямая видимость. В дальнейшем, в процессе строительства, как правило, между частью пунктов сети прямая видимость перестает существовать. В этом случае могут применяться временные переносные промежуточные пункты или измерения должны выполняться на локальных участках сети ТГП. Схема расположения временных промежуточных пунктов приведена на рисунке 2.17.



Условные обозначения:

– изменения, выполненные тахеометром; – измерения, выполненные с использованием GNSS-технологии; – измерения, выполняемые тахеометром для контроля точности GNSS-технологий

Рисунок 2.16 – Варианты схем построения ТГП на промплощадке АЭС

Необходимость в переносных пунктах обусловлена тем, что в условиях загруженности промплощадки переходные точки приходиться размещать в местах, где проходят подземные коммуникации или дороги.

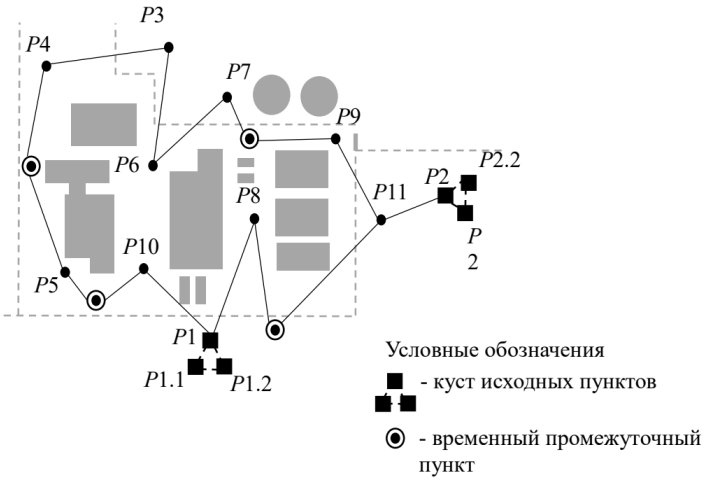


Рисунок 2.17 – Схема расположения временных промежуточных пунктов

В качестве таких пунктов может применяться цельный деревянный штатив 2, установленный на заранее подготовленное бетонную площадку 1 размером порядка 1,0 х 1,0 м (рисунок 2.18, *а*) или переносная тумба 2 (рисунок 2.18, *б*), также устанавливаемая на бетонную площадку, которая закрепляется анкерными болтами 3.

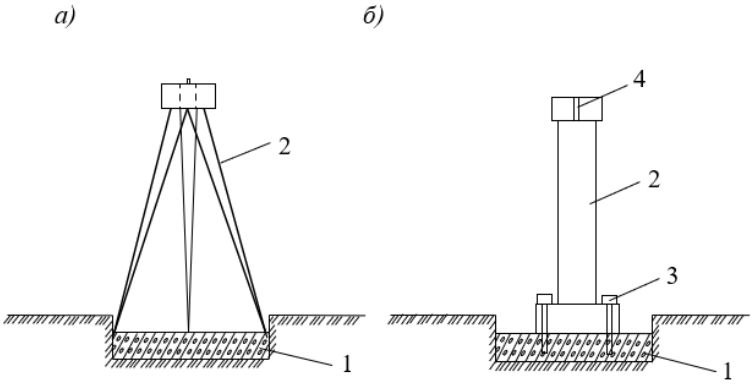


Рисунок 2.18 – Схемы переносных временных пунктов

1 – бетонная площадка; 2 – тумба диаметром 100–120 мм (или штатив);

3 – анкерные болты; 4 – устройство для принудительного центрирования

Устройство принудительного центрирования 4 позволяет устанавливать тахеометры и спутниковые приемники.

При выполнении очередного цикла с применением переносных пунктов на бетонную площадку устанавливается цельный штатив или металлическая тумба весом 10–12 кг и выполняются измерения, после чего они снимаются. Для повышения устойчивости штатива во время выполнения измерений к становому винту подвешивается груз весом 5–7 кг.

Необходимо отметить, что в процессе строительства и последующей эксплуатации АЭС, как правило, достаточно часто происходит внесение изменений и дополнений в существующий проект. В этом случае установка дополнительных пунктов сети часто бывает связана с организационными трудностями.

Для определения наиболее технологичного, с точки зрения получения наивысшей точности, способа определения координат пунктов ТГП в диссертации было выполнено исследование следующих схем создания планового обоснования:

– высокоточной полигонометрии с короткими сторонами (до 300 м) с использованием наземных измерительных технологий (см. рисунок 2.16, *а*);

– комбинированного способа с использованием как наземных, так и спутниковых измерительных технологий (см. рисунок 2.16, *б*);

– сетевого варианта построения спутниковой сети, когда определяемые базовые векторы образуют замкнутые геометрические фигуры (см. рисунок 2.16, *в*);

– модифицированного варианта лучевого способа построения спутниковой сети, когда все базовые векторы определяются относительно одного исходного пункта, а для контроля точности ГНСС-определений измеряются длины линий тахеометром (см. рисунок 2.16, *г*).

Отметим, что последний вариант характеризуется минимальной трудоемкостью и наивысшей производительностью выполнения технологических операций.

Наличие коротких длин линий и оптической видимости между пунктами ТГП на начальном этапе строительства обусловливает применение для первого цикла наблюдений использование высокоточной полигонометрии короткими лучами по

типовой измерительной технологии (тахеометр Trimble S9) со средними квадратическими ошибками (СКО) измерения длин линий и углов не хуже m_S = 1,0 мм и m_β = 1,0″, соответственно, (см. рисунок 2,16, а).

При применении способа высокоточной полигонометрии измерения нами производились тремя полными приемами [22], то есть измерения расстояния осуществлялось шесть раз с последующим нахождением среднего значения. Измерение каждого расстояния выполнялось с взаимной перестановкой местами отражателя и тахеометра (то есть «прямо-обратно»).

В случае, когда видимость между смежными пунктами утрачена, ввиду описанных выше ситуаций и того, что измерения необходимо выполнить на всех имеющихся пунктах, следует применить способ статических спутниковых определений.

Для выполнения статических спутниковых определений геодезическая сеть снабжена принудительным центрированием (см. рисунок 2.13). Для создания такой сети применялся спутниковый метод измерений в режиме «статика» с дискретностью записи данных 5 секунд и маской возвышения, равной 10°. В работе одновременно применялись три поверенных спутниковых приемника и, соответственно, одновременно производилось наблюдение трех пунктов, с последующей перестановкой на следующие пункты. Приемники фиксируются на адаптерах с трегером, в которых для горизонтирования дополнительно имеется цилиндрической уровень.

С целью исследования точности определения координат пунктов сети спутниковыми технологиями выполнение измерений производилось двумя вариантами. Первый вариант измерений показан на рисунке 2.19.

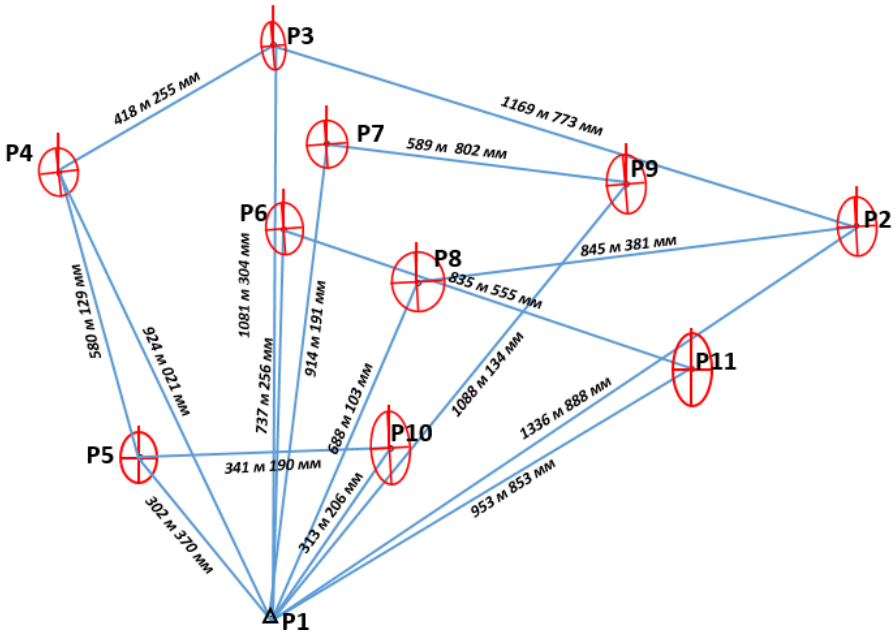


Рисунок 2.19 – Первый вариант выполнения спутниковых измерений

Второй вариант выполнения спутниковых определений с неблагоприятной геометрией сети представлен на рисунке 2.20.

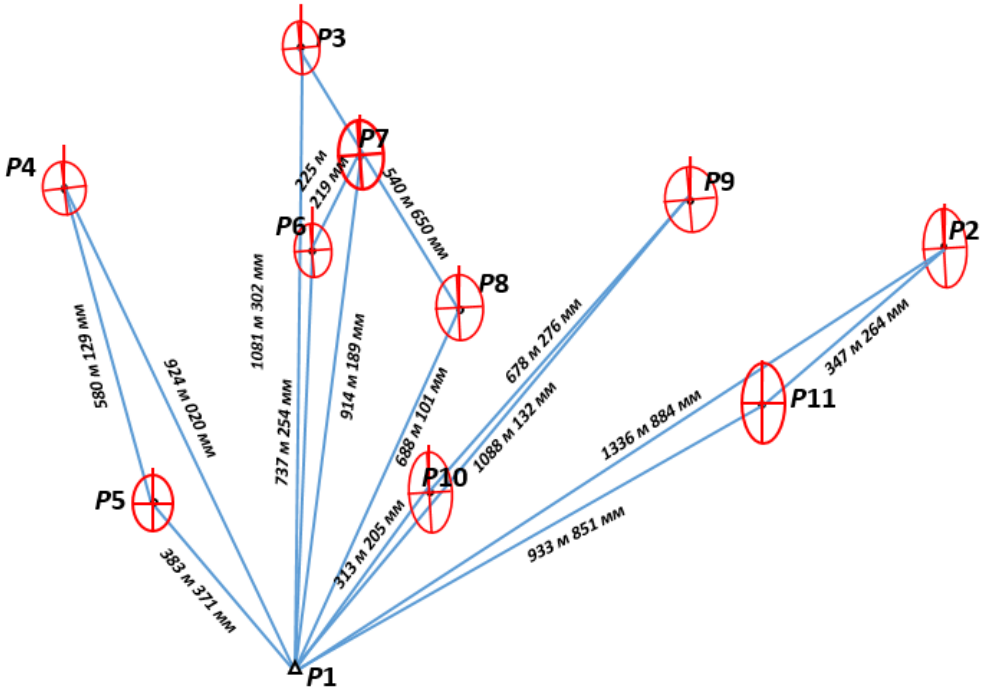


Рисунок 2.20 – Второй вариант выполнения спутниковых наблюдений (с неблагоприятной геометрией сети)

Результаты спутниковых статических определений (два варианта наблюдений) обработаны в специальном программном обеспечении, получены длины пространственных векторов и каталог координат в проекции на плоскость.

На рассматриваемых двух вариантов наблюдений спутниковой геодезической сети длины горизонтальных проложений, полученные после интерпретации данных на плоскость, отличались в пределах 1,0–2,0 мм, что говорит о незначительном влиянии фактора геометрии сети, построенной спутниковым методом при расстояниях между пунктами от 200 до 1000 м.

Таким образом, применение спутниковых технологий при создании обоснования на промплощадках АЭС является эффективным и оправданным способом, когда по условиям технического задания и проекта производства геодезических работ нет необходимости в выполнении высокоточных геодезических определений с целью определения взаимного положения смежных пунктов с СКО порядка 1,0–2,0 мм.

Повторные циклы наблюдений, в том числе и для ведения деформационного мониторинга, выполняемые в период активного строительства зданий и сооружений АЭС при утрате видимости между пунктами, обусловливают применение комбинированных схем построения, в которых сочетаются как традиционные наземные, так и спутниковые измерительные технологии (GNSS-приемник Stonex S900) с СКО определения базовых векторов в режиме статика $m_{GNSS} = 2.5 + 0{,}1 \cdot L_{(KM)}$ в плане и 3.5 мм + $0{,}4 \cdot L_{(KM)}$ по высоте (см. рисунок 2.16, *б*, *в*, *г*).

Для ведения деформационного мониторинга горизонтальных смещений земной поверхности на техногенных геодинамических полигонах промплощадок АЭС с целью получения более высокой точности определения координат пунктов сети лучше использовать линейно-угловые построения с применением высокоточных тахеометров, включая и роботизированные. Их применение позволит определять эти деформации с СКО не хуже 2,0–2,5 мм при расстояниях между пунктами до 200,0–400,0 м (на примере выполненного высокоточного полигонометрического хода). В таблице 2.8 приведены значения условных координат части пунктов ТГП, полученных спутниковым методом и полигонометрическим способом, которые показывают значительную их разность.

Таблица 2.8 – Сравнение условных координат части пунктов ТГП, полученных спутниковым методом и полигонометрическим способом (m_β = 1,0" m_s = 1,0 мм)

Номер пункта	Координаты пунктов, полученные спутниковым методом, м		Координаты пунктов, полученные полигонометрическим способом короткими лучами, м		Разность координат, м	
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY
Р6	484764,712	6581253,880	484764,716	6581253,884	-0,004	-0,004
Р7	484656,668	6580958.681	484656,663	6580958,684	0,005	- 0,003
Р9	484150,552	6581212,597	484150,548	6581212,594	0,004	0,003
Р10	484134,711	6581398,018	484134,704	6581398,015	0,007	0,003

В связи с тем, что при прокладывании высокоточного полигонометрического хода между пунктами может отсутствовать прямая видимость, их координаты, как уже указывалось выше, могут быть определены способом полярной засечки из смежных пунктов. Рассмотрим результаты измерений спутниковым методом и способом полярной засечки с применением тахеометра с параметрами точности m_β = 1,0", m_s = 2,0 мм. Во всех случаях измерения выполнялись тремя полными приемами, то есть расстояния измерялись 6 раз, а угол наклона не превышал значений более 2,0°. Расхождения в результатах угловых измерений между полуприемами не превышало двойной точности прибора.

В таблице 2.9 представлены сравнения координат пунктов, полученным спутниковым методом и полярной засечкой тахеометром с параметрами точности m_β =1,0", m_s = 2,0 мм.

Таблица 2.9 – Сравнение координат пунктов, полученных спутниковым методом и полярной засечкой

Номер пункта	Координаты пунктов, полученные спутниковым методом, м		Координаты пунктов, полученные способом полярной засечки, м		Разность координат, м	
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY
Rp6	484764.712	6581253.880	484764.715	6581253.884	-0.005	-0.005
Rp7	484656.668	6580958.681	484656.664	6580958.685	0.004	- 0.004
Rp9	484150.552	6581212.597	484150.550	6581212.593	0.002	0.004
Rp10	484134.711	6581398.018	484134,706	6581398.013	0.005	0.005

Сравним теперь результаты с применением полярной засечки (таблица 2.10), когда применялись два тахеометра с следующими техническими характеристиками: (m_β = 2,0", m_s = 2,0 мм) и (m_β = 1,0", m_s = 2,0 мм). Измерения выполнялись с интервалом в два дня.

Таблица 2.10 – Сравнение координат пунктов, полученных способом полярной засечки двумя тахеометрами

Номер пункта	Координаты пунктов, полученные тахеометром с параметрами m_β = 2,0", m_s = 2,0 мм (м)		Координаты пунктов, полученные тахеометром с параметрами m_β = 1,0", m_s = 2,0 мм (м)		Разность координат (м)	
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY
Rp6	484764.716	6581253.884	484764.718	6581253.8842	0.002	0.002
Rp7	484656.669	6580958.685	484656.667	6580958.686	0.002	-0.001
Rp9	484150.551	6581212.594	484150.550	6581212.593	0.001	0.001
Rp10	484134,706	6581398.015	484134,704	6581398.014	0.002	0.001

Из таблицы следует, что разности координат не превышают 2,0 мм, и это свидетельствует об определении этих координат с достаточно высокой точностью. Это обстоятельство свидетельствует о том, что линейно-угловые измерения могут быть применены для деформационного мониторинга земной поверхности и инженерных сооружений в горизонтальной плоскости с параметрами. При этом разности координат пунктов различаются незначительно.

Необходимо отметить, что по мере возведения инженерных сооружений, а также при внесении изменений в проект еще даже на стадии их строительства возникают локальные участки выполнения инженерно-геодезических измерений. В этих случаях могут применяться обратная линейно-угловая или биполярная засечки (рисунок 2.21).

Обратная линейно-угловая или биполярная засечки применялись при отсутствии прямой видимости между частью пунктов сети на локальных участках.

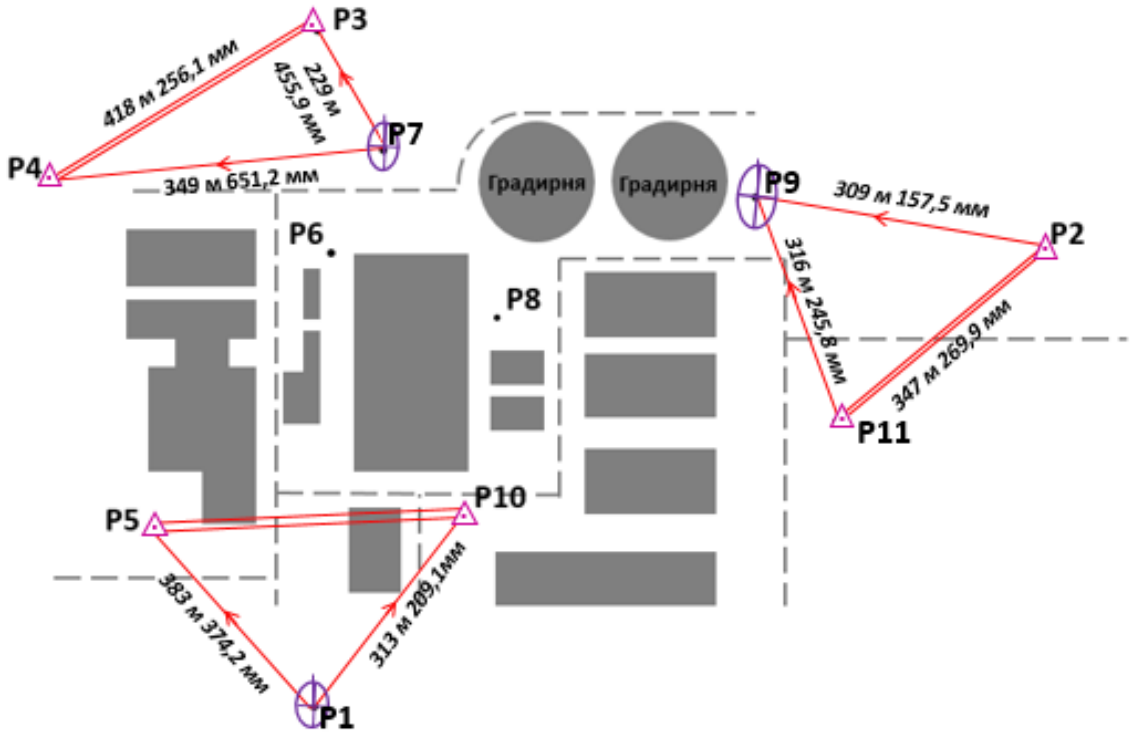


Рисунок 2.21 – Схема применения обратной линейно-угловой и биполярной засечек на локальных участках деформационной сети ТГП

Исследование точности предлагаемых схем построения ТГП выполнялось с использованием программного комплекса КРЕДО ГНСС и КРЕДО ДАТ. Результаты исследования приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Оценка точности определения плановых координат в схемах построения ТГП

Название пункта ТГП	Результаты оценки точности положения пунктов (мм)											
	схема *а*			схема *б*			схема *в*			схема *г*		
	m_x	m_y	m	m_x	m_y	m	m_x	m_y	m	m_x	m_y	m
P1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
P2	–	–	–	1,7	2,1	2,7	2,6	2,3	3,5	3,6	3,3	4,9
P3	1,3	2,1	2,5	1,9	2,5	3,1	2,7	3,1	4,1	2,8	3,7	4,6
P4	1,7	1,7	2,4	2,1	2,3	3,1	1,9	2,8	3,4	4,2	3,3	5,3
P5	1,6	1,8	2,4	1,8	2,5	3,1	3,1	1,9	3,6	3,4	3,9	5,2
P6	1,4	1,9	2,4	1,3	1,9	2,3	2,2	2,4	3,3	2,9	3,2	4,3
P7	1,9	1,6	2,5	2,3	2,1	3,1	1,9	3,1	3,6	3,5	3,9	5,2
P8	1,1	1,4	1,8	1,5	2,8	3,2	3,2	2,2	3,9	4,1	3,9	5,7
P9	1,7	1,5	2,3	2,7	2,1	3,4	3,5	2,4	4,2	3,6	3,3	4,9
P10	1,1	1,4	1,8	2,1	2,3	3,1	2,8	3,3	4,3	3,2	2,8	4,5
P11	1,6	1,2	1,9	2,5	2,2	3,3	2,5	2,9	3,8	2,1	4,6	5,1

Как следует из анализа результатов исследования, на начальном этапе при использовании типового измерительного геодезического оборудования наиболее точной является первая схема построения ТГП – высокоточный полигонометрический ход, что объясняется более высокой точностью измерений электронным тахеометром на коротких длинах линий по сравнению с ГНСС-технологиями.

При выполнении повторных циклов наблюдений рекомендуется комбинированное ГНСС-построение, представленное на рисунке 2.16, *б*, сочетающее сетевой вариант спутниковой сети с высокоточными наземными измерениями, выполняемые тахеометром по сторонам сети, на которых сохранилась прямая оптическая видимость. Вместе с этим следует отметить, что, исходя, из трудоемкости выполняемых технологических операций, наиболее предпочтительным является модифицированный вариант построения комбинированной спутниковой сети, который, однако, характеризуется меньшей точностью определения координат.

Математическая обработка повторных циклов измерений предусматривает необходимость определения наиболее стабильного пункта ТГП, который принимается в качестве исходного при выполнении уравнивания всей сети в соответствующем цикле. Определение наиболее стабильного пункта выполнялось по методике, заключающейся в последовательном принятии в качестве исходного каждого пункта ТГП. За наиболее стабильный будет приниматься тот пункт, относительно которого в сети будут минимальные изменения координат.

В результате применения данной методики на протяжении всего периода наблюдений наиболее стабильным является пункт $Р_1$, относительно которого выполнялось дальнейшее уравнивание всей геодезической сети.

Результат математической обработки выполненных натурных высокоточных геодезических измерений (применение схемы построения, представленной на рисунке 2.16, *б*) в виде векторов смещения пунктов ТГП в графическом виде приведен на рисунке 2.22. На этом рисунке приведены только векторы, соответствующие критерию, определяющему значимость движения и вычисляемому по следующей формуле:

$$\Delta \geq t \cdot m_{x,y} = 2 \cdot m_{x,y}, \qquad (2.6)$$

где t – коэффициент, определяющий значимость смещения и которой при доверительной β = 0.95, принимается равным двум;

– $m_{x,\,y}$ – СКО определения координат пунктов ТГП, полученная в результате выполненной априорной оценки точности (см. таблицу 2.11).

На рисунке 2.22 представлены векторы движения пунктов ТГП, вычисленные в результате математической обработки результатов высокоточных измерений.

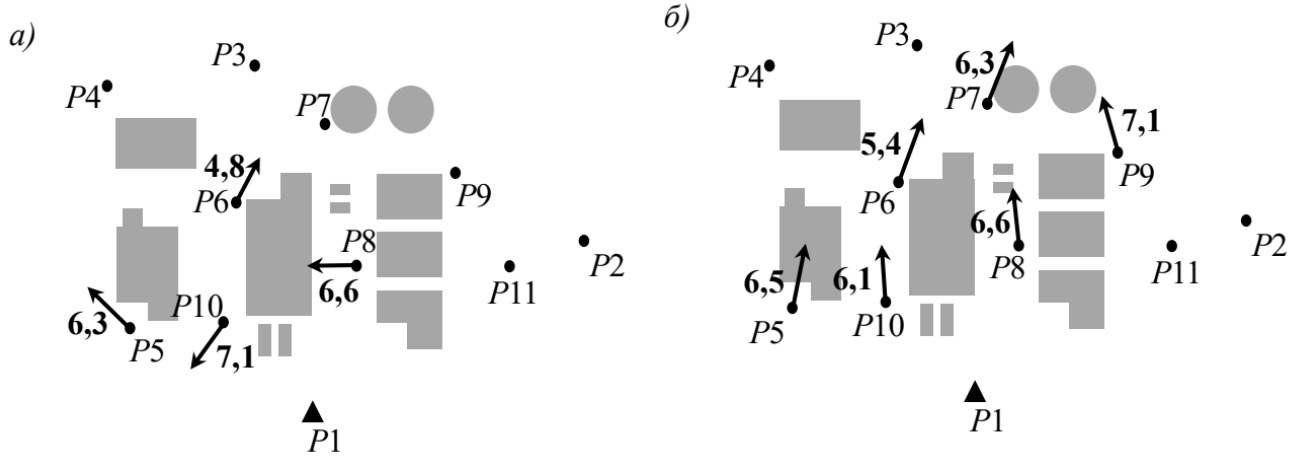


Рисунок 2.22 – Векторы планового движения пунктов ТГП, полученные в результате применения разработанной методики (смещения указаны в мм): а) между первым и вторым циклом; б) между первым и последним циклом наблюдений

Таким образом, на промышленной площадке строящейся АЭС имеет место значимое движение пунктов ТГП, что обусловливает необходимость учета этого фактора при деформационном мониторинге инженерных сооружений.

Следовательно, для ведения деформационного мониторинга ТГП целесообразно применять наземные методы измерений. Однако, при отсутствии видимости между смежными пунктами прокладывание полигонометрического хода становится невозможным. В этом случае можно применять обратную линейно-угловую или полярную засечки, а также спутниковые технологии.

Необходимо отметить, что в целом ряде случаев для ведения деформационного мониторинга земной поверхности ТГП можно применять способ измерения отдельного расстояния. Этот способ целесообразно применять в тех случаях, когда на геодинамическом полигоне имеется тектонический разлом. В этом случае пункты сети необходимо размещать по обе стороны этого разлома. Количество таких пунктов зависит от длины разлома как на самом ТГП, так и за его пределами.

Достоинством измерения отдельного расстояния является возможность уверенно выполнять линейные измерения высокоточным тахеометром, включая и роботизированный, с СКО не хуже 1,0-1,5 мм. В этом случае также имеется возможность автоматизированного выполнения линейных измерений.

Таким образом, для ведения деформационного мониторинга горизонтальных смещений земной поверхности на техногенных геодинамических полигонах промплощадок АЭС с целью получения более высокой точности определения координат пунктов сети лучше использовать линейно-угловые построения с применением высокоточных тахеометров, включая и роботизированные [22]. Их применение позволит определять эти деформации с СКО не хуже 2,0–2,5 мм при расстояниях между пунктами до 350,0–400,0 м.

2.6 Исследование точности измерения расстояний в условиях тумана

При создании планово-высотного обоснования на промплощадке, а также при ведении деформационного мониторинга на техногенном геодинамическом полигоне, в целом ряде случаев возможно выполнение линейных измерений в различных условиях [12, 125, 127], в том числе и в условиях тумана различной плотности. Данный фактор имеет место, в основном, весной и осенью в утренние часы. При этом часть измерений в разных циклах может производиться при отсутствии тумана, а часть – при его наличии. В последнем случае плотность тумана может быть различной и во время выполнения измерений наблюдателем она оценивается визуально.

Влияние тумана на методику выполнения измерений можно условно разделить на следующие случаи:

– при слабой плотности тумана имеется возможность уверенного визуального наведения на призменный отражатель с последующим выполнением инженерно-геодезических измерений, включая и высокоточные;

– с увеличением плотности тумана наведение на призменный отражатель становится затруднительным, но выполнение измерений возможно;

– наличие тумана такой плотности, при которой возможно наведение на призменный отражатель только с применением отражательных призм с инфракрасным идентификатором цели.

Как правило, в первом и втором случаях при выполнении измерений вводятся стандартные поправки за метеоусловия, не принимая во внимание увеличение плотности атмосферы и изменение скорости распространения света. В этом случае следует ожидать получение результатов измерения расстояний, которые не полностью будут исправлены за метеоусловия.

В третьем случае измерения можно выполнять роботизированными тахеометрами с использованием отражательных призм с инфракрасным идентификатором цели. Однако, так как при наличии тумана значительно изменяется плотность воздуха, то скорость света будут другой и тем самым следует ожидать изменение значения измеренного расстояния по сравнению с расстояниями, полученными при выполнении измерений при благоприятных внешних условиях.

С целью определения влияния тумана на измеряемые расстояния были выполнены исследования, которые включали в себя [23]:

– выполнение измерений роботизированным тахеометром (рисунок 2.23) при благоприятных условиях (при отсутствии тумана и дымки) с введением поправок за метеоусловия;

– выполнение измерений роботизированным тахеометром при наличии тумана без введения поправок за метеоусловия;

– выполнение измерений роботизированным тахеометром при наличии тумана с введением поправок за метеоусловия.

При выполнении исследований измерения расстояния между твердыми пунктами выполнялись в разное время суток. Для исключения ошибок на центрирование тахеометра и отражателя применялось принудительное центрирование.

При выполнении измерений использовался роботизированный тахеометр Trimble S9 и активная отражательная призма Trimble Multi Track, обеспечивающий СКО измерений m_S = 1,0 мм, m_β = 1,0″.

а) б)

Рисунок 2.23 – Общий вид применяемого геодезического оборудования:
а) роботизированный тахеометр Trimble S9; б) активная отражательная призма Trimble Multi Track

Необходимо отметить, что плотность тумана в процессе выполнения измерений не позволяла выполнять визуальное наведение зрительной трубы тахеометра на призменный отражатель. Условия видимости показаны на рисунке 2.24, где слева представлена благоприятная обстановка условий выполнения измерений, а справа – условия с наличием тумана (вид с окуляра тахеометра).

При выполнении измерений с течением времени плотность тумана изменялась, но всегда отсутствовала визуальная видимость на отражатель.

Необходимо отметить, что при благоприятных условиях роботизированный тахеометр быстрее выполнял захват отражателя, чем при тумане. В среднем тахеометр захватывал отражатель при тумане на 2–3 секунды дольше, чем при благоприятных условиях.

Результаты измерений при наличии тумана. Исследования проводились в апреле и мае в безветренную погоду и полном отсутствии осадков. Для исследований было выбрано три дня, при которых имелся плотный туман, не позволяющий выполнять визуальное наведение зрительной трубы тахеометра на отражатель. Методика измерений заключалась в следующем. После принудительного центрирования тахеометра и отражателя включался автоматический поиск отражателя и последующее измерение расстояния. При выполнении исследований расстояние измерялось три раза с последующим его осреднением. Сбоев при выполнении измерений не было. Интервал между измерениями составлял 4–5 минут.

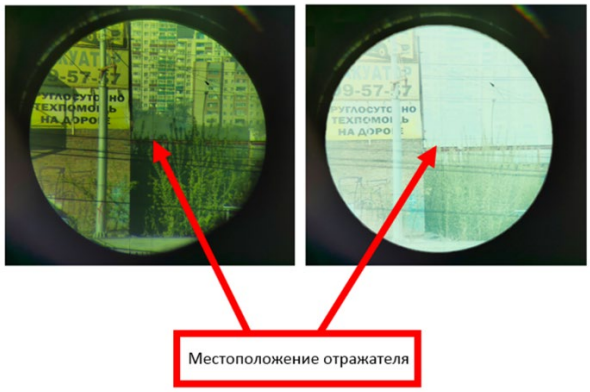


Рисунок 2.24 – Условия выполнения измерений

Результаты измерений трех дней приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12– Результаты линейных измерений в условиях тумана (без ввода поправки за метеоусловия)

№ п/п	Дата: 21.04.2022 Время: 8:35		Дата: 06.05.2022 Время: 12:55		Дата: 11.05.2022 Время: 13:30	
	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм
1	458 м 762,1 мм	1,5	458 м 756,3 мм	-3,5	458 м 762,2 мм	2,9
2	458 м 759,0 мм	-1,6	458 м 759,1 мм	-0,7	458 м 761,2 мм	1,9
3	458 м 764,2 мм	3,6	458 м 758,3 мм	-1,5	458 м 758,1 мм	-1,2
4	458 м 762,3 мм	1,7	458 м 760,2 мм	0,4	458 м 757,4 мм	-1,9
5	458 м 758,4 мм	-2,2	458 м 758,4 мм	-1,4	458 м 757,5 мм	-1,8
6	458 м 758,2 мм	-2,4	458 м 759,2 мм	-0,6	458 м 758,2 мм	-1,1
7	458 м 761,0 мм	0,4	458 м 761,5 мм	1,7	458 м 760,2 мм	0,9
8	458 м 760,1 мм	-0,5	458 м 763,3 мм	3,5	458 м 761,1 мм	1,8
9	458 м 759,4 мм	-1,2	458 м 761,1 мм	1,3	458 м 759,3 мм	0,0
10	458 м 761,5 мм	0,9	458 м 760,6 мм	0,8	458 м 757,7 мм	-1,6
Ср	**458 м 760,6 мм**		**458 м 759,8**		**458 м 759,3**	

Из таблицы следует, что при расстоянии порядка 458 м разность измеренных расстояний в одной серии без введения поправки составляет 21.04.22 г. – 6,0 мм, 06.05.22 г. – 7,0 мм и 11.05.22 г. – 4,8 мм. Разность отдельного измеренного расстояния в разные дни составила 6,8 мм. При этом максимальная разность средних измеренных расстояний между днями измерений составляет 1,3 мм.

На рисунке 2.25 приведены графики изменения значений измеряемого расстояния без ввода поправки за метеоусловия.

.

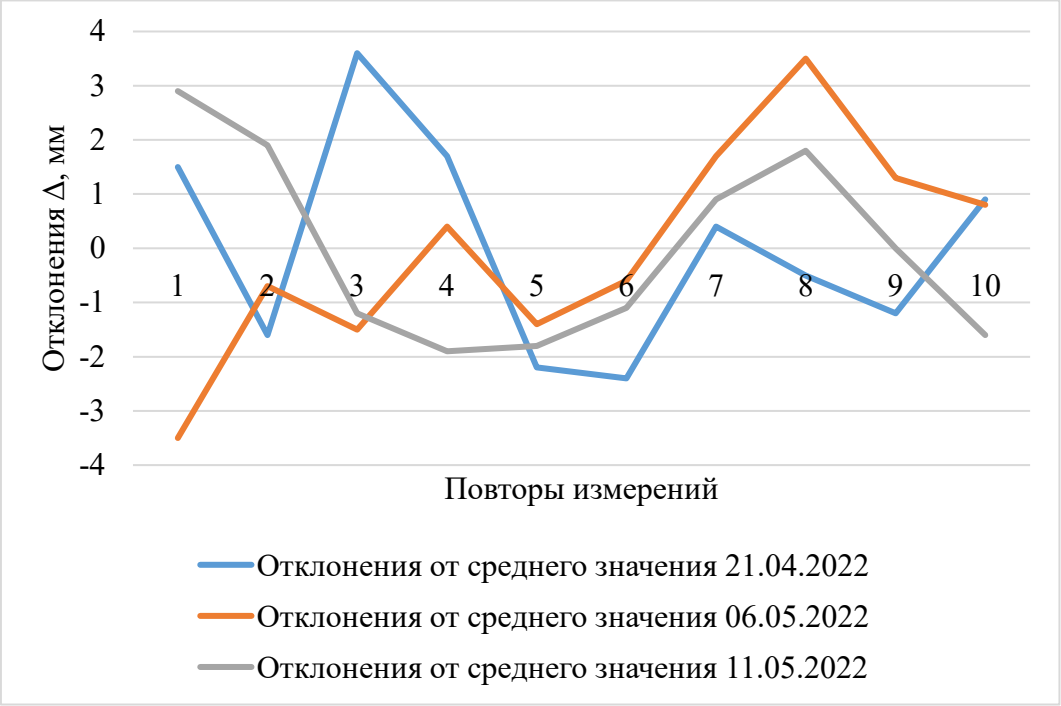


Рисунок 2.25 – График отклонений результатов измерений в условиях тумана без ввода поправки

В таблице 2.13 приведены результаты линейных измерений в условиях тумана с поправками за метеоусловия. Из таблицы следует, что при расстоянии порядка 458 м разность измеренных расстояний составляет 21.04.22 г. – 4,4 мм, 06.05.22 г. – 4,3 мм и 11.05.22 г. – 4,2 мм. Разность отдельного измеренного расстояния в разные дни с поправками составила 5,6 мм. При этом максимальная разность средних измеренных расстояний между днями составляет 1,2 мм.

Таблица 2.13 – Результаты линейных измерений в условиях тумана с поправками за метеоусловия

№ п/п	Дата: 21.04.2022 Время: 8:35		Дата: 06.05.2022 Время: 12:55		Дата: 11.05.2022 Время: 13:30	
	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм
1	458 м 751,4мм	1,0	458 м 750,5 мм	-0,9	458 м 752,2 мм	0,6
2	458 м 752,2 мм	1,8	458 м 751,4 мм	0,0	458 м 750,6 мм	-1,0
3	458 м 748.0 мм	-2,4	458 м 753,6 мм	2,2	458 м 753,5 мм	1,9
4	458 м 749,0 мм	-1,4	458 м 751,2 мм	-0,2	458 м 752,8 мм	1,2
5	458 м 748,4 мм	-2,0	458 м 749,3 мм	-2,1	458 м 749,3 мм	-2,3
6	458 м 749,2 мм	-1,2	458 м 750.2 мм	-1,2	458 м 750,4 мм	-1,2
7	458 м 751,8 мм	1,4	458 м 753.5 мм	2,1	458 м 750.2 мм	-1,4
8	458 м 749,5 мм	-0,9	458 м 751,8 мм	0,4	458 м 752,6 мм	1,0
9	458 м 751,8 мм	1,4	458 м 750,4 мм	-1,0	458 м 751,0 мм	-0,6
10	458 м 752,4 мм	2,0	458 м 751,6 мм	0,2	458 м 753,4 мм	1,8
Ср	**458 м 750,4 мм**		**458 м 751,4 мм**		**458 м 751,6 мм**	

На рисунке 2.26 приведены графики изменения значений измеряемого расстояния в условиях тумана с введением поправки за метеоусловия.

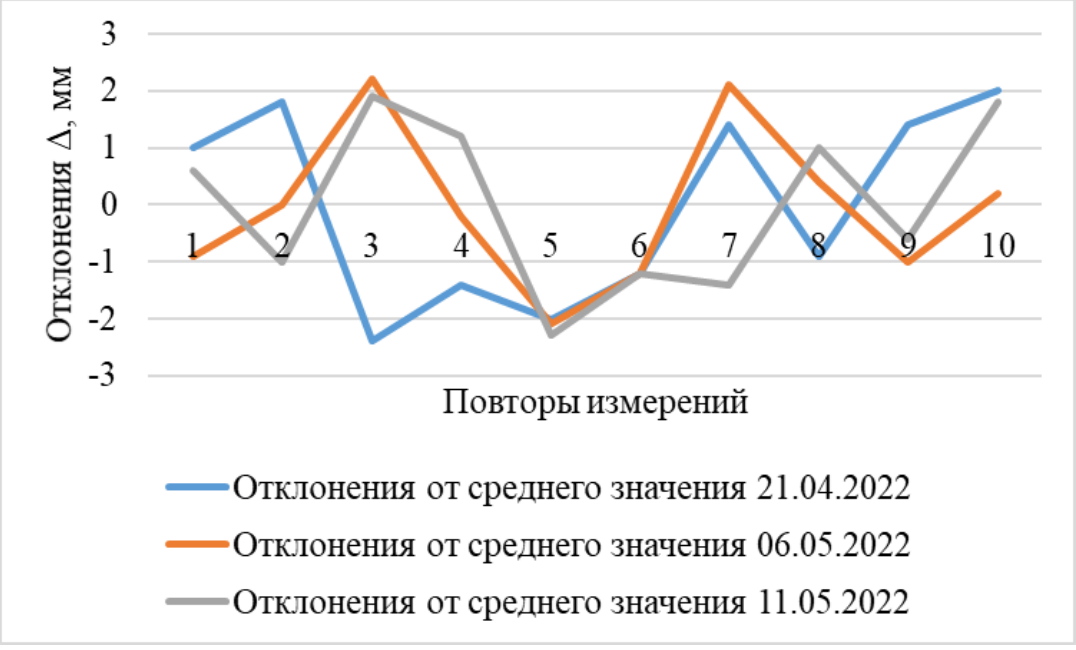


Рисунок 2.26 – График отклонений результатов измерений в условиях тумана

Результаты измерений при благоприятных условиях. При выполнении измерений осадки отсутствовали. Результаты измерений приведены в таблице 2.14, из ко-

торой следует, что разность измеренных расстояний без введения поправки составляет 21.04.22 г. – 3,6 мм, 06.05.22 г. – 4,7 мм и 11.05.22 г. – 1,9 мм. Разность отдельного измеренного расстояния в разные дни без введения поправки составила 3,6 мм. При этом максимальная разность средних измеренных расстояний между днями составляет 1,4 мм.

Таблица 2.14 – Результаты линейных измерений при благоприятных условиях (пасмурная, безветренная погода) без учета поправки за метеоусловия

№ п/п	Дата: 21.04.2022 Время: 13:50		Дата: 06.05.2022 Время: 21:00		Дата: 11.05.2022 Время: 15:00	
	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм
1	458 м 747,0 мм	-0,1	458 м 746,3 мм	0,0	458 м 744,8 мм	-0,9
2	458 м 748,2 мм	1,1	458 м 747,0 мм	0,7	458 м 746,0 мм	0,3
3	458 м 748,2 мм	1,1	458 м 747,4 мм	1,1	458 м 745,2 мм	-0,5
4	458 м 749,0 мм	1,9	458 м 745,8 мм	-0,5	458 м 746,0 мм	0,3
5	458 м 746,8 мм	-0,3	458 м 746,1 мм	-0,2	458 м 747,0 мм	1,3
6	458 м 744,5 мм	-2,6	458 м 744,3 мм	-2,0	458 м 744,8 мм	-0,9
7	458 м 745,4 мм	-1,7	458 м 745,3 мм	-1,0	458 м 746,4 мм	0,7
8	458 м 745,5 мм	-1,6	458 м 747,1 мм	0,8	458 м 745,2мм	-0,5
9	458 м 748,3 мм	1,2	458 м 748,0 мм	1,7	458 м 744,8 мм	-0,9
10	458 м 749,0 мм	1,9	458 м 749,0 мм	2,7	458 м 746,7 мм	1,0
	458 м 747,1 мм		**458 м 746,3 мм**		**458 м 745,7 мм**	

На рисунке 2.27 приведены графики изменения значений измеряемого расстояния при благоприятных условиях без введения поправки за метеоусловия.

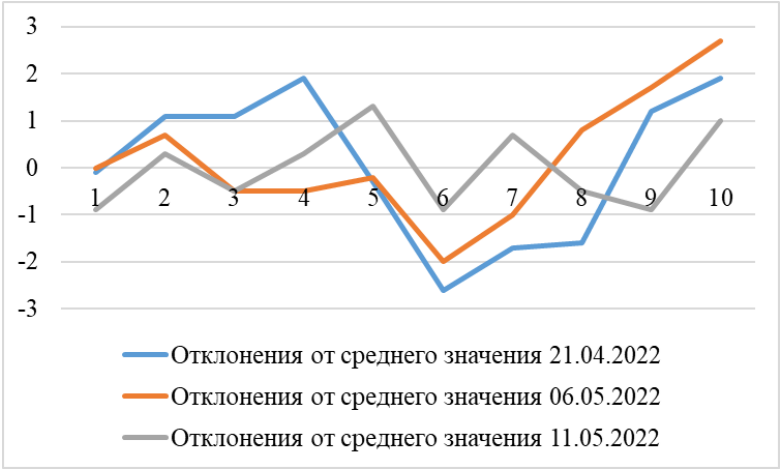


Рисунок 2.27 – График отклонений расстояний без учета поправок за метеоусловия

И, наконец, в таблице 2.15 приведены результаты измерений с введением стандартных поправок за метеоусловия, из которой следует, что разность измеренных расстояний с введением поправки составляет 21.04.22 г. – 2,2 мм, 06.05.22 г. – 2,4 мм и 11.05.22 г. – 1,2 мм. Разность отдельного измеренного расстояния в разные дни без введения поправки составила 2,5 мм. При этом максимальная разность средних измеренных расстояний между днями составляет 0,3 мм.

Таблица 2.15 – Результаты линейных измерений при благоприятных условиях (пасмурная, безветренная погода) с учетом поправок за метеоусловия

№ п/п	Дата: 21.04.2022 Время: 13:50		Дата: 06.05.2022 Время: 21:00		Дата: 11.05.2022 Время: 15:00	
	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм	Длина	Δ, мм
1	458 м 744,1мм	-0,9 мм	458 м 745,4 мм	0,3 мм	458 м 744,4 мм	-0,9 мм
2	458 м 745,4мм	0,4 мм	458 м 744,2 мм	-0,9 мм	458 м 745,4 мм	0,1 мм
3	458 м 745,2мм	0,2 мм	458 м 744,4 мм	-0,7 мм	458 м 745,7 мм	0,4 мм
4	458 м 744,2мм	-0,8 мм	458 м 746,6 мм	1,5 мм	458 м 745,7 мм	0,4 мм
5	458 м 746,3мм	1,3 мм	458 м 745,4мм	0,3 мм	458 м 746,0 мм	0,7 мм
6	458 м 745,3мм	0,2 мм	458 м 744,4 мм	-0,7 мм	458 м 746,0 мм	0,7 мм
7	458 м 744,2мм	-0,8 мм	458 м 744,2 мм	-0,9 мм	458 м 745,4мм	0,1 мм
8	458 м 745,2мм	0,2 мм	458 м 746,5 мм	1,4 мм	458 м 744,8 мм	-0,5 мм
9	458 м 744,4мм	-0,6 мм	458 м 746,4 мм	1,3 мм	458 м 744,2 мм	-1,1 мм
10	458 м 745,4мм	0,4 мм	458 м 744,6 мм	-0,5 мм	458 м 745,0 мм	-0,3 мм
Ср.	**458 м745,0 мм**		**458 м 745,1мм**		**458 м 745,3мм**	

На рисунке 2.28 приведены графики изменения значений измеряемого расстояния при благоприятных условиях с введением поправки за метеоусловия.

Рисунок 2.28 – График отклонений расстояний с введением поправки за метеоусловия

Следовательно, средние значения измеренных расстояний следующие:

а) при благоприятной погоде:

1) 458 м 747,1 мм; 2) 458 м 746,3 мм; 3) 458 м 745,7 мм (среднее 458 м 746,4 мм) без введения поправок за метеоусловия;

1) 458 м745,0 мм; 2) 458 м 745,1мм; 3) 458 м 745,3мм (среднее 458 м 745,1 мм) с введением поправок за метеоусловия;

б) при наличии тумана:

1) 458 м 760,6 мм; 2) 458 м 759,8 мм; 3) 458 м 759,3 мм (среднее 458 м 759,9 мм) без введения поправок за метеоусловия;

– 1) 458 м 750,4 мм; 2) 458 м 751,4 мм; 3) 458 м 751,6 мм (среднее 458 м 751,1 мм) с введением поправок за метеоусловия.

Таким образом, разность измеренных средних значений расстояний при благоприятной погоде без введения поправок за метеоусловия и с их введением составляет 458 м 746,4 мм – 458 м 745,1 мм = 1,3 мм, а при наличии тумана эта разность составляет 458 м 759,9 мм – 458 м 751,1 мм = 8,8 мм. При этом разность средних значений расстояний, измеренных при благоприятной погоде и при наличии тумана с введением поправок за метеоусловия будет составлять соответственно, 458 м 751,1 и 458 м 745,1 мм, а их разность – 6,0 мм.

Итоговые результаты исследований приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Итоговые результаты экспериментальных исследований по влиянию внешних условий на точность линейных измерений

Средние значения измеренной длины линии из серии наблюдений				
При благоприятных условиях (м)		При наличии тумана с ведением стандартных поправок за метеоусловия, (м)		
Без поправки за метеоусловия	С поправкой за метеоусловия	Низкая плотность	Средняя плотность	Высокая плотность
458,7464	458,7451	458,7493	458,7511	458,7539
Влияние тумана на точность линейных измерений				
Δ(мм)	-1,3	+4,2	+6,0	+8,8

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

– при применении активных отражательных призм с инфракрасным идентификатором цели и роботизированных тахеометров одноименной марки представляется возможным выполнять геодезические измерения в условиях тумана и полного отсутствия визуальной видимости на отражатель;

– наличие тумана приводит к изменению длины расстояний до 5,0–6,0 мм даже при расстояниях до 0,5 км;

– выполнение измерений в условиях тумана приводит к увеличению значений длин линий, которые при его средней плотности превышают инструментальную СКО используемого тахеометра;

– создание планово-высотного обоснования и ведение деформационного мониторинга на техногенных геодинамических полигонах в условиях тумана приведет к значительным ошибкам в определении координат пунктов сети и осадочных марок на инженерных сооружениях;

– также при наличии тумана нельзя выполнять деформационный мониторинг инженерных сооружений, а также исполнительную съемку положения ответственных строительных конструкций, например, анкерных болтов и закладных деталей;

– в связи с этим высокоточные инженерно-геодезические измерения (расстояния) необходимо выполнять при благоприятных внешних условиях без наличия тумана;

– в условиях тумана на промплощадке роботизированным тахеометром можно выполнять разбивочные работы только для целей вынесения в натуру границ котлованов под земляные работы или производство топографической съемки.

Рассмотренные условия выполнения измерений характерны для весеннего и осеннего времени года.

2.7 Совершенствование схем метрологической поверки тахеометров методом сличения

Кроме фактора выполнения высокоточных линейных измерений в условиях тумана, на точность построения высокоточного обоснования на промплощадке АЭС

влияют технические характеристики применяемых тахеометров. Поэтому для обеспечения единства измерений геодезических измерений, а также их необходимой точности, необходимо выполнять периодические поверки применяемых приборов (в нашем случае тахеометров) в соответствии с требованием соответствующих нормативных документов (локальной поверочной схемы). Применительно к тахеометрам в настоящее время обеспечение единства измерений осуществляется путем проведения ежегодных поверок методом прямых измерений с применением стационарных эталонных линейных базисов 2-го или 3-го разрядов [17, 31, 32, 34, 35, 40, 44, 45, 56, 61, 75, 76, 79, 84, 87, 88, 104, 110, 116]. В свою очередь эти эталонные базисы поверяются также методом прямых измерений с применением базисных приборов БП-1 или группой (не менее трех) высокоточных фазовых светодальномеров (тахеометров). Однако, к настоящему времени в области проведения поверок тахеометров сложилась следующая ситуация: количество действующих базисов не превышает два – три и они находятся в Европейской части РФ. Этот факт обусловлен тем, что отсутствует надлежащее содержание этих базисов из-за отсутствия финансирования, а также подготовленных специалистов, способных выполнять измерения базисным прибором БП-1 или высокоточными тахеометрами. В связи с этим возникают значительные организационные трудности в проведении ежегодных метрологических поверок тахеометров.

Для решения данной задачи предлагается [94] выполнять данную поверку без использования эталонных базисов и проводить ее методом сличения с эталонным тахеометром.

В работе [94] рассматривается методика поверки методом сличения, когда эталонный и поверяемый тахеометры устанавливаются рядом, на расстоянии 45–50 см. В этом случае, строго говоря, лучи лазеров на отражатель будут проходить в разных воздушных средах, что приведет к разному влиянию метеоусловий, хотя и незначительному, на полученные результаты измерений расстояний.

Схема метрологической поверки путем установки тахеометров в створ. Для уменьшения этого влияния разности состояния воздушных сред на результаты измерений расстояний эталонным и поверяемым тахеометрами с участием автора

[96] была разработана схема выполнения поверки, приведенная на рисунке 2.29.

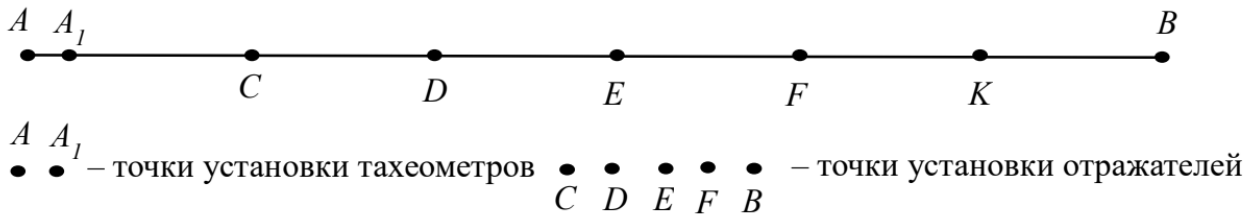


Рисунок 2.29 – Поверка путем установки тахеометров в створ

При ее реализации эталонный A и поверяемый A_1 (или наоборот) тахеометры устанавливаются по створу AB (с отклонением не больше 10–15 мм) на расстоянии 40–45 см друг от друга и на разных горизонтах. При этом разность горизонтов не должна превышать 45–50 мм. Тогда лазерные лучи тахеометров также будут проходить по высоте не более чем 45–50 мм друг от друга, и в этом случае можно считать, что они будут составлять один пучок лучей. Следовательно, в этом случае разность метеоусловий на расстоянии 35–40 мм (диаметр объектива тахеометра) будет исчезающе мала.

Поверка может выполняться при произвольной или стационарной установке отражателя.

Собственно, сама поверка при произвольной установке отражателя выполняется следующим образом. В точках A и A_1, расположенных по створу AB, на расстоянии 40–45 см друг от друга устанавливаются эталонный и поверяемый тахеометры, а в точке С – отражатель. При этом подбором высоты одного из тахеометров добиваются такого положения, чтобы лазерный луч одного из них проходил на высоте не более чем 10–15 мм над корпусом зрительной трубы другого тахеометра. После этого одновременно, в течение 10–15 секунд тремя приемами, производится измерение обоими тахеометрами расстояний AC и A_1C. По окончании измерений тахеометры аккуратно вынимаются из трегеров, переставляются местами и измерения повторяются (таблица 2.17). Затем отражатель переносится в точку D, затем E и т. д. в B с одновременным измерением расстояний AD (A_1D), AE (A_1E), AB (A_1B) и т. д.

Таблица 2.17 – Результаты поверки тахеометра в лабораторных условиях установкой тахеометров в створ (произвольная установка отражателя)

S, м	TCR 1201 (средние значения из 15 измерений, мм)		GeoMax (средние значения из 15 измерений, мм)		Разности, мм		Разности штативов, мм
	штатив в точке А	штатив в точке A_1	штатив в точке А	штатив в точке A_1	Δ_1=А-А	Δ_2=A_1-A_1	А-A_1
АС (A_1С)	8171,8	7798,1	8172,0	7798,6	-0,2	-0,5	373,7(373,4)
AD(A_1D)	30056,4	29682,9	30056,2	29683,4	0,2	-0,5	373,5(372,8)
AE(A_1E)	51496,6	51123,0	51496,1	51123,3	0,5	-0,3	373,6(372,8)
AF(A_1F)	70517,5	70144,0	70517,9	70144,8	-0,4	-0,8	373,5(373,1)
АК(A_1К)	85633,7	85260,2	85634,3	85260,5	-0,6	-0,3	373,5(373,8)
АВ(A_1В)	91634,8	91261,2	91634,0	91260,6	0,8	0,6	373,6(373,4)

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 Δ_1 и Δ_2 средних значений всех длин линий, измеренных эталонным и поверяемым тахеометрами;

– разности расстояний А-A_1 для обоих тахеометров (контролируется стабильность положения штативов).

Применительно к нашим результатам СКО измерений (в зависимости от серий измерений), вычисленная по формуле Бесселя, для тахеометра TCR 1201 оказалась равной 0,26–0,34 мм, а для GeoMax, вычисленная по формулам Бесселя и Гаусса, соответственно, 0,42 и 0,44 мм.

Полученные разности измеренных расстояний также свидетельствуют, что поверяемый тахеометр соответствует своему классу точности. Разности расстояний между штативами свидетельствуют об их стабильности во время выполнения измерений.

Если поверка выполняется при стационарной установке отражателя, то штативы с трегерами заранее устанавливаются в точках *C*, *D*, *E*, *F* и *K*, а измерения выполняются в прямом (таблица 2.18) и обратном (таблица 2.19) направлениях. В этом случае имеется возможность дополнительно выполнить контроль результатов измерений по расстояниям между штативами из прямого и обратного ходов.

Таблица 2.18 – Поверка тахеометра в лабораторных условиях установкой тахеометров в створ (стационарная установка отражателя, ход прямо)

S, м	TCR 1201 (средние значения из 15 измерений, мм)		GeoMax (средние значения из 15 измерений, мм)		Разности, мм		Разности штативов, мм
	штатив в точке А	штатив в точке A_1	штатив в точке А	штатив в точке A_1	Δ_1=А-А	Δ_2=A_1-A_1	А-A_1
АС (A_1С)	8263,4	7852,9	8263,8	7853,4	-0,4	-0,4	410,5(410,4)
AD(A_1D)	30044,2	29634,0	30044,7	29634,5	-0,5	-0,5	410,2(410,2)
АЕ(A_1Е)	51510,6	51100,0	51511,1	51100,6	-0,5	-0,6	410,6(410,5)
AF(A_1F)	71020,7	70610,0	71021,4	70610,5	-0,7	-0,5	410,7(410,9)
АК(A_1К)	85318,5	84908,1	85319,3	84908,8	-0,8	-0,7	410,4(410,5)
АВ(A_1В)	92373,3	91963,0	92373,8	91963,7	0,5	-0,7	410,3(410,1)

Таблица 2.19 – Поверка тахеометра в лабораторных условиях установкой тахеометров в створ (произвольная установка отражателя, ход обратно)

S, м	TCR 1201 (средние значения из 15 измерений, мм)		GeoMax (средние значения из 15 измерений, мм)		Разности, мм		Разности штативов, мм
	штатив в точке А	штатив в точке A_1	штатив в точке А	штатив в точке A_1	Δ_1=А-А	Δ_2=A_1-A_1	А-A_1
АС (A_1С)	8263,7	7853,3	8264,2	7853,8	-0,5	-0,5	410,4(410,4)
AD(A_1D)	30044,4	29634,2	30044,9	29635,0	-0,5	-0,8	410,2(409,9)
АЕ(A_1Е)	51510,5	51100,3	51511,5	51101,0	-1,0	-0,7	410,2(410,5)
AF(A_1F)	71020,9	70610,1	71021,5	70610,9	-0,6	-0,8	410,8(410,6)
АК(A_1К)	85318,9	84908,4	85319,6	84909,2	-0,7	-0,8	410,4(410,4)
АВ(A_1В)	92373,7	91963,2	92374,2	91964,2	-0,5	-1,0	410,5(410,2)

Таким образом, выполненные исследования подтвердили возможность проведения поверки тахеометров способом, основанным на установке их в створ измеря-

емых линий. Тем самым практически полностью исключается влияние метеоусловий на результаты измерений длин линий, так как лучи лазеров проходят практически в одной воздушной среде. Так как измеряемые расстояния эталонным и поверяемым тахеометрами отличаются на незначительную величину, то контроль полученных результатов в процессе выполнения измерений не представляет затруднений, и наблюдатель может легко обнаружить грубую ошибку, например, если произошло случайное смещение штатива с отражателем.

В связи с тем, что при использовании данного способа поверки не предъявляются особые требования к выбору трассы, измерения можно производить и в городских условиях, особенно в зимнее время, когда доступ к стационарным линейным базисам значительно затруднен.

Схема метрологической поверки с установкой тахеометров в помещении. Если тахеометр будет использоваться на промплощадке где длины измеряемых линий в среднем равны 100–150 м, то метрологическую поверку можно выполнить с помощью схемы, разработанной с участием автора [86]. Также ее можно использовать зимой, когда выполнение соответствующих измерений значительно затруднено из-за погодных условий.

При ее реализации измерения выполняются с установкой эталонного и поверяемого тахеометров в помещении, а отражателя вне его, на соседнем здании (рисунок 2.30, *а*). Реализация данной схемы может производиться с использованием одного из двух вариантов, при которых эталонный и поверяемый тахеометры поочередно устанавливаются:

– на штативах с трегерами в точках *A* и *B* внутри помещения;

– на устойчивом подоконнике внутри помещения в точках *K* и *D* непосредственно перед окном;

– на устойчивом подоконнике вне помещения за окном (рисунок 2.30, *б*), в точках *L* и *M* (предложение автора);

– на специальном балконе в точках *R* и *P* или в дополнительной пристройке к зданию (предложение автора).

Отражатель *C* при этом постоянно закрепляется на соседнем здании на расстоянии 100–500 м.

Если измерения будут выполняться при положительной температуре наружного воздуха, то тахеометры устанавливаются перед окном, в точках *D* и *K*, а если при значительной (10–15 ºС) отрицательной температуре, то с целью исключения влияния его турбулентности на границе раздела двух сред тахеометры устанавливаются за окном, в точках *M* и *L* или *R* и *P*.

Поверка производится одновременным измерением через открытое окно эталонным и поверяемым тахеометрами выбранного расстояния. Для этого эталонный тахеометр TCR1201 (или TM30) и поверяемый, например, TCR405 устанавливаются рядом на подоконник и производятся измерения на отражатель *C*. Так как измерения производятся практически одновременно и лучи двух лазеров проходят также практически через одну воздушную среду, то поправки за метеоусловия в измеренные расстояния вводить не нужно. Измерение расстояний эталонным и поверяемым тахеометрами производится несколькими сериями с их перестановкой в трегерах.

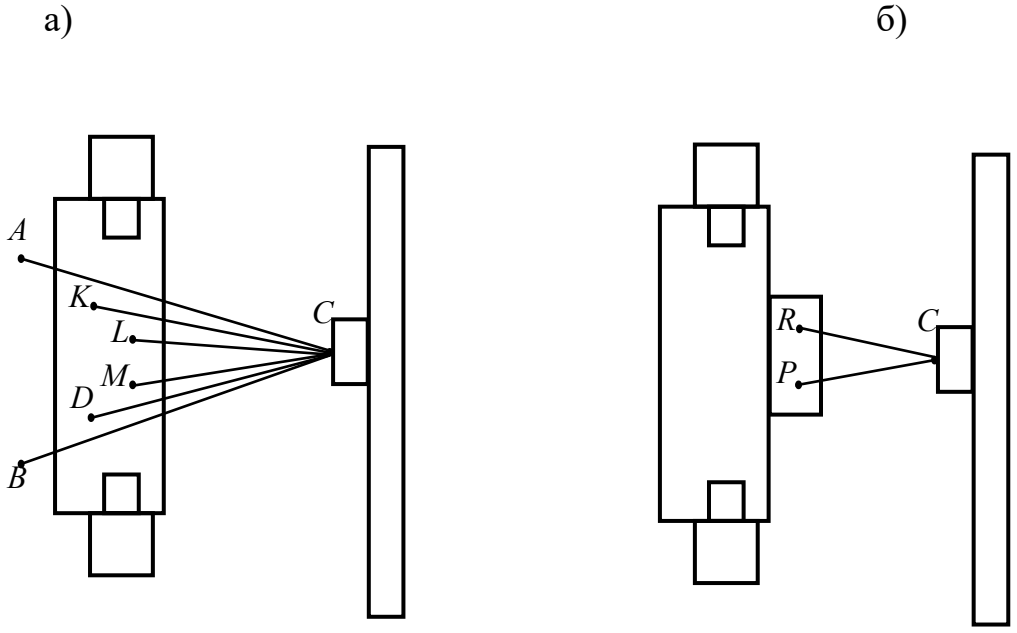


Рисунок 2.30 – Схема выполнения поверки с установкой тахеометров в помещении или на специальном балконе

С использованием предлагаемой автором схемы (см. рисунок 2.30) установки эталонного и поверяемого тахеометров (вне помещения, на подоконнике в точках *L* и *M*) были выполнены измерения несколькими сериями, одна из которых приведена в таблице 2.20.

Таблица 2.20 – Разности двойных измеренных расстояний эталонным и поверяемым тахеометрами

Номера циклов	Средние значения двойных расстояний *AC+BC*		Двойные разности Δ, мм	Разности Δ/2, мм
	TCR1201	TCR405	TCR 1201 – TCR405	TCR 1201 – TCR405
1	257 м 081,2 мм	257 м 081,9 мм	-0,7	-0,4
2	257 м 081,5 мм	257 м 082,2 мм	-0,7	-0,4
3	257 м 081,6 мм	257 м 082,2 мм	-0,6	-0,3
4	257 м 081,3 мм	257 м 081,8мм	-0,5	-0,2
5	257 м 081,6 мм	257 м 082,1 мм	-0,5	-0,2
6	257 м 081,6 мм	257 м 082,3 мм	-0,7	-0,4
7	257 м 081,4 мм	257 м 082,0 мм	-0,6	-0,3

На основании выполненных измерений можно сделать вывод, что средние значения разностей из двух измерений (из двух перестановок тахеометров) при открытом окне не превосходят 0,50 мм.

Достоинством данного способа поверки является возможность выполнения ее практически в любое время года и непосредственно на промплощадке инженерного сооружения.

Применительно к специализированным организациям для выполнения поверок целесообразно обустроить места *R* и *P* установок тахеометров на балконе здания (рисунок 2.30, б) с или в дополнительной пристройке к зданию на высоте 10-15 м (в зависимости от высоты соседних зданий). В этом случае при выполнении

измерений температурный режим будет одинаков по всей длине измеряемых расстояний и получаемые результаты не будут искажены влиянием внешних условий на границе различных температурных сред.

2.8 Исследование стабильности положения пунктов обоснования при их закреплении на разных горизонтах инженерных сооружений

При производстве высокоточных инженерно-геодезических измерений значительное внимание уделяется обеспечению стабильности пунктов планово-высотного обоснования. Это относится к пунктам, на которых установлены постоянно действующие базовые станции для применения спутниковых технологий, а также к пунктам, которые закрепляются на зданиях и инженерных сооружениях при создании обоснования на промплощадке. Стабильность таких пунктов зависит от изменения положения зданий и инженерных сооружений, которое зависит от изменения температуры воздуха в течение определенного промежутка времени (суток, недели, месяца).

Так, исследованиями установлено [7–9], что изменение планового положения пунктов (зданий) расположения базовых станций может составлять до 1,5–2,0 мм, что вносит систематическую ошибку в получаемые результаты.

Смещение пунктов обоснования имеет место и при выполнении высокоточных инженерно-геодезических работ на промплощадке. На начальной стадии возведения особо опасного и технически сложного инженерного сооружения существует прямая видимость между всеми пунктами деформационной сети. По мере возведения зданий и сооружений эта видимость закрывается, вследствие чего невозможным является непосредственное высокоточное измерение расстояний между смежными пунктами. В связи с этим в качестве переходных точек приходится использовать пункты планово-высотного обоснования промплощадки, которые могут быть закреплены следующими способами:

– на уровне земной поверхности с последующим использованием отражателей на штанге;

– светоотражающими марками, закрепленными на световых опорах;

– светоотражающими марками, закрепленными на соседних зданиях и инженерных сооружениях.

В стесненных условиях промплощадки наиболее широко используется последний вариант закрепления. При этом закрепление может производиться на разной высоте.

Для целей строительства пункты разбивочной основы должны быть определены с СКО не хуже, чем 2,5–3,0 мм. В противном случае производство разбивочных работ, а затем, при необходимости, и ведения деформационного мониторинга не будет соответствовать требованиям по определению фактического положения конструктивных элементов зданий.

В условиях промплощадки на величину СКО определения координат выносимых точек значительное влияние оказывают ошибки исходных данных. Появление ошибок исходных данных часто вызывается нарушением их планового положения, вызванных:

– деформацией (в основном, их наклоном) отдельных строительных конструкций;

– механическим их смещением, возникающим при монтаже этих строительных конструкций;

– солнечным нагревом здания, особенно в летний период времени.

Последний фактор особенно имеет место при возведении высотных зданий. Это обусловлено тем, что при решении обратной линейно-угловой или полярной засечки (с целью передачи координат на монтажные горизонты) пункты разбивочной сети, как уже указывалось ранее, приходится устанавливать на соседних зданиях на разной высоте. При дальнейшем использовании этих пунктов важным фактором является пространственная стабильность их положения во времени. Нарушение этой стабильности приедет к появлению в результатах измерений ошибок исходных данных.

Рассмотрим влияние солнечного нагрева высотного здания на характер и величину изменения положения пунктов разбивочной сети.

Исследования выполнялись [43] в июне при малооблачной погоде, слабом ветре и перепаде температур от 17–18 °С в $6^{h}\ 00^{m}$ до 26–28 °С в полуденное время и 22–24 °С в $21^{h}00^{m}$. Для проведения эксперимента было выбрано 25-этажное жилое здание с одним подъездом, на самой высокой части которого были выбраны визирные цели (рисунок 2.31). После этого на расстояниях, превышающих 200 м, в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на жестком основании устанавливались тахеометры. Один из тахеометров был установлен по направлению север-юг, а другой по направлению запад-восток. Для исключения влияния на тахеометр солнечной радиации применялся геодезический зонд.

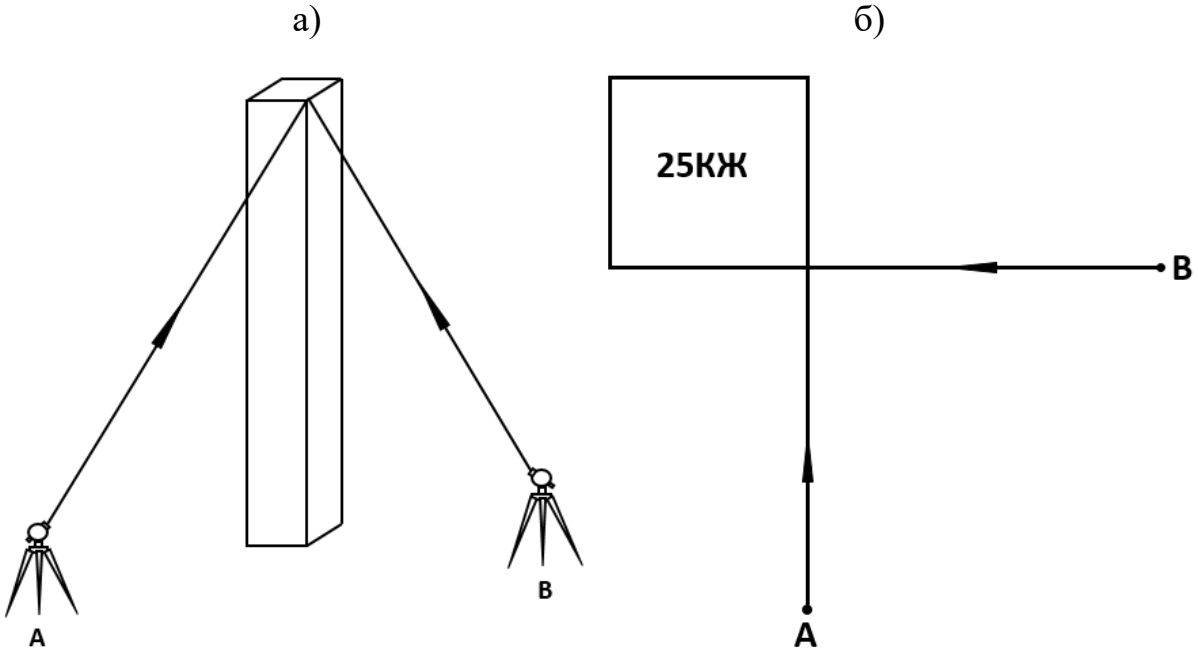


Рисунок 2.31 – Схема выполнения измерений

После этого, зрительные трубы тахеометров наводились на хорошо видимые визирные цели и начиная с $6^{h}00^{m}$ с интервалом 60 минут в течение трех дней производились измерения расстояний в безотражательном режиме. Расстояния измерялись три раза с последующим нахождением среднего значения. Такие измерения проводились до $21^{h}00^{m}$. Результаты измерений представлены в таблице 2.21 и на графиках (рисунки 2.32–2.34).

Таблица 2.21– Значения наклонных расстояний на визирные цели

Время выполнения измерений	24.06.23	26.06.23	27.06.23
6:00	**203м 057 мм** 216м 130 мм	**203 м 212 мм** 216 м 020 мм	**203 м 144 мм** 216 м 083 мм
7:00	203м 057 мм 216м 129 мм	203 м 214мм 216 м 022 мм	203 м 146 мм 216 м 085 мм
8:00	203м 061 мм 216м 132 мм	203 м 217мм 216 м 025 мм	203 м 150 мм 216 м 090мм
9:00	203м 064 мм 216м 132 мм	203 м 221 мм 216 м 027 мм	203 м 156 мм 216 м 094 мм
10:00	203м 071 мм 216м 133 мм	203 м 227 мм 216 м 030 мм	203 м 162 мм 216 м 095 мм
11:00	203м 080 мм 216м 134 мм	203 м 232 мм 216 м 031 мм	203 м 167 мм 216 м 098 мм
12:00	203м 087 мм 216м 135 мм	203 м 238 мм 216 м 035 мм	203 м 174 мм 216 м 100 мм
13:00	203м 094 мм 216м 136 мм	203 м 243 мм 216 м 038 мм	203 м 180 мм 216 м 103 мм
14:00	203м 103 мм 216м 137 мм	203 м 251 мм 216 м 038 мм	203 м 185 мм 216 м 102 мм
15:00	203м 098 мм 216м 137 мм	203 м 262 мм 216 м 040 мм	203 м 191 мм 216 м 098 мм
16:00	203м 088 мм 216м 135 мм	203 м 252 мм 216 м 041 мм	203 м 188 мм 216 м 097 мм
17:00	203м 085 мм 216м 134 мм	203 м 250 мм 216 м 039 мм	203 м 183 мм 216 м 096 мм
18:00	203м 084 мм 216м 134 мм	203 м 247 мм 216 м 036 мм	203 м 180 мм 216 м 094 мм
19:00	203м 080 мм 216м 133 мм	203 м 244 мм 216 м 033 мм	203 м 177 мм 216 м 090 мм
20:00	203м 076 мм 216м 134 мм	203 м 240 мм 216 м 030 мм	203 м 174 мм 216 м 090 мм
21:00	203м 075 мм 216м 134 мм	203 м 234 мм 216 м 028 мм	203 м 168 мм 216 м 088 мм
Примечание. В числителе направление север-юг, в знаменателе – запад-восток.			

В таблице 2.22 приведены разности смещений верха здания, из которой следует, что смещение верха здания в течение дня в нашем случае достигает 50,0 мм.

Таблица 2.22– Разности смещений верха здания

Время выполнения измерений	Направление горизонта	Разность результатов измерений, относительного первых измерений в 6 часов 00 минут, мм		
		24.06.2023	26.06.2023	27.06.2023
6:00	север-юг	0	0	0
	запад-восток	0	0	0
7:00	север-юг	0	2	2
	запад-восток	-1	2	2
8:00	север-юг	4	5	6
	запад-восток	2	5	7
9:00	север-юг	7	9	12
	запад-восток	2	7	11
10:00	север-юг	14	15	18
	запад-восток	3	10	12
11:00	север-юг	23	20	23
	запад-восток	4	11	15
12:00	север-юг	30	26	30
	запад-восток	5	15	17
13:00	север-юг	37	31	36
	запад-восток	6	18	20
14:00	север-юг	46	39	41
	запад-восток	7	18	19
15:00	север-юг	41	50	47
	запад-восток	7	20	15
16:00	север-юг	31	40	44
	запад-восток	5	21	14
17:00	север-юг	28	38	39
	запад-восток	4	19	13
18:00	север-юг	27	35	36
	запад-восток	4	16	11
19:00	север-юг	23	32	33
	запад-восток	3	13	7
20:00	север-юг	19	28	30
	запад-восток	4	10	7
21:00	север-юг	18	22	24
	запад-восток	4	8	5

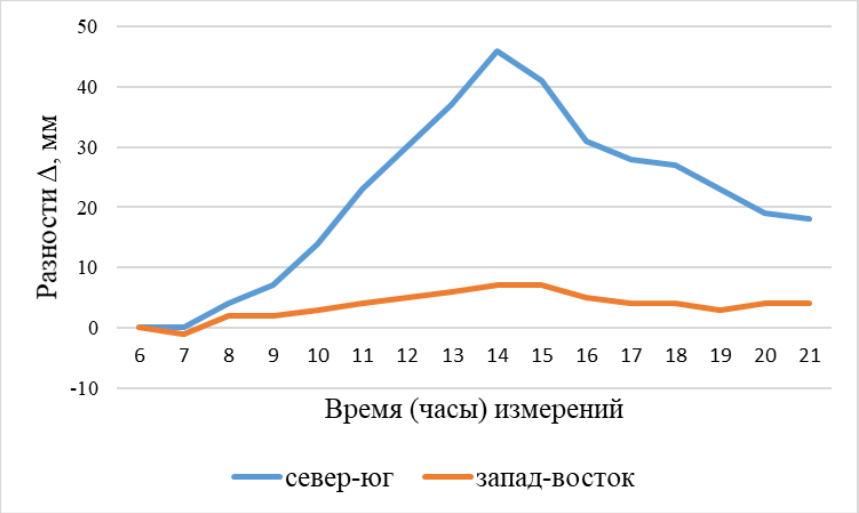


Рисунок 2.32 – График изменения разности результатов измерения наклонного расстояния, относительного результата в 6:00 (24.06.2023)

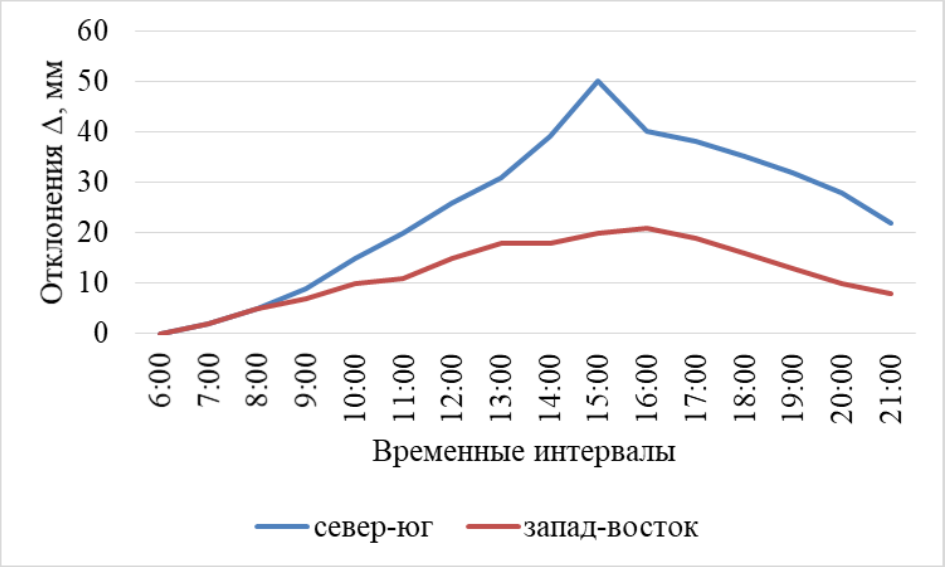


Рисунок 2.33 – График изменения разности результатов измерения наклонного расстояния, относительного результата в 6:00 (26.06.2023)

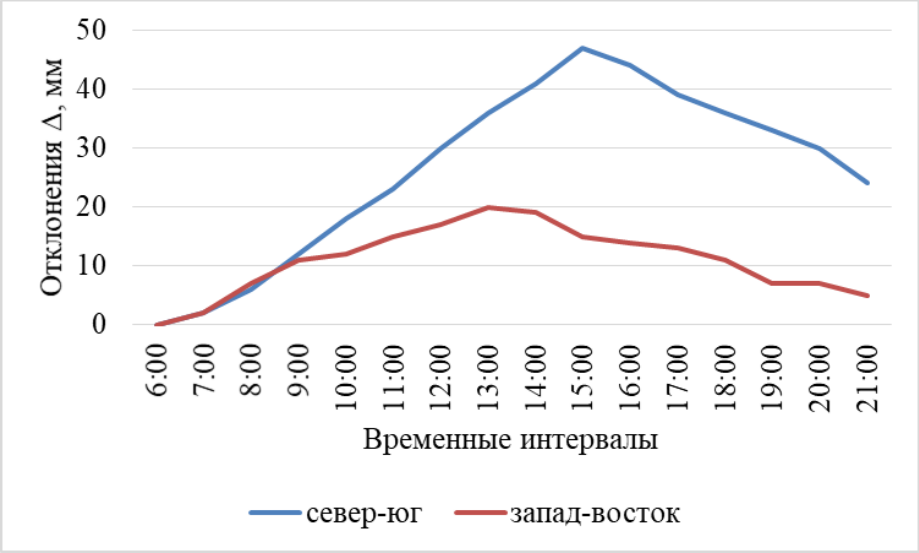


Рисунок 2.34 – График изменения разности результатов измерения наклонного расстояния, относительного результата в 6:00 (27.06.2023)

Из результатов измерений следует, что при размещении пунктов обоснования на инженерных сооружениях и зданиях необходимо учитывать их возможное смещение в течение суток, обусловленное солнечным нагревом. В связи с этим необходимо:

– перед размещением пунктов оценить вероятность значительного солнечного нагрева сооружения;

– после установки пунктов провести в течение дня определение стабильности их положения;

– при обнаружении смещений оценить величину их влияния на точность последующих измерений и, при необходимости, выбрать другие места размещения пунктов.

Эти мероприятия позволят уменьшить влияние ошибок исходных данных.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОТНОГО ОБОСНОВАНИЯ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

3.1 Анализ методики выполнения высокоточного геометрического нивелирования на объектах атомной промышленности

Согласно требованиям п. 1.3 нормативного документа [109], на объектах атомной промышленности должны производиться высокоточные инженерно-геодезические измерения по определению их деформационного состояния. К таким объектам относятся [105,109]:

– объекты с промышленными и исследовательскими ядерными реакторами, а также критическими и подкритическими ядерными стендами;

– объекты с ядерным топливом и материалами, включая установки для их производства, использования и переработки;

– стационарные объекты и инженерные сооружения, которые предназначены для хранения ядерных материалов, а также хранения и захоронения радиоактивных отходов;

– объекты, которые относятся к особо опасным и технически сложным.

В подавляющем большинстве случаев определение деформационного состояния таких объектов, а также тепловых электростанций, производится высокоточным геометрическим нивелированием [93, 109], включая наблюдения за деформационным состоянием земной поверхности на промплощадках.

При планировании выполнения высокоточного геометрического нивелирования I и II классов на техногенных геодинамических полигонах объектов атомной промышленности необходимо иметь в виду то обстоятельство, что методика его выполнения имеет ряд существенных отличий по сравнению с государственным нивелированием:

– нивелирные ходы между реперами имеют длину всего 0,5–1,0 км;

– в условиях загруженности промплощадки строительными конструкциями (на стадии строительства) и различными вспомогательными сооружениями и зданиями (во время эксплуатации) прокладывание нивелирных ходов I класса по двум линиям крайне затруднительно (особенно с соблюдением равенства плеч);

– расстояние между реперами часто не превосходит 100–150 м, что затрудняет организацию двух линий нивелирования.

С учетом этих факторов следует применять такую методику выполнения высокоточного нивелирования, которая будет обеспечивать:

1) ослабление влияния систематических ошибок, в первую очередь из-за перемещения системы «штатив – цифровой нивелир»;

2) получение необходимой точности измерения превышений на станции и в нивелирном ходе в целом;

3) контроль результатов измерений на станции;

4) удобство при выполнении нивелирования по реперам полигона и осадочным маркам инженерного сооружения.

Так как действие нормативного документа [18] отменено, то параллельно с другим действующим нормативным документом [109] организация «СОЮЗАТОМГЕО» выпустила ведомственный нормативный документ применительно к его использованию при выполнении инженерно-геодезических измерений на объектах атомной промышленности. Рассмотрим требования нормативного документа [109] (приложение Д1.1), который предписывает выполнять высокоточное нивелирование для объектов атомной промышленности.

Из данного документа следует, что согласно его требованиям (таблица 3.1) изменены технические параметры выполнения высокоточного нивелирования, выполняемого оптическими и цифровыми нивелирами:

– значительно по сравнению с рекомендациями авторов, приведенными в первом разделе, увеличена предельная длина визирного луча до 100 м как для обычного, так и для разрядного нивелирования;

– уменьшена величина СКО измерения превышения на станции для цифрового нивелира до 0,07 мм;

– для цифровых нивелиров уменьшилась допустимая величина разности двух превышений на станции и величина допустимой невязки в ходе.

Таблица 3.1 – Основные параметры высокоточного нивелирования для деформационного мониторинга объектов атомной промышленности [109]

Параметры	Применяемые нивелиры			
	Оптические		Цифровые	
	Iкл (1раз)	IIкл (2раз)	I кл(1раз)	IIкл (2раз)
Число направлений	2 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)
Число линий	2 (1)	1 (1)	2 (1)	1 (1)
Предельная длина визирного луча, м	50 (40)	65 (70)	100 (100)	100 (100)
Средняя длина визирного луча, м	30 (25)	40 (40)	50 (50)	70 (50)
Допустимое неравенство плеч на станции (секции)	0,5/1,0 (0,5/1,0)	1,0/2,0 (1,0/2,0)	0,5/1,0 (0,5/1,0)	0,5/1,0 (0,5/1,0)
Число измеряемых превышений	8(8)	4(4)	8(4)	4(2)
Среднее количество штативов (n) на 1 км хода, шт.	15 (15)	15 (15)	10 (10)	10 (10)
СКО превышения на станции, мм	0,16 (0,15)	0,30 (0,30)	0,07 (0,10)	0,10 (0,15)
Предельная разность между двумя превышениями на станции, мм	0,5 (0,5)	0,7 (-)	0,10 (0,14)	0,15 (-)
Допустимая невязка в замкнутом ходе (n – число станций), мм.	$0{,}16\sqrt{n}$ $(0{,}30\sqrt{n})$	$0{,}30\sqrt{n}$ $(0{,}50\sqrt{n})$	$0{,}10\sqrt{n}$ $(0{,}15\sqrt{n})$	$0{,}15\sqrt{n}$ $(0{,}30\sqrt{n})$
Примечание. В скобках даны параметры для разрядного нивелирования.				

Вместе с тем, в приложении Д.4.2.3 нормативного документа [109] при выполнении нивелирования короткими лучами оптическими нивелирами предписывается руководствоваться требованиями, указанными в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные технические характеристики и допуски для высокоточного нивелирования короткими лучами

Технические требования и характеристики	Здания, длительное время эксплуатируемые, возводимые на скальных и полускальных грунтах	Здания и сооружения, возводимые на песчаных, глинистых и других сжимаемых грунтах
Максимальная длина визирного луча, м	25	25
СКП превышения на станции $m\sqrt{n}$ мм	0,07	0,20
Допустимое неравенство расстояний от нивелира до реек, м	0,30	0,30
Допустимое расхождение превышений, полученных при двух горизонтах инструмента, мм	0,14	0,40
Допустимая невязка в полигоне, мм	$0{,}14\sqrt{n}$	$0{,}4\sqrt{n}$
СКП суммы превышений на 1 км хода, мм	0,30	1,0
Нивелирные хода прокладываются	Прямо, при двух горизонтах инструмента	Прямо, при двух горизонтах инструмента

Выполним анализ параметров высокоточного нивелирования, приведенных в таблицах 3.1 и 3.2.

Если рассматривать технические параметры нивелирования, применяемого для мониторинга объектов атомной промышленности, приведенные в таблице 3.1, то необходимо отметить, на наш взгляд, следующие обоснованные замечания.

1 При выполнении высокоточного нивелирования длина визирного луча, равная 100 м, на промплощадке АЭС встречается крайне редко, тем более для разрядного нивелирования. При выполнении нивелирования 1 и 2 разрядов длина визирного луча в среднем находится в пределах от 5,0 до 25,0 м. В связи с этим рекомендовать к использованию длину визирного луча 100 м, на наш взгляд, не имеет смысла.

2 При длине визирного луча 100 м получить величину СКО измерения превышения, равную 0,07–0,10 мм, на станции практически невозможно по следующим причинам:

– вследствие значительного влияния турбулентности воздуха (в летний период) даже в утренние и вечерние часы или при прохождении визирного луча вблизи нагретых строительных конструкций инженерных сооружений;

– вследствие влияния вибрации от работающего на промплощадке строительного оборудования или технологического (турбоагрегаты, краны, циркнасосы и т. д.) внутри сооружения;

– в зимний период система «штатив – нивелир» является неустойчивой даже при тщательной очистке ее места установки от снега (льда);

– говорить о величине 0,07–0,10 мм на станции можно только по внутренней сходимости выполненных измерений и при установке штатива на бетонное основание.

При этом согласно п. 8.1.2.3 данного документа, также дополнительно указывается, что:

– при уравнивании нивелирных сетей допустимые невязки должны быть рассчитаны по параметрам, указанным в таблице 3.3;

– использование невязок, подсчитываемых по формулам $f = 3{,}0мм\sqrt{L}км$ и $f = 5{,}0мм\sqrt{L}км$ (см. таблицу 3.3) применительно к нивелированию I и II классов запрещено, так как они разработаны для линий с длиной более 20 км;

– замена левой или правой линий нивелирования в технологии нивелирования I класса двумя ходами (или сменой горизонта нивелира) запрещена, так как в этом случае не выполняются условия контроля превышения задней (передней) пары костылей (башмаков);

– замена прямого или обратного хода в технологии нивелирования II класса и 2-го разряда одним ходом со сменой горизонта нивелира запрещена, так как в этом случае не выполняется условие компенсации перемещения переднего костыля, или башмака по нивелирному ходу.

Таблица 3.3 – Параметры уравнивания высокоточного нивелирования (согласно таблице 8.1 [109])

Параметры	Классическое нивелирование				Разрядное нивелирование			
	оптические		цифровые		оптические		цифровые	
	I	II	I	II	1	2	1	2*
СКП превышения на станции, мм	0,16	0,30	0,07	0,10	0,15	0,30	0,10	0,15
Допустимая невязка в замкнутом ходе (n – число станций), мм	$\overline{0,16}\sqrt{n}$	$\overline{0,30}\sqrt{n}$	$\overline{0,10}\sqrt{n}$	$\overline{0,15}\sqrt{n}$	$\overline{0,30}\sqrt{n}$	$\overline{0,50}\sqrt{n}$	$\overline{0,15}\sqrt{n}$	$\overline{0,30}\sqrt{n}$
* Нивелирование второго разряда выполняется при одном горизонте инструмента в прямом и обратном направлениях.								

Вместе с тем, как уже указывалось выше, согласно п. 8.1.2.3 нормативного документа [109] в методику выполнения высокоточного нивелирования на промплощадках организаций «СОЮЗАТОМГЕО», на наш взгляд, вводятся неоправданные ограничения.

Так, запрет на замену левой или правой линий нивелирования в технологии нивелирования I класса двумя ходами (или сменой горизонта нивелира) из-за невыполнения условия контроля превышения задней (передней) пары костылей (башмаков) не обоснован по следующим причинам.

1 При выполнении нивелирования I класса вообще не допускается применение башмаков, тем более пары (для левой и правой линий), даже на бетонном основании. В этом случае лучше использовать забитые дюбеля.

2 Промплощадка АЭС выбирается только на устойчивых грунтах и поэтому хорошо забитая пара костылей с последующей выдержкой 1,5–2,0 минуты практически не изменяет своего положения. Изменение может быть в пределах только 0,01–0,02 мм и их возможное накопление на станциях (между глубинными реперами) будет исчезающе малым, так как длины ходов между смежными глубинными реперами, как правило, не превосходят 0,3–0,5 км. Так как нивелирные ходы между глубинными реперами в каждом цикле измерений прокладываются практически по одному и тому же ходу, то целесообразно применять костыли длиной 30–35 см,

которые после закрепления будут практически стабильными и их можно использовать при последующих циклах нивелирования, оставляя их забитыми на 2,0–3,0 см ниже уровня земной поверхности (с целью исключения случайного их уничтожения).

3 Выполнять нивелирование по двум линиям в условиях загруженной промплощадки крайне затруднительно. На промплощадке часто расстояние между глубинными реперами в среднем равно 250–300 м и даже бывает меньше. Например, на промплощадках энергоблока с реакторами ВВЭР-1200 оно может быть равно 80–100 м и измерение превышения между ними можно будет выполнить с одной нивелирной станции. В этом случае все равно приходится измерять превышение четырьмя горизонтами, но по одной линии хода.

Таким образом, в условиях загруженной промплощадки целесообразнее выполнять нивелирование I класса по одной линии хода в прямом и обратном направлениях со сменой горизонта нивелира.

Вместе с тем, в таблице 3.1 приведены рекомендуемые параметры и для выполнения нивелирования I класса по двум линиям.

Запрет по замене прямого или обратного хода в технологии нивелирования II класса и 2-го разряда одним ходом со сменой горизонта нивелира из-за невыполнения условия компенсации перемещения переднего костыля, или башмака по нивелирному ходу не обоснован тем, что согласно исследованиям [129] возможная величина такого остаточного влияния на устойчивых грунтах на станции также не превосходит 0,01–0,02 мм и эта величина, в основном, носит случайный характер. При условии временной задержки на 1,5–2,0 минуты после забивки переднего костыля можно говорить о практически полной стабилизации переднего костыля. Также из-за коротких (1,5–2,0 км) нивелирных ходов это возможное накопление оседания исчезающе мало.

Необходимо отметить, что и положение заднего костыля также не является полностью устойчивым. Например, он изменяет свое положение под действием веса рейки и давления рук реечника во время ее удержания.

При анализе таблицы 3.2, в которой рекомендуются основные технические характеристики и допуски для высокоточного нивелирования короткими лучами, необходимо отметить следующее:

– не представляется целесообразным при одних и тех же технических параметрах (предельной длине визирного луча и одном направлении нивелирного хода) рекомендовать разные величины СКО измерения превышения на станции (0,07 и 0,20 мм) и в нивелирном ходе (0,30 и 1,00 мм), а также разной величины допустимой невязки в полигоне (0,14мм$\sqrt{n}$ и 0,40мм$\sqrt{n}$) при решении одинаковых задач по деформационному мониторингу;

– если при выполнении нивелирования на объекте атомной промышленности длина визирного луча не будет превосходить 25,0 м, то возникает вопрос, какой из таблиц (3.1 или 3.2) руководствоваться для оценки точности измерений и при их производстве в прямом и обратном направлениях;

– при возведении особо опасного и технически сложного инженерного сооружения одинакового уровня ответственности точность выполнения инженерно-геодезических измерений должна быть одинаковой независимо от типа грунтов, на котором оно возводится;

– в связи с этим требования к допускам на невязку в ходе, разности превышений между двумя горизонтами, величине СКО измерения превышения на станции и в нивелирном ходе должны быть одинаковы.

Таким образом, данные таблиц 3.1 и 3.2 по основным техническим характеристикам и допускам для высокоточного нивелирования в значительной степени противоречат друг другу.

В отличие от обычных геодинамических полигонов, на техногенных геодинамических полигонах дополнительно производятся высокоточные инженерно-геодезические измерения по определению деформационного состояния находящихся на их территории (промплощадке) инженерных сооружений. На рисунке 3.1 приведены схема нивелирных ходов и расположение инженерных сооружений на таком техногенном геодинамическом полигоне.

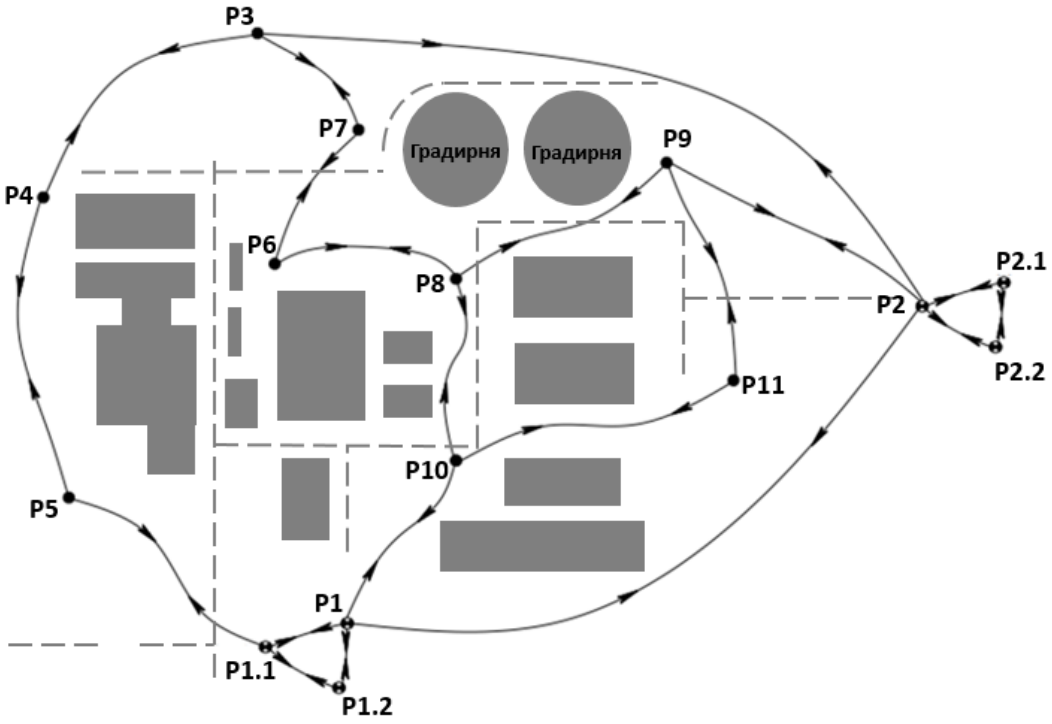


Рисунок 3.1 – Схема нивелирных ходов I класса на техногенном геодинамическом полигоне строящейся АЭС

В таких случаях решаются две основные задачи:

– определение деформационного состояния земной поверхности на промплощадке данного объекта;

– определение деформационного состояния находящихся на этой промплощадке инженерных сооружений.

Важным фактором при выполнении высокоточного геометрического нивелирования на таком полигоне является выбор методики измерений на станции и в нивелирном ходе в целом с учетом того, что в настоящее время при нивелировании I и II класса в подавляющем большинстве случаев применяются цифровые нивелиры.

Рассмотрим некоторые технологические особенности применения цифровых нивелиров для нивелирования I и II класса на ТГП с учетом того, что до настоящего времени не разработан единый государственный нормативный документ по методике его выполнения.

3.2 Особенности методики выполнения высокоточного геометрического нивелирования I и II класса цифровыми нивелирами

При закладке реперов и утверждении (выборе) методики выполнения высокоточного геометрического нивелирования на геодинамическом полигоне необходимо учитывать тот факт, что в настоящее время в геодезическом производстве вместо нивелиров с визуальным отсчитыванием начали применяться цифровые нивелиры. Нивелиры с визуальным отсчитыванием применяются в основном для контроля результатов нивелирования, полученных цифровыми нивелирами. Для этого на одной из секций нивелирного хода повторно (после нивелирования цифровым нивелиром) выполняется нивелирование визуальным отсчитыванием. Поэтому с началом применения цифровых нивелиров данные рекомендации существовавшего нормативного документа [18] использоваться не могут. В связи с этим для выполнения цифровыми нивелирами высокоточного нивелирования I класса различного назначения (создание высотной сети на территории РФ и высокоточное нивелирование на различных геодинамических полигонах) в 2013 г. в ЦНИИГАиК была разработана для апробирования временная инструкция [15], в которой были рекомендованы программы работ на станции (таблица 3.4). Из таблицы следует, что в отличие от требований существующей инструкции (для нивелиров с визуальным отсчитыванием) имеются значительные отличия в отношении величин допусков на станции и в нивелирном ходе.

В настоящее время действие данной инструкции прекращено, так как она не была принята в окончательной редакции. В связи с этим организации, которые выполняют цифровыми нивелирами нивелирование I и II классов различного назначения, применяют разную программу наблюдений как на станции, так и в нивелирном ходе в целом. При этом часто не учитываются конструктивные особенности их применения, а также необходимости компенсации на нивелирной станции и в ходе в целом перемещения системы «штатив – цифровой нивелир».

Таблица 3.4 – Основные параметры нивелирования I класса цифровыми нивелирами, рекомендуемые временной инструкцией [15]

Параметр нивелирования	Равнинная территория	В горных районах
Максимальная длина визирного луча, м – при одной линии – при двух линиях	 35–45 50–60	 40
Минимальная высота визирования – для плеч менее 30 м	0,8 0,3	0,5 0,3
Максимальное расхождение превышений на станции, мм	0,4	0,4
Максимальное расхождение превышений между парой костылей, мм	0,7	0,7
Неравенство плеч на станции	0,5	0,5
Допустимое расхождение между прямым и обратным ходами, мм	$1{,}0\sqrt{L}$	По существующей инструкции

В отличие от действующей инструкции [18] для нивелиров с визуальным отсчитыванием, которая разрешала использовать только одну методику нивелирования, временная инструкция [15] для нивелирования I класса цифровыми нивелирами предусматривала применение одной из двух предлагаемых методик:

– высокоточное нивелирование в прямом и обратном направлениях прокладыванием нивелирного хода по одной линии (таблица 3.5);

– высокоточное нивелирование в прямом и обратном направлениях прокладыванием нивелирного хода по двум линиям (таблицы 3.6 и 3.7).

Таким образом, если нивелирование I класса цифровыми нивелирами выполняется по одной линии нивелирования (по одной паре костылей или кольев), то взятие отсчетов по штрихкодовой рейке выполняется при двух горизонтах инструмента в прямом и обратном направлениях (см. таблицу 2.4). При этом порядок отсчитывания на нечетной и четной станциях начинается, соответственно, с задней (или передней) рейки (ЗППЗ и ПЗЗП).

Таблица 3.5 – Порядок взятия отсчетов по рейкам на станции цифровыми нивелирами (одна линия нивелирования I класса)

Последовательность взятия отсчетов	Нечетная станция хода	Четная станция хода
1	Отсчет по задней рейке $З_1$	Отсчет по передней рейке $П_1$
2	Отсчет по передней рейке $П_1$	Отсчет по задней рейке $З_1$
	Изменение высоты горизонта цифрового нивелира	***Изменение высоты горизонта цифрового нивелира***
3	Отсчет по передней рейке $П_2$	Отсчет по задней рейке $З_2$
4	Отсчет по задней рейке $З_2$	Отсчет по передней рейке $П_2$

Таким образом, если измерение превышения на станции производится при двух горизонтах нивелира, то получается два превышения, в то время как при использовании нивелиров с визуальным отсчитыванием получается четыре.

При этом прокладывание нивелирного хода в обратном направлении также должно выполняться по той же трассе, что и в прямом направлении, а также по тем же переходным точкам и, по возможности, в разные половины дня (с целью ослабления влияния вертикальной рефракции).

Согласно требованиям этой временной инструкции, при выполнении наблюдений на станции при одной линия нивелирования используется симметричная программа наблюдений ЗП – ПЗ для нечетной станции и ПЗ – ЗП для четной.

Важным отличием применения одной линии нивелирования является уменьшение длины визирного луча до 35–45 м, что тем самым приводит к повышению точности измерения превышения на станции при одном горизонте.

Если же нивелирование выполняется по двум линиям нивелирного хода, то смена горизонта нивелира производится также дважды. Порядок наблюдений на станции нивелирования I класса цифровыми нивелирами по двум линиям нивелирования приведен в таблицах 3.6, 3.7.

Таблица 3.6 – Порядок наблюдений на нечетной станции нивелирования I класса цифровыми нивелирами (две линии нивелирования)

Последовательность взятия отсчетов	Нечетная станция хода (правая линия)	Нечетная станция хода (левая линия)
1	Отсчет по задней рейке (Зпр)$_1$	Отсчет по задней рейке (Злев)$_1$
2	Отсчет по передней рейке (Ппр)$_1$	Отсчет по передней рейке (Плев)$_1$
	Изменение высоты горизонта нивелира	***Изменение высоты горизонта нивелира***
3	Отсчет по передней рейке (Ппр)$_2$	Отсчет по передней рейке (Плев)$_2$
4	Отсчет по задней рейке (Зпр)$_2$	Отсчет по задней рейке (Злев)$_2$

Таблица 3.7 – Порядок наблюдений на четной станции нивелирования I класса цифровыми нивелирами (две линии нивелирования)

Последовательность взятия отсчетов	Четная станция (правая линия)	Четная станция (левая линия)
1	Отсчет по передней рейке (Ппр)$_1$	Отсчет по передней рейке (Плев)$_1$
2	Отсчет по задней рейке (Зп)$_1$	Отсчет по задней рейке (Зл)$_1$
	Изменение высоты горизонта нивелира	***Изменение высоты горизонта нивелира***
3	Отсчет по задней рейке (Зп)$_2$	Отсчет по задней рейке (Зл)$_2$
4	Отсчет по передней рейке (Пп)$_2$	Отсчет по передней рейке (Пл)$_2$

Из таблиц следует, что при выполнении нивелирования по двум линиям также используется симметричная программа наблюдений:

а) нечетная станция:

– *($З_{пр}$)-($П_{пр}$)* смена горизонта *($П_{пр}$-$З_{пр}$);*

– ($З_{лев}$)-($П_{лев}$) смена горизонта ($П_{лев}$)-($З_{лев}$);

б) четная станция:

– ($П_{пр}$)-($З_{пр}$) смена горизонта (Зпр)-(Ппр);

– (Плев)-(Злев) смена горизонта (Злев)-(Плев).

Таким образом, измерение производится при двух горизонтах цифрового нивелира, что позволяет получить на станции четыре независимых превышения.

В отличие от выполнения нивелирования по одной линии, при использовании двух линий нивелирования длина визирного луча увеличивается до 50–60 м.

Необходимо отметить, что изменение горизонта инструмента может быть выполнено ножками штатива или подъемными винтами нивелира. Однако, с целью сохранения стабилизации системы «штатив – цифровой нивелир» изменение горизонта необходимо производить подъемными винтами нивелира.

Из сравнения программ наблюдений на станции следует, что при выполнении нивелирования I класса нивелирами с визуальным отсчитыванием на станции всегда получается четыре превышения, в то время как с использованием цифровых нивелиров и одной линии нивелирования – только два. С учетом этого следует ожидать, что в этом случае надежность результатов нивелирования будет меньше. Также не представляется возможным вычисление шести разностей превышений [18]

$$\begin{aligned} d_1 &= (h_{прав} - h_{лев})_{пр}, \\ d_2 &= (h_{прав} - h_{лев})_{обр}, \\ d_3 &= (h_{прям} - h_{обр})_{прав}, \\ d_4 &= (h_{прям} - h_{обр})_{лев}, \\ d_5 &= (h_{прав} - h_{лев})_{ср}, \\ d_6 &= (h_{прям} - h_{обр})_{ср}, \end{aligned} \qquad (3.1)$$

где $h_{прав}$, $h_{лев}$, $h_{пр}$, $h_{обр}$ – превышения, измеренные, соответственно, по правой и левой линиям хода в прямом и обратном направлениях.

Накопление указанных разностей происходит в процессе выполнения нивелирования с учетом выбранной методики нивелирования. Если выполнять требования инструкции по нивелированию, то получаемые систематические накопления разностей d_1, d_2, d_5 будут составлять не более 0,05 мм на 1 км хода, а разностей d_3, d_4, d_6 – около 0,1 мм на 1 км хода. При этом накопление разностей d_3, d_4 и d_6 происходит вследствие выпирания костылей (кольев) из грунта.

Вычисление указанных разностей возможно только при выполнении нивелирования цифровыми нивелирами по двум линиям. При этом вместо нахождения разностей превышений между основной и дополнительной шкалам для нивелиров с визуальным отсчитыванием при использовании цифровых нивелиров эта разность превышений между двумя горизонтами нивелира в прямом ходе находится по формулам

$$\Delta_1 = (h_{\text{пр}})_1\text{-}(h_{\text{пр}})_2, \qquad (3.2)$$
$$\Delta_2 = (h_{\text{лев}})_1\text{-}(h_{\text{лев}})_2,$$

и

$$\Delta_3 = (h_{\text{лев}})_1\text{-}(h_{\text{лев}})_2,$$
$$\Delta_4 = (h_{\text{пр}})1\text{-}(h_{\text{пр}})_2. \qquad (3.3)$$

в обратном.

При выполнении нивелирования I класса по одной линии находится разность превышений на станции только из двух горизонтов нивелира (по аналогии с нивелированием II класса)

$$\Delta=(h_{\text{гор}})_1\text{-}(h_{\text{гор}})_2. \qquad (3.4)$$

Необходимо отметить, что в настоящее время предприятия, занимающиеся выполнением нивелирования I класса, применяют только программу с двумя линиями хода. Нивелирование II класса выполняется по одной линии хода.

Важным параметром, влияющим на величину СКО измерения превышения на станции, является допустимое расхождение превышений на станции. При выполнении нивелирования оптическими нивелирами сравниваются значения превышений из наблюдений по основной и дополнительной шкалам, которые не должны превышать 0,5 мм. В случае применения цифровых нивелиров сравниваются значения превышений, полученные из двух горизонтов инструмента. Эти расхождения уменьшены с 0,5 до 0,4 мм (см. таблицу 3.4) независимо от числа линий нивелирования и длины визирного луча.

Необходимо отметить, что к настоящему времени не разработан общий нормативный документ (инструкция) по выполнению нивелирования I и II класса и каждая организация выполняет его с соблюдением своих технологических требований, которые порой не выдерживают никакой критики. Например, при выполнении нивелирования I класса по двум линиям устанавливается неравенство плеч на станции, равное 0,3 м, которое трудно выдержать при смене направления нивелирного хода с учетом сохранения его накопления 1,0 м по ходу и по секции в целом.

3.3 Влияние перемещения системы «штатив – цифровой нивелир» на измеряемое превышение

Согласно положениям существовавшей инструкции [18], на геодинамических полигонах нивелирование I и II классов выполнялось нивелирами с визуальным отсчитыванием только по двум линиям хода. После появления в геодезическом производстве цифровых нивелиров разрабатывались методики его выполнения, включая программы работ на нивелирной станции. Такие программы наблюдений на станции для выполнения нивелирования I и II классов с целью создания опорных нивелирных сетей на территорию страны были предложены, например, в работах [85, 117, 118].

Рассмотрим программы выполнения высокоточного нивелирования применительно к ТГП с учетом особенностей влияния внешних условий на точность измеряемых превышений цифровыми нивелирами и с применением различных программ наблюдений на станции.

В упомянутой выше временной инструкции [15] по применению цифровых нивелиров рассматривалась программа работ на станции только применительно к выполнению нивелирования I класса. Вместе с тем, учитывая сравнительно небольшие размеры геодинамических полигонов, целесообразно применять и нивелирование II класса, которое цифровыми нивелирами также можно выполнять по одной линии нивелирного хода.

Как известно, основное влияние на величину ошибки измерения превышения на нивелирной станции (без учета влияния перемещения штатива и костылей) является длина визирного луча. Вместе с тем, с увеличением длины визирного луча увеличивается и ошибка $m_{взгл}$, а также увеличивается и влияние вертикальной рефракции, а иногда и турбулентность воздуха. Увеличение рефракции и турбулентности воздуха на ТГП имеет место вследствие нагревания внутри площадных дорог, покрытых асфальтом или бетоном, а также нагревания стен этих сооружений. Поэтому для условий ТГП необходимым требованием является уменьшение длины визирного луча.

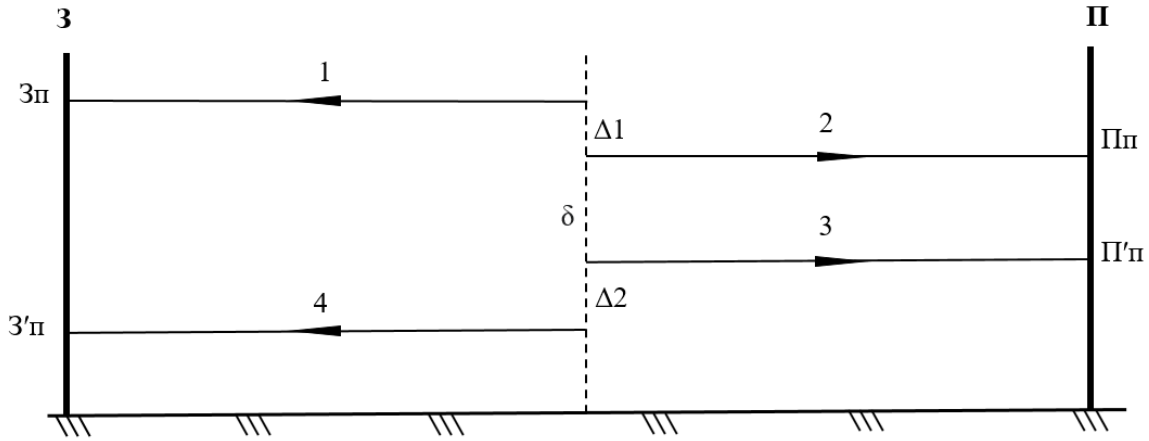
Другой ошибкой высокоточного нивелирования является перемещение (в основном ее оседание) системы «штатив – цифровой нивелир» во время взятия отсчетов по рейке, влияние которой значительно ослабляется симметричной программой наблюдения на нивелирной станции [50, 60, 129].

В общем случае программа работ на станции при выполнении нивелирования I и II классов на ТГП должна заключаться в применении симметричного во времени взятия отсчетов по штрих-кодовым рейкам, т. е. ЗППЗ и ПЗЗП во всех комбинациях.

Рассмотрим динамику перемещения системы «штатив – цифровой нивелир» при выполнении нивелирования по двум линиям хода. При этом предположим, что штатив установлен на твердый грунт, оседание этой системы происходит практически равномерно в течение 2–3 минут после установки штатива на грунт, а наблюдатель производит отсчеты практически с равными промежутками времени. Также окончательный отсчет по штрихкодовой рейке будет являться средним из трех отсчетов. В этом случае повышается точность измерения превышения на станции и в ходе в целом.

Тогда на нечетной станции (рисунок 3.2) отсчет по задней рейке правой линии будет равен $(З_{прав})_{ср}$, а по передней, с учетом оседания штатива на величину Δ_1, $(П_{прав})_{ср} - \Delta_1$. С учетом этого измеренное превышение по правой линии нивелирования будет равно:

а)



б)

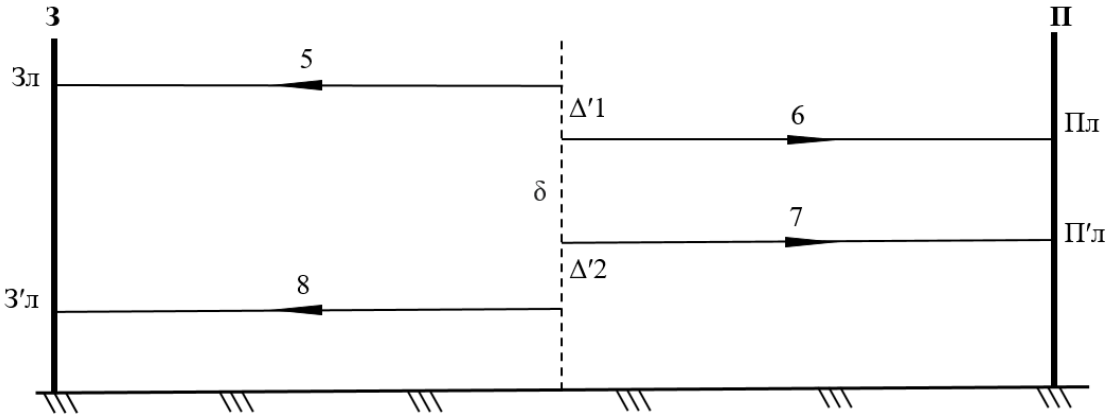


Рисунок 3.2 – Схемы влияния перемещения штатива на отсчеты по штрихкодовым рейкам:

а) нечетная станция (правые костыли);

б) нечетная станция (левые костыли)

$$h_{прав} = (З_{прав})_{ср} - [(П_{прав})_{ср} - \Delta_1] = h_{ист} + \Delta_1, \qquad (3.5)$$

где Δ_1 – ошибка, обусловленная оседанием системы «штатив – нивелир» в промежуток между отсчетами по задней и передней рейкам.

После этого подъемными винтами изменяется горизонт нивелира на величину δ = 3,0-5,0 мм и производится отсчет по передней рейке правой линии, который будет равен $(П'_{прав})_{ср}$, а по задней, с учетом оседания штатива на величину Δ_2, $(З'_{прав})_{ср} - \Delta_2$. Тогда превышение по правой линии нивелирования будет равно

$$h'_{прав} = (З'_{прав})_{ср} - [(П'_{прав})_{ср} + \Delta_2] = h_{ист} - \Delta_2. \quad (3.6)$$

Так как мы приняли, что $\Delta_1=\Delta_2$, и они при вычислении имеют разный знак, то общее среднее превышение по правой линии хода будет свободно от влияния перемещения системы «штатив – цифровой нивелир», т. е. $h_{ист}$.

Таким образом, при выполнении нивелирования по правой линии при двух горизонтах нивелира ошибки, связанные с оседанием штатива, практически компенсируются и получаемое превышение будет свободно от этого влияния.

Аналогичный результат будет и при выполнении нивелирования по левой линии нивелирного хода, т. е.

$$h_{лев} = (З_{лев})_{ср} - [(П_{лев} - \Delta'_1)] = h_{ист} + \Delta'_1, \quad (3.7)$$

и

$$h'_{лев} = [(З'_{лев})_{ср} - \Delta'_2)] - (П'_{лев}) = h_{ист} - \Delta'_2. \quad (3.8)$$

Следовательно, вследствие компенсации величин Δ_1, Δ_2, Δ'_1 и Δ'_2 среднее превышение на станции, полученное из двух линий нивелирного хода и при двух горизонтах нивелира, будет свободно от оседания системы «штатив – цифровой нивелир».

Аналогичный результат будет и при измерении превышения на четной станции.

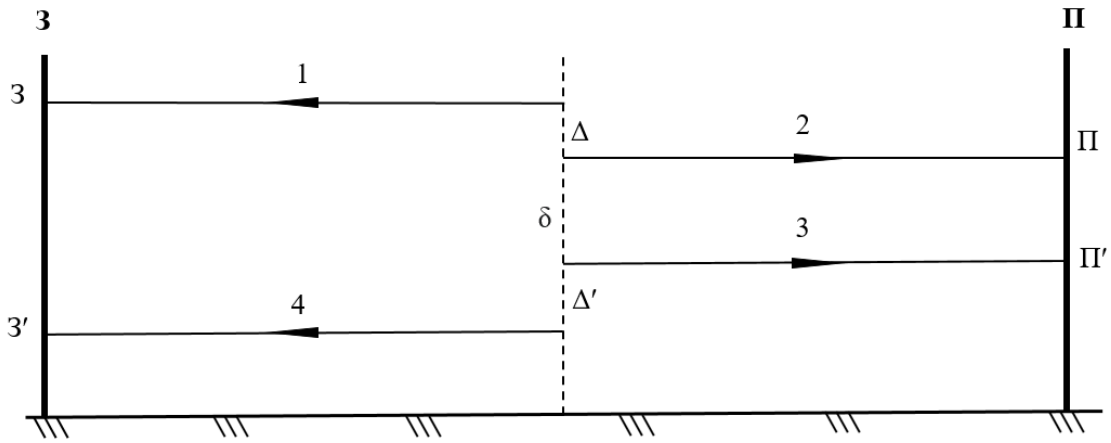
Таким образом, с изменением горизонта нивелира на нивелирной станции I класса получается четыре превышения и тем самым при оценке точности выполненных измерений по формулам (3.1) можно подсчитать все шесть разностей d_i.

Если размеры площадных техногенных геодинамических полигонов значительны (20–30 км^2), то в качестве заполняющей сети часто применяется нивелирование II класса. При стандартной методике выполнения нивелирования с изменением горизонта нивелира будем иметь (рисунок 3.3, *а*)

$$h = З_{ср} - (П_{ср} - \Delta) = h_{ист} + \Delta, \quad (3.9)$$

где $h_{ист}$ – величина истинного превышения между костылями без влияния оседания системы «штатив – цифровой нивелир».

а)



б)

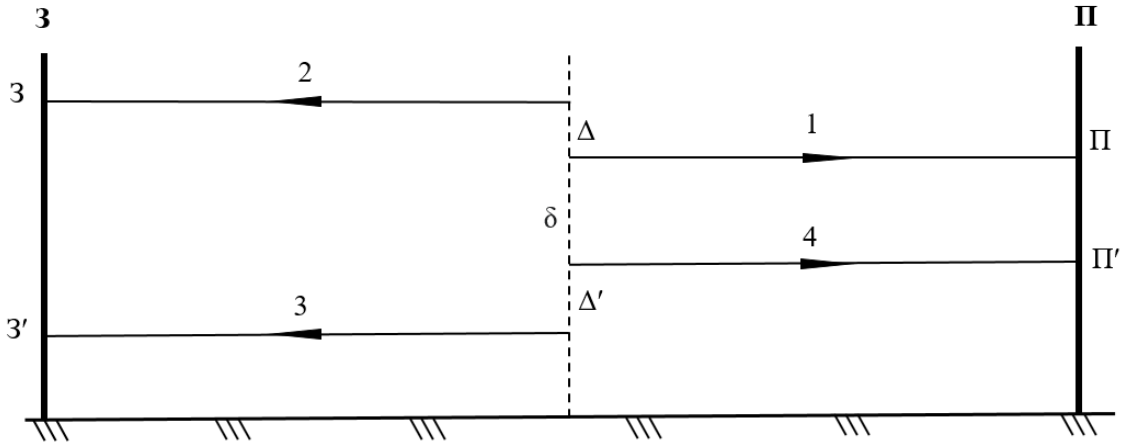


Рисунок 3.3 – Схемы влияния перемещения штатива на отсчеты по рейкам:

а) нечетная станция; *б*) четная станция.

После изменения горизонта инструмента будем иметь

$$h' = (З_{ср}' - Δ') - П_{ср}' = h_{ист} - Δ'. \qquad (3.10)$$

Следовательно, при двух горизонтах инструмента ошибки, связанные с оседанием системы «штатив – цифровой нивелир», значительно компенсируются.

На четной станции также будем иметь (рисунок 3.3, *б*)

$$h = (З_{ср} – Δ) – Пср = h_{ист} – Δ. \quad (3.11)$$

и при втором горизонте

$$h' = З_{ср}' – (П_{ср}' – Δ') = h_{ист} + Δ'. \quad (3.12)$$

Таким образом, и на четной станции также происходит значительная компенсация оседания системы «штатив – цифровой нивелир», а в конечном итоге и во всем нивелирном ходе.

3.4 Совершенствование методики выполнения высокоточного нивелирования I класса на ТГП с применением одной линии нивелирного хода

Учитывая указанные в таблицах 3.1 и 3.2 противоречия и требования нормативного документа выполнения высокоточного нивелирования I класса на промплощадке АЭС [109], рассмотрим основные требования к единой методике и условиям ее выполнения с целью получения необходимой точности измерений на объектах атомной промышленности и техногенных геодинамических полигонах. К таким требованиям относятся:

– ослабление влияния систематических ошибок;

– получение необходимой точности измерения превышения на станции;

– надежный контроль результатов измерений превышения на станции.

1 *Ослабление влияния систематических ошибок*, обусловленных остаточным перемещением системы «штатив – цифровой нивелир», как известно, обеспечивается:

– выбором трассы, по которой будет прокладываться нивелирный ход и устанавливаться штатив с нивелиром, а также костыли;

– выбором симметричной программы наблюдений на станции независимо от числа изменения горизонтов нивелира;

– уменьшением времени, необходимого для измерения превышения на станции;

– уменьшением числа переходов наблюдателя на станции вокруг штатива, так как его вес влияет на величину перемещения системы «штатив – цифровой нивелир».

В условиях промплощадки строительства особо опасного и ответственного инженерного сооружения грунт, как правило, является устойчивым, без наличия болотистых участков. В связи с этим на таких грунтах, согласно исследованиям ЦНИИГАиК [129], следует ожидать величину оседания системы «штатив – цифровой нивелир» в пределах 0,01–0,03 мм.

Результаты многолетних производственных работ различными предприятиями также показывают, что перемещение костылей зависит от плотности грунтов, в которые они забиты. При этом, в очень плотных и упругих грунтах костыли выпираются значительно чаще, чем оседают. С учетом этого нормативным документом [18] была предложена симметричная программа наблюдений на станции с использованием двух линий нивелирования.

Также исследованиями было установлено, что максимальная величина оседания системы «штатив – нивелир» происходит в первые 2,5–3,0 минуты после ее установки на станции (практически линейная величина), а затем это оседание плавно уменьшается. В связи с этим из-за разности во времени при взятии отсчетов по рейкам и разности величины оседания, ошибка на станции для правой линии нивелирования меньше, чем ошибка для левой линии [129].

И, наконец, при выполнении государственного нивелирования I класса его методика, как правило, включает в себя предварительное (за 0,2–0,5 часа до начала наблюдений на нивелирной станции) закрепление трассы костылями. Для этого впереди нивелирной бригады по выбранному маршруту нивелирного хода два рабочих разбивают станции с допустимым неравенством плеч и закрепляют ее костылями (кольями). После этого через определенный промежуток времени подходит нивелирная бригада и выполняет нивелирование на станции при практически стабильном положении костылей.

Таким образом, предварительное закрепление костылей и уменьшение времени на станции, необходимого для взятия отсчетов по рейке, приводит к практически полному исключению (за исключением выполнения нивелирования на неустойчивых грунтах) влияния на результаты нивелирования перемещения системы «штатив – нивелир».

Важным моментом, влияющим на устойчивость системы «штатив – цифровой нивелир», является количество переходов наблюдателя вокруг штатива в процессе взятия отсчета по рейкам, так как вес наблюдателя оказывает влияние на эту систему. Необходимо отметить, что при выполнении нивелирования даже III класса на неустойчивых грунтах один переход наблюдателя вокруг штатива приводит к изменению отсчета по рейке на 1,0–2,0 мм. Так, автором работы [124] с помощью высокоточного цифрового нивелира были выполнены исследования по влиянию перемещения наблюдателя вокруг штатива на величину оседания системы «штатив – цифровой нивелир». Исследованиями было установлено, что влияние веса наблюдателя во время его перемещения в непосредственной близости от штатива приводит к перемещению данной системы даже на умеренно плотном грунте на величину 0,02–0,03 мм. Данная величина является существенной, учитывая точность измерения превышения современными высокоточными цифровыми нивелирами, равную 0,03–0,05 мм.

2 *Для получения необходимой точности измерения* превышения на промплощадке с учетом последующего определения деформационного состояния земной поверхности, инженерного сооружения и применяемого технологического оборудования нивелирование I класса можно выполнять по двум линиям или по одной, но с изменением горизонта нивелира. Как будет показано ниже, нами будет рекомендовано на техногенном геодинамическом полигоне выполнять высокоточное нивелирование I класса по одной линии хода.

3 *Для исключения (значительного ослабления) влияния перемещений* пунктов обоснования (реперов) из общей картины техногенных деформаций необходимо минимизировать их закладку вблизи проводимых строительных работ, связанных

с рытьем котлованов под фундаменты инженерных сооружений различного назначения. При этом необходимо руководствоваться существующим требованием, чтобы пункты располагались на расстоянии от инженерного сооружения не ближе чем 2/3 его высоты.

4 *Контролем результатов измерений* на станции может быть выполнение нивелирования по двум линиям или по одной линии, но с изменением горизонта нивелира с целью получения минимум двух превышений на станции.

5 *Для удобства выполнения нивелирования* с сохранением необходимой точности по реперам техногенного полигона и осадочным маркам инженерного сооружения, с учетом загруженности промплощадки, нивелирование I класса целесообразно выполнять по одной линии нивелирного хода с изменением горизонта нивелира в прямом и обратном направлениях.

Важным моментом при ведении деформационного мониторинга земной поверхности в местах расположения ответственных инженерных сооружений, а также деформаций этих сооружений является обеспечение необходимой точности выполнения измерений. Поэтому для техногенных геодинамических полигонов, предназначенных для наблюдений за деформационным состоянием земной поверхности на промплощадках ответственных и особо опасных инженерных сооружений (например, АЭС, ГЭС, предприятия по переработке и захоронению радиоактивных отходов), нами предлагается установить для выполнения нивелирования I и II классов цифровыми нивелирами следующие технические параметры (таблица 3.8). Применительно к выполнению нивелирования I класса в таблице даны технические параметры для нивелирования по одной или двум линиям хода.

Таблица 3.8 – Предлагаемые основные параметры нивелирования I и II классов, выполняемых цифровыми нивелирами на техногенных геодинамических полигонах

Параметр нивелирования	Нивелирование I класса	Нивелирование II класса
Максимальная длина визирного луча, м – при одной линии хода – при двух линиях хода*	 до 35 до 45	 до 50 -
Программы наблюдений	ЗППЗ-ПЗЗП	ЗППЗ-ПЗЗП
Минимальная высота визирования – для плеч менее 30 м	0,7 0,5	0,5 0,3
Максимальное расхождение средних превышений на станции, мм: – при двух горизонтах при одной линии хода; – из двух линий хода*	 0,20 0,30	 0,30 -
Максимальное расхождение превышений на станции между парой костылей из двух линий, мм	0,30	-
Максимальное расхождение превышений на станции между одноименными сферическими головками из двух горизонтов, мм	0,30	-
Допустимое неравенство плеч на станции	1,0	2,0
Накопление неравенств в ходе	2,0	2,0
Направление нивелирного хода	Прямо и обратно при двух горизонтах	Прямо и обратно при двух горизонтах
Количество взятий отсчетов по рейкам	Трехкратное с осреднением	Трехкратное с осреднением
Допустимое расхождение между прямым и обратным ходами (невязка), мм	0,20 мм$\sqrt{n}$	0,30 мм$\sqrt{n}$
Примечание. Отсчитывание по задней и передней штрихкодовым рейкам при каждом горизонте производится три раза с последующим их осреднением. * При выполнении нивелирования на неустойчивых грунтах.		

Из таблицы 3.8 следует, что в отличие от существующих требований к нивелированию I и II классов в отношении неравенства плеч на станции и его накоплению в ходе, при выполнении высокоточного нивелирования на промплощадке техногенного полигона предлагается увеличить их значения:

– неравенств плеч на станции до 1,0 и 2,0 м, соответственно, при выполнении нивелирования I и II классов;

– накопление значений неравенств до 2,0 м при выполнении нивелирования I и II классов:

Такое увеличение обусловлено следующими причинами.

1 Программное обеспечение цифрового нивелира позволяет уверенно исправлять ве-личину угла *i* до значений порядка 1,0–2,0″, что, при указанном в таблице неравенстве плеч на станции для нивелирования I и II классов, приведет к искажению измеряемого превышения всего, соответственно, на 0,005 и 0,015 мм.

2 Так как при прокладывании нивелирного хода неравенство плеч на станциях меняет знак, то влияние данных значений ошибок будет носить случайный характер и иметь разный знак и, следовательно, они компенсируются в ходе. Остаточное накопление неравенств плеч в ходе внесет ошибку в измеряемое превышение на 0,01 и 0,015 мм, соответственно, для I и II классов, что является исчезающе малой величиной.

3 Так как промплощадка ТГП всегда практически горизонтальна, то влияние вертикальной рефракции будет практически одинаковым при взятии отсчета по задней и передней рейкам, что в итоге также будет практически полной компенсацией этого влияния.

4 В общем случае планирование цикла наблюдений на ТГП и времени выполнения собственно нивелирования не ограничивается строгим интервалом времени. Это позволяет выбрать время наблюдений в пасмурную погоду, что значительно уменьшит даже незначительное влияние вертикальной рефракции, а также повысит точность измеряемых превышений.

Нивелирование II класса рекомендуется выполнять в одном направлении при двух горизонтах нивелира. При этом целесообразно, как и при выполнении нивелирования I класса, заранее забивать костыли в грунт.

Таким образом, организационные требования к выполнению нивелирования I класса на техногенном геодинамическом полигоне по одной линии хода (нивелирования II класса в одном направлении) следующие:

– уменьшение длины визирного луча до 30–35 м для нивелирования I класса и 35–40 м для II класса (см. таблицу 3.8);

– выбор направления линии нивелирного хода с таким расчетом, чтобы по ней можно было выполнять нивелирование в каждом цикле (по возможности);

– предварительное закрепление (на 2,0–3,0 см ниже уровня земной поверхности) удлиненных (30–35 см) костылей по линии нивелирного хода;

– с целью быстрого обнаружения на промплощадке забитых костылей при очередном цикле наблюдений – составление схемы их закрепления.

Рассмотрим теперь методику выполнении нивелирования I класса по одной линии нивелирного хода и в одном направлении, при которой на станции можно получить четыре превышения. С целью получения на станции двух превышений без изменения горизонта цифрового нивелира автор [54] предложил при выполнении нивелирования II класса применять костыли, имеющие две сферические головки, расположенные на разной высоте, на которые, при взятии отсчетов, поочередно устанавливаются штрихкодовые рейки. Тем самым на станции измеряется два превышения без изменения горизонта цифрового нивелира.

Если использовать такие костыли с двумя головками совместно с изменением горизонта цифрового нивелира, то на станции можно получить четыре превышения, что будет соответствовать существующему требованию к их количеству при выполнении нивелирования I класса (рисунок 3.4).

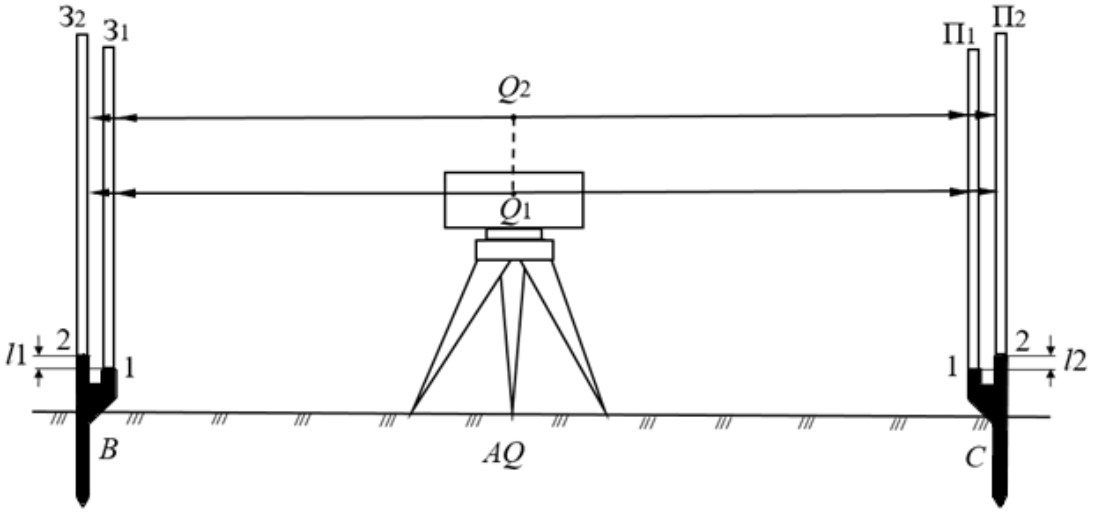


Рисунок 3.4 – Схема нивелирования по костылям с двумя сферическими головками

Рассмотрим также и динамику перемещения на станции системы «штатив – цифровой нивелир» в зависимости от порядка взятия отсчетов по рейкам. При этом будем применять симметричную программу наблюдений на станции при двух горизонтах нивелира: ЗППЗ нечетная станция и ПЗЗП четная.

Последовательность взятия отсчетов на станции следующая:

– $(З_1 – П_1) = h_1$ в положении $О_1$ нивелира и установленных рейках на головки 1 заднего и переднего костылей;

– перестановка реек на головки 2 заднего и переднего костылей;

– $(П_2 – З_2) = h_2$ в положении $О_1$ нивелира и установленных рейках на головки 2 заднего и переднего костылей.

В результате этого на станции будет измерено два превышения h_1 и h_2.

После этого производится изменение горизонта нивелира, например, в положение $О_2$ с последующим измерением превышения. При этом рейки остаются на головке 2 заднего и переднего костылей.

Тогда будем иметь:

– $(З_2 – П_2) = h'_2$ в положении $О_2$ нивелира и установленных рейках на головки 2 заднего и переднего костылей;

– перестановка реек на головки 1 заднего и переднего костылей;

– $(П_1 – З_1) = h'_1$ в положении $О_2$ нивелира и установленных рейках на головки 1 костылей.

В результате этого также будет измерено еще два превышения h'_1 и h'_2.

После этого находится разность превышений между одноименными головками

$$h_1 – h'_1 = \Delta h_1$$
$$h_2 – h'_2 = \Delta h_2 \qquad (3.13)$$

и сравнивается с указанным выше (см. таблицу 2.8) допуском

$$\Delta h_1 – \Delta h_2 \leq 0{,}30 \text{ мм}.$$

Завершающим этапом является вычисление превышения между реперами отдельно по головкам 1 и 2 костылей с подсчетом невязки по формуле

$$f = 0{,}20 \text{ мм } \sqrt{n}. \tag{3.14}$$

Рассмотрим влияние перемещения (оседания) системы «штатив – нивелир» на измеряемое превышение на станции. Тогда для положения реек на головках 1 костылей будем иметь с учетом перемещения на величины Δ_1 и Δ_2 (в обозначениях рисунка 2.11) системы «штатив-цифровой нивелир» между взятиями отсчетов по рейкам

$$h_1 = З_1 – (П_1 – \Delta_1) = h_{ист} + \Delta_1, \tag{3.15}$$
$$h_2 = З'_1 – (П'_1 + \Delta_2) = h_{ист} - \Delta_2,$$

а для положения реек на головке 2 костылей

$$h_1 = З_2 – (П_2 – \Delta_1) = h_{ист} + \Delta_1, \tag{3.16}$$

$$h'_2 = З'_2 – (П'_2 + \Delta'_2) = h_{ист} – \Delta'_2. \tag{3.17}$$

Так как перемещения $\Delta_1 = \Delta_2$ и $\Delta'_1 = \Delta'_2$, то полученные средние превышения при положениях $О_1$ и $О_2$ будут практически свободны от перемещения системы «штатив – нивелир». Тогда и среднее превышение из двух положений реек также будет практически свободно от перемещения системы «штатив – нивелир».

На четной станции взятие отсчетов начинается с передней рейки, но характер влияния ошибок за перемещение системы «штатив – нивелир» аналогичный.

Напомним, что в вышеприведенных формулах отсчеты по рейкам состоят из среднего из трех отсчетов.

Обобщенная последовательность взятия отсчетов по рейкам при их установке на две головки костыля приведена в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Предлагаемый порядок взятия отсчетов цифровыми нивелирами при одной линии нивелирования I класса (костыли с двумя головками)

Последовательность взятия отсчетов	Нечетная станция хода	Четная станция хода
1 Положение O_1 нивелира	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 1 костыля	Отсчет по передней рейке при ее установке на головку 1 костыля
2 Положение O_1 нивелира	Отсчет по передней рейке при ее установке на головку 1 костыля	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 1 костыля
3 Положение O_1 нивелира	Отсчет по передней рейке при ее установке на головку 2 костыля	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 2 костыля
4 Положение O_1 нивелира	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 2 костыля	Отсчет по передней рейке при ее установке на головку 2 костыля
5	***Изменение высоты горизонта нивелира в положение O_2***	***Изменение высоты горизонта нивелира в положение O_2***
6 Положение O_2 нивелира	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 1 костыля	Отсчет по передней рейке при ее установке на головку 1 костыля
7 Положение O_2 нивелира	Отсчет по передней рейке при ее установке на головку 1 костыля	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 1 костыля
8 Положение O_2 нивелира	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 2 костыля	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 2 костыля
9 Положение O_2 нивелира	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 2 костыля	Отсчет по задней рейке при ее установке на головку 2 костыля

Одним из контролей измерения превышения на станции при выполнении нивелирования по двум линиям хода является сравнение превышения между задним правым костылем над задним левым по результатам нивелирования на данной станции и предыдущей (когда эти костыли были передними). При выполнении нивелирования нивелирами с визуальным отсчитыванием эта разность для II класса не должна превышать 0,70 мм.

При использовании костылей с двумя сферическими головками контроль должен заключаться в сравнении отсчетов по рейке при установке ее на нижнюю и верхнюю головки для каждого костыля, и эта разность, отметим еще раз, должна быть постоянной, так как расстояние между головками не меняется.

Таким образом, на станции получается измеренным четыре превышения и среднее из них не содержит систематических ошибок за перемещение на станции системы «штатив – цифровой нивелир». Тем самым отпадает необходимость вы-

полнять высокоточное нивелирование по двум линиям хода. Кроме того, целесообразно за несколько часов до выполнения нивелирования по линии хода предварительно разметить и забить костыли (как это часто делается при выполнении государственного нивелирования I класса), что позволит практически полностью ослабить их перемещение на результаты нивелирования на станции.

Также учитывая тот факт, что на ТГП АЭС длины отдельных нивелирных ходов между смежными реперами, как уже указывалось выше, не превышают 0,5–1,0 км, то время на выполнение измерений не будет превышать 1,0–1,5 часа. За это время костыли практически не изменят значительно своего положения вследствие внешних механических воздействий, таких как движение транспорта и различных строительных работ. В этом случае можно использовать забитые костыли для выполнения нивелирования как в прямом, так и в обратном ходе. Это позволит производить контроль выполнения нивелирования путем сравнения превышений на нивелирных станциях из прямого и обратного ходов пусть даже с точностью 0,20–0,30 мм. Однако, в этом случае необходимо обеспечить стабильность их положения. Для этого целесообразно увеличить длину костылей до 35–40 см. Кроме того, при прокладывании нивелирного хода в обратном направлении точность измеренных превышений на нивелирной станции и в нивелирном ходе в целом будет выше, так как наступит практически полная стабилизация положения костылей и будет отсутствовать влияние рассмотренной выше систематических ошибок Δ_1, Δ_2, Δ'_1, и Δ'_2.

При использовании костылей с двумя сферическими головками компенсация оседания системы «штатив–цифровой нивелир» также происходит как на станции, так и в нивелирном ходе в целом.

Необходимо отметить, что с применением данной методики нивелирования можно использовать программное обеспечение цифрового нивелира, приняв положение двух головок костылей как правую и левую линии нивелирования.

В таблице 3.10 приведены существующие и предлагаемые параметры высокоточного геометрического нивелирования I класса для выполнения работ на ТГП.

Таблица 3.10 – Предлагаемые технологические решения для совершенствования методики выполнения геометрического нивелирования I класса

Существующие параметры	Предлагаемые параметры
Две линии нивелирования при двух горизонтах в прямом и обратном направлении (число измеренных превышений на станции – четыре)	Одна линия нивелирования при двух горизонтах в прямом и обратном направлении по двойным сферическим костылям (число измеренных превышений на станции – четыре)
Максимальная длина визирного луча 30-35 м	Максимальная длина визирного луча 40-45 м
Максимальное расхождение превышений на станции из двух горизонтов при одной линии хода 0,20 мм	Максимальное расхождение превышений на станции из двух горизонтов при одной линии хода 0,20 мм, а при двух линиях при одном горизонте 0,30 мм
Примечание. Допустимое расхождение между прямым и обратным ходами 0,20 мм$\sqrt{n}$.	

Апробация усовершенствованной методики была реализована на площадке СГУГиТ в виде замкнутого нивелирного хода, состоящего из двух секций. Нивелирование выполнялось в пасмурную погоду, ход прокладывался в прямом и обратном направлениях. Полученные результаты апробации, приведенные в таблице 3.11, позволяют говорить о возможности применения усовершенствованной методики высокоточного геометрического нивелирования I класса для создания ТГП на промышленных площадках строящихся и действующих объектов атомной энергетики на стадии их строительства и эксплуатации. При выполнении нивелирования длина визирного луча не превосходила 30,0 м. Нивелир устанавливался на твердый грунт или бетонное основание. Изменение горизонта нивелира была в пределах 3,0–4,0 мм. В результате выполненных измерений СКО измерения превышения на станции оказалась равной 0,05–0,07 мм.

Таблица 3.11 – Результаты измерений усовершенствованной методикой высокоточного геометрического нивелировании I класса

№ секции	Стандартная		Усовершенствованная		Разности превышений, м
	Суммарное *h*, в прямом ходе, м	Суммарное *h*, в обратном ходе, м	Суммарное *h*, в прямом ходе, м	Суммарное *h*, в обратном ходе, м	
1	– 0,00958	0,00954	– 0,00957	0,00953	0,00001
	h ср. = – 0,00956		*h* ср. = – 0,00955		
2	– 0,00321	0,00323	– 0,00319	0,00321	0,00002
	h ср. = – 0,00322		*h* ср. = – 0,00320		

3.5 Общий подход к составлению методик и программ наблюдений для определения деформационного состояния особо опасных инженерных сооружений АЭС

Согласно требованиям нормативных документов [102, 109], деформационное состояние особо опасных инженерных сооружений АЭС должно производиться и в горизонтальной плоскости. К ним относятся (см. таблицу 2.1) несущие конструкции хранилищ свежего и отработанного радиоактивного топлива, узлы переработки отходов и хранилища радиоактивных отходов. При этом они относятся к 1 категории ответственности за ядерную и радиационную безопасность, а также сейсмостойкость.

Особенностью эксплуатации указанных сооружений является наличие внутри их и снаружи определенного уровня техногенного радионуклидного загрязнения, а также ионизирующего излучения [112, 70, 74, 80]. В связи с этим данное обстоятельство накладывает особые требования к проектированию и выполнению инженерно-геодезических измерений [46, 105, 109].

Так, на стадии составления ППГР необходимо учитывать следующие факторы:

– схему размещения технологического оборудования, предназначенного для работы с ядерным топливом и его последующим хранением;

– определение мест внутри сооружения, где возможен повышенный уровень радионуклидного загрязнения;

– с учетом этого разработать схему размещения деформационных марок, а также мест установки геодезического прибора с таким расчетом, чтобы обеспечивалось выполнение измерений за минимально возможный временной интервал;

– если будет производиться деформационный мониторинг инженерного сооружения, то деформационные марки лучше устанавливать на внешней стороне его стен;

– при установке осадочных марок на внутри сооружения или на внешней стороне стены следует учитывать возможность выполнения измерений (лазерным сканером, роботизированным тахеометром или тахеометром в безотражательном режиме) с некоторым удалением (20–50 м) от технологического оборудования или от инженерного сооружения в целом.

При выполнении инженерно-геодезических измерений необходимо учитывать следующие факторы:

– получения допуска на выполнение измерений внутри сооружения или по внешнему периметру;

– соблюдение мер по защите от ионизирующего излучения;

– по возможности – применение методики выполнения измерений с использованием лазерных сканеров, роботизированных тахеометров или тахеометров, работающих в безотражательном режиме;

– после выполнения первого цикла измерений надо намечать места удобной (для обеспечения хорошей видимости на осадочные марки) установки прибора, что позволит при последующих циклах значительно уменьшить время на выполнение работ.

Как известно, важным фактором, влияющим на технологическую схему производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, является выбор мест установки деформационных марок на наблюдаемом инженерном сооружении. Эти марки могут быть установлены внутри инженерного сооружения (колоннах, стенах) или на его внешней стороне (стенах). Оба эти варианта имеют достоинства и недостатки.

Достоинством размещения осадочных марок внутри инженерного сооружения является возможность выполнения измерений в любое время года, а также получение более высокой точности измерений (при отсутствии значительного влияния возмущающих воздействий от работающего технологического оборудования).

Недостатком такого размещения является загроможденность (порой значительная) технологическим оборудованием внутреннего пространства сооружения

(цеха), что часто препятствует свободному допуску к осадочным маркам для выполнения измерений с одной установки прибора, обычно нивелира. В таких случаях приходиться делать дополнительные станции и переходные точки.

Достоинством размещения осадочных марок на внешней стороне инженерного сооружения является свободный доступ к ним и возможность выполнения измерений практически без дополнительных станций и переходных точек.

Недостатком является трудность в выполнении измерений в зимнее время, а также и при плохих погодных условиях, что приводит к некоторому понижению точности получаемых результатов. В целом ряде случаев, при низких температурах, выполнить измерения не представляется возможным.

Применительно к определению деформаций особо опасных инженерных сооружений размещение деформационных марок на внешней стороне является более удобным с точки зрения радиационной безопасности. Это относится в первую очередь к зданию хранения и переработки отработанного ядерного топлива. В связи с тем, что вне данного здания на расстоянии до 20–25 м от него практически нет других строений и коммуникаций, имеется возможность, во-первых, выполнять инженерно-геодезические измерения без дополнительных построений (сгущений) сети и, во-вторых, с целью значительного уменьшения влияния возможного излучения от отработанного ядерного топлива, производить установку прибора на значительном расстоянии.

В соответствии с требованиями нормативного документа [109] рассмотрим методику определения деформационного состояния указанного сооружения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При ее реализации могут применяться высокоточные тахеометры, лазерные сканеры и трекеры, нивелиры [46, 66, 72].

3.6 Методика определения деформационного состояния особо опасного инженерного сооружения в горизонтальной плоскости

Рассмотрим методику определения деформационного состояния особо опасного инженерного сооружения, к которому относятся здания хранения и переработки отработанного ядерного топлива, и которое, согласно таблице 2.1, относится к 1-й категории ответственности за ядерную и радиационную безопасность и сейсмостойкость.

Периодичность наблюдений за горизонтальными смещениями в строительный и эксплуатационный периоды, согласно требованиям нормативного документа [109] (таблица Г.2), приведена в таблице 3.12.

Определение деформационного состояния такого особо опасного инженерного сооружения может производиться с использованием созданной планово-высотной основы промплощадки, а также путем создания локальной сети. С целью более удобного выполнения инженерно-геодезических измерений целесообразно производить эти работы с использованием локальной сети.

Таблица 3.12 – Периодичность наблюдений за горизонтальными смещениями в строительный и эксплуатационный периоды для зданий и сооружений объектов атомной промышленности

Этап наблюдений	Уровень ответственности сооружения или здания за радиационную и ядерную безопасность согласно федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии		
	I	II	III
После возведения фундамента	Один цикл		
При достижении 25, 50, 75 и 100-процентной нагрузки на фундамент	4 цикла наблюдений		
Во время опробования производственного цикла сооружения	Один и более циклов (в зависимости от особенностей и длительности процесса)		
Приемка сооружения в эксплуатацию	Один цикл		
В первый год эксплуатации	4 раза в год	4 раза в год	1 раз в год
До стабилизации осадок	3 раза в год	2 раза в год	1 раз в год
После стабилизации осадок	1 раз в год	1 раз в 2 года	1 раз в 5 лет
Фундаменты турбогенераторов: – после бетонирования нижней плиты; – до монтажа, по нижней плите – перед пуском, по колоннам и верхней плите;	1 цикл не менее 1 цикла не менее 1 цикла		
– после стабилизации верхней плиты, по колоннам и верхней плите;	не менее 1 цикла		
– в процессе эксплуатации	по специальной программе в зависимости от величин деформаций		
Защитная оболочка (крен), эксплуатация	1 раз в 5 лет или по утвержденному эксплуатирующей организацией графику		

Предельные значения параметров деформаций строительных конструкций зданий и сооружений на промплощадке атомной отрасли согласно требованиям нормативного документа [109] (таблица В.2) приведены в таблице 3.13. Здесь под относительной величиной горизонтального смещения инженерного сооружения понимается его крен, который может быть определен различными способами [13, 21, 100, 108, 132].

Таблица 3.13 – Предельные значения параметров деформаций строительных конструкций зданий и сооружений

Сооружения, их конструктивные особенности	Деформация	
	параметр	значение
1 Многоэтажное здание, стены и перегородки любого крепления (при *h* – расстоянии от верха фундамента до оси ригеля покрытия)	относительная величина горизонтального смещения	*h*/500
2 Один этаж многоэтажного здания при жестком креплении к каркасу стен и перегородок из кирпича, гипсобетона, железобетонных панелей	относительная величина горизонтального смещения	*h*/500
3 Одноэтажные здания с самонесущими стенами при высоте этажа *h*, м:	относительная величина горизонтального смещения	
– до 6 м включ.;		*h*/150
– 15 м;		*h*/200
– от 30 м;		*h*/300

Рассмотрим схему создания такой сети. Предлагаемая схема создания высокоточного планово-высотного обоснования вокруг рассматриваемого сооружения приведена на рисунке 3.5. Она может быть реализована для решения следующих двух задач:

– вхождения в состав деформационной сети геодинамического полигона;

– определения деформационного состояния особо опасного инженерного сооружения.

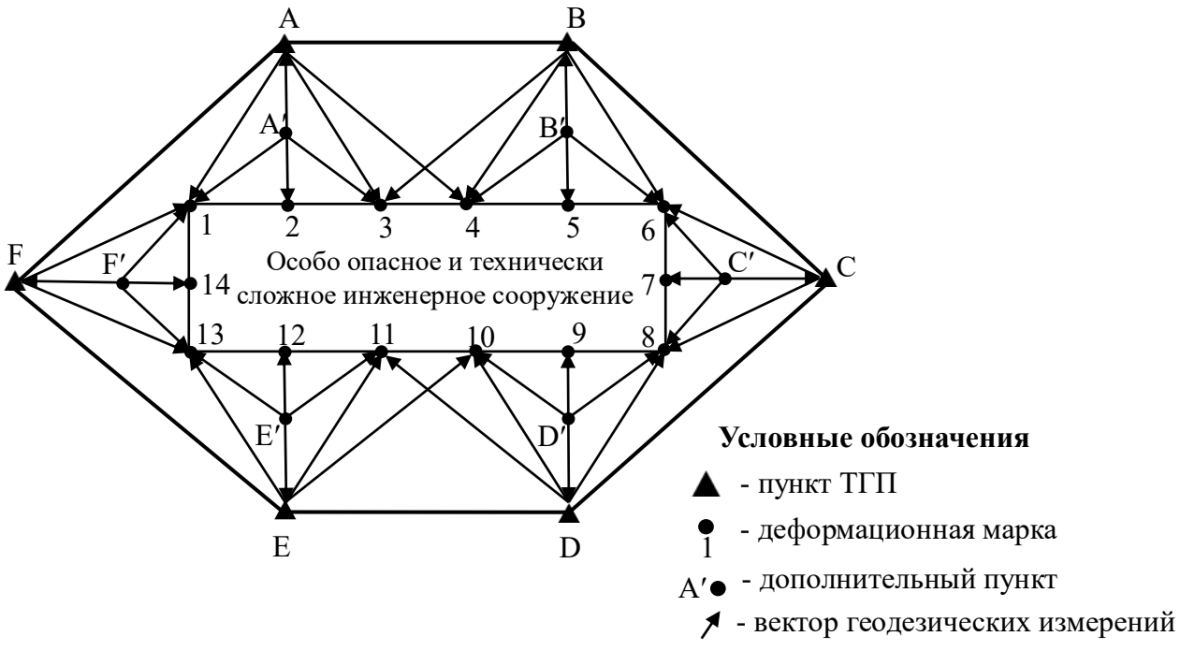


Рисунок 3.5 – Схема определения деформационного состояния особо опасного инженерного сооружения

Непосредственно такая сеть может быть реализована в двух вариантах:

– пункты A, B, C,…, M могут представлять собой стационарные знаки (тумбы), обеспечивающие принудительное центрирование тахеометра и отражателя;

– пункты A′, B′, C′,…, M′ могут представлять собой бетонные знаки, заложенные на уровне земли, центрирование тахеометра над которыми выполняется лазерным центриром (при прокладывании по ним полигонометрического хода).

Как уже указывалось выше, расстояние от этих пунктов до инженерного сооружения целесообразно устанавливать в пределах 20–25 м. В этом случае будет обеспечена необходимая точность выполнения измерений, а также безопасность исполнителя.

Также с целью обеспечения безопасности реечника (или обеспечения его отсутствия вообще возле марок с отражателем) на внешней стороне стен данного сооружения на стадии его строительства необходимо закрепить светоотражающие марки [4, 39, 57]. Такие марки закрепляются на двух уровнях:

– на высоте 0,4-0,6 м относительно уровня земли;

– на уровне верха стены (ригеля перекрытия).

С целью обеспечения их сохранности от влияния внешних факторов эти марки необходимо установить с некоторым заглублением в стену на 2–3 мм.

Назначение применения данной схемы закрепления марок при определении деформационного состояния указанного инженерного сооружения заключается в минимальном или полном отсутствии реечника возле его стен (марок). При использовании данной схемы установку светоотражающих марок по периметру здания целесообразно производить с шагом расположения колонн данного сооружения.

После установок пунктов A, B, C,…, M обоснования производится определение их координат. С целью обеспечения точности измерений плановые координаты указанных пунктов целесообразно определять в условной системе координат путем прокладывания высокоточного полигонометрического хода с короткими (до 25–30 м) лучами с применением высокоточных тахеометров (m_β = 1,0–1,5" и m_s = 1,0–1,5 мм), позволяющих получить СКО определения координат пунктов не хуже 1,5–2,0 мм. После этого пункты сети привязываются к общей сети геодинамического полигона.

Если в качестве закрепления обоснования применяются стационарные пункты (тумбы), обеспечивающие принудительное центрирование тахеометра и отражателя, то с использованием высокоточных тахеометров получить указанную точность определения координат пунктов не представляется сложным.

При использовании пунктов, заложенных на уровне земли, с целью уменьшения ошибки за центрирование необходимо, во-первых, перед измерениями тщательно выполнить поверку, а при необходимости и юстировку лазерного центрира, и, во-вторых, измерения выполнять с низких штативов. В этом случае можно получить СКО определения координат не хуже 2,0–2,5 мм. При прокладывании полигонометрического хода измерения необходимо выполнять при благоприятных внешних условиях и на каждом пункте делать не менее трех приемов.

При проектировании и прокладывании полигонометрического хода необходимо особое внимание уделить выбору начального направления, например, направления *AB*. Это направление должно удовлетворять следующим требованиям:

– быть надежно закрепленным двумя исходными пунктами в местах, которые не будут подвержены механическим воздействиям;

– в каждом цикле измерений между ними должна быть обеспечена хорошая видимость;

– с целью исключения боковой рефракции и турбулентности воздуха (в летний период года) визирный луч должен проходить не ближе чем 2,0 м от стен других инженерных сооружений.

Уравнивание полигонометрического хода производится в программе Кредо.

Для определения высотных отметок пунктов их конструкция должна включать в себя марку для установки рейки по примеру пункта, приведенного на рисунке 2.11. Рейка также может устанавливаться и на верх пунктов А, В, С,…, М сети. Однако, в этом случае будут затруднения в установке рейки в вертикальное положение. Высотные отметки пунктов А, В, С,…, М определяются высокоточным нивелированием II класса или геометрическим нивелированием короткими лучами по методике 2-го разряда с СКО определения превышения на станции 0,15–0,20 мм. После этого производится привязка нивелирного хода к одному из кустов реперов геодинамического полигона промплощадки.

При такой схеме геодезического построения отметки ДМ определяются с нескольких исходных пунктов ТГП и с дополнительных пунктов геодезического построения. Следовательно, контроль точности их определения предлагается осуществлять в результате использования следующего уравнения

$$H_i^{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^{n} H_j}{n}, \quad \Delta_H = H_j - H_i^{\text{ср}} \le m_{\text{норм}}, \tag{3.18}$$

где i – номер ДМ, j – порядковый номер исходного пункта, n – число исходных пунктов, с которых выполнялись наблюдения на ДМ, $m_{\text{норм}}$ – нормативная точность определения отметок ДМ, установленная действующим руководством.

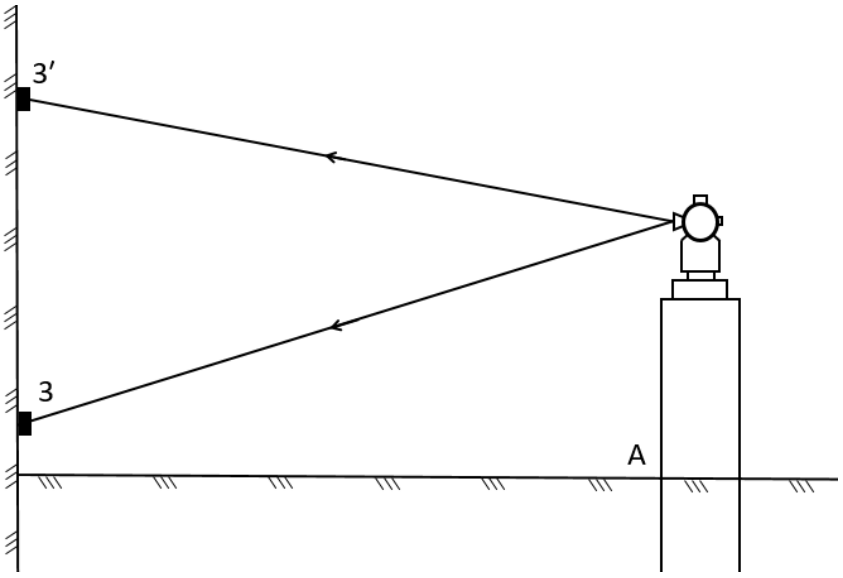


Рисунок 3.6 – Схема определения крена особо опасного инженерного сооружения координатным способом

Методика выполнения измерений следующая. После принудительного (или с помощью лазерного центрира) центрирования на пункте обоснования, например, пункте *A* производится ориентирование на пункт *B* с последующим определением двумя приемами координат светоотражающих пленок *3* и *3′*. Затем аналогичным образом с данного пункта производится определение координат других видимых марок. Измерения выполняются одним приемом. По окончании измерений на данном пункте тахеометр центрируется на другом и измерения выполняются аналогичным образом.

Если расстояние до марок не будет превышать 25,0–30,0 м, то СКО определения их координат из двух приемов не будет превышать 1,5–2,0 мм. С целью исключения влияние турбулентности воздуха, возникающего вблизи стен инженерного сооружения, на результаты измерений их необходимо выполнять в пасмурную погоду.

Если марки на сооружении с пункта *A* не будут видны, то измерения выполняются с промежуточного пункта *A′*.

Аналогичным образом измерения выполняются и с других пунктов.

3.7 Методика определения деформационного состояния особо опасного инженерного сооружения АЭС в вертикальной плоскости

Деформационное состояние территории геодинамического полигона и расположенных на нем инженерных сооружений включает в себя:

– определение собственно деформационного состояния земной поверхности на промплощадке;

– определение деформационного состояния ответственных и особо опасных инженерных сооружений, расположенных на данной территории.

При этом выполнение высокоточного нивелирования для решения указанных задач может производиться с различной цикличностью и последовательностью:

– высокоточное нивелирование пунктов (реперов) геодинамического полигона совместно с осадочными марками инженерных сооружений;

– высокоточное нивелирование только пунктов (реперов) геодинамического полигона;

– высокоточное нивелирование только осадочных марок инженерных сооружений.

Схема выполнения высокоточного нивелирования пунктов (реперов) геодинамического полигона приведена на рисунке 3.1. При выполнении такого нивелирования особых требований к обеспечению радиационной безопасности исполнителей не нужно.

Вместе с тем, и при определении деформационного состояния особо опасных инженерных сооружений в данном случае так же, как и при определении крена, при выполнении инженерно-геодезических измерений требуется обеспечение радиационной безопасности исполнителей, т. е. эти измерения должны, по возможности, производиться с определенного расстояния.

В настоящее время в геодезическом производстве при установке строительных конструкций по высоте на промплощадке, исполнительных съемок и определении деформационного состояния инженерных сооружений и применяемого на них тех-

нологического оборудования всё активнее используется тригонометрическое нивелирование короткими лучами с применением высокоточных тахеометров, которые обеспечивают:

– измерение углов наклона с СКО $m_\alpha \leq 1{,}0–2{,}0"$;

– расстояний до 250–300 м при наведении на призменный отражателей или в безотражательном режиме с ошибкой $m_S \leq 1{,}0\text{-}1{,}5$ и $m_S \leq 3{,}0$ мм, соответственно.

Так, авторами работы [85] предлагается методика выполнения инженерно-геодезического нивелирования 1, 2, 3, 4 и 5-го разрядов с величинами СКО измерения превышения на станции, равными соответственно m_{hcm} = 0,15 мм, m_{hcm} = 0,25 мм, m_{hcm} = 0,50 мм, m_{hcm} = 1,00 мм и m_{hcm} = 2,00 мм. Данные разряды нивелирования предназначены для строительства инженерных сооружений, определения их осадок и деформаций, а также для обеспечения монтажа и эксплуатации применяемого на них технологического оборудования. Необходимо отметить, что к настоящему времени разработкой и исследованием методик по применению тахеометров для выполнения инженерно-геодезического нивелирования на промплощадке занимаются многие авторы [5, 6, 51, 64–66, 81, 83, 85, 95, 119] и такие методики находят все более широкое применение в геодезическом производстве. Применение тригонометрического нивелирования короткими лучами значительно ослабляет один из недостатков геометрического нивелирования, заключающийся в обеспечении видимости на рейку с соблюдением допустимой высоты визирования над препятствием (земная поверхность, трубы коммуникаций, строительные конструкции). В связи с этим в условиях промплощадки или пересеченной местности приходится затрачивать значительное количество времени на выбор нивелирной станции, при котором должны соблюдаться следующие условия:

– устойчивость системы «штатив – нивелир»,

– допустимая длина визирного луча и допустимое неравенство плеч на станции;

– обеспечение видимости на рейку с соблюдением допустимой минимальной высоты визирования над препятствием.

Как известно, при выполнении тригонометрического нивелирования может применяться визирование на миниотражатель или на светоотражающую пленку.

В первом случае отражатель должен устанавливаться на деформационную марку, заложенную в строительную конструкцию, что потребует нахождения реечника непосредственно возле опасного инженерного сооружения.

Во втором случае визирование производится на светоотражающую пленку, закрепленную на стене (строительной конструкции) инженерного сооружения. В связи с этим наблюдатель может находиться на сравнительно значительном расстоянии от опасного инженерного сооружения. Однако, увеличение расстояния приводит к увеличению ошибки измерения превышения на станции. Также при выполнении измерений может быть разный угол наклона линии визирования. Если принять, что угол наклона на светоотражающую пленку не будет превышать 10^{o}, то согласно таблице 1.9 тригонометрическим нивелированием можно обеспечить нивелирование II, III и IV классов точности (см. таблицу 2.2). Тогда, согласно таблице 1.10, при расстоянии до светоотражающей пленки не более 50,0 м, СКО измерения расстояния и угла наклона не более, соответственно, 2,0–3,0 мм и 1,0–2,0", СКО измерения превышения на станции не будет превосходить 0,25–0,50 мм.

С учетом этого рассмотрим основные требования технологического характера, которые необходимо учитывать при выполнении тригонометрического нивелировании 2, 3 и 4-го разрядов. К ним относятся [59, 64–66, 82, 85]:

– точность применяемых тахеометров и конструкции визирных целей;

– программа выполнения измерений на станции;

– допустимая минимальная высота визирования;

– благоприятное время для выполнения измерений;

– допустимая величина неравенства плеч на станции, а также допустимая величина ее накопления в ходе;

– длина визирного луча при выполнении нивелирования данного разряда (класса);

– обоснование системы контролей и допусков на станции;

– схема проложения нивелирных ходов.

Таким образом, обеспечение необходимой СКО измерения превышения на станции достигается применением тахеометров соответствующей точности, симметричной во времени программы наблюдений, а также условиями выполнения измерений.

Непосредственно определение осадок и деформаций сооружения производится тригонометрическим нивелированием короткими лучами. Измерения выполняются тригонометрическим нивелированием короткими лучами по программе 2-го разряда (см. таблицу 1.10) с использованием одной из двух схем.

При реализации первой схемы высокоточный тахеометр устанавливается на пункт нивелирной сети, например, *A* (см. рисунок 3.5) и двумя приемами поочередно определяются превышения между марками 1, 2, 3, 4 и 5. После этого тахеометр устанавливается на пункт *B* и определяются превышения между пунктами 5, 6, 7 и 8. Затем аналогичным образом измеряются превышения и с других пунктов. Тем самым по маркам (миниотражателям) прокладывается замкнутый нивелирный ход. Привязка этого хода к пунктам нивелирной сети производится также тригонометрическим нивелированием, например, из пункта *M′* на пункт *M*.

При реализации второй схемы нивелирование выполняется с установкой тахеометра над пунктами A′, B′, C′,…, M′.

С целью получения необходимой точности измерения на каждую марку (миниотражатель) выполняются двумя приемами. Аналогичные измерения выполняются и с других пунктов сети.

Если измерение превышения производится при одном круге (КЛ или КП), то величина СКО полученного превышения на нивелирной станции при нивелировании способом из середины будет равна [82]

$$m_{h_{ст}} = m_{\text{взгл.}}\sqrt{2}, \tag{3.19}$$

где $m_{\text{взгл.}}$ – величина ошибки «взгляда» на одну визирную цель (рейку).

При этом за ошибку $m_{\text{взгл}}$ при тригонометрическом нивелировании примем измерения, выполненные при одном круге на одну визирную цель (рейку или светоотражающую пленку). Тогда, данную ошибку «взгляда» с учетом влияния всех факторов можно вычислить по известной формуле [85]

$$m_{\text{взгл.}} = \sqrt{m_S^2 \sin^2\alpha + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} S^2 \cos^2\alpha + m_{\text{р}}^2 + m_{\text{виз.}}^2 + m_{\text{вн.}}^2 + m_{\text{мо.}}^2 + m_{\text{шт.}}^2}, \quad (3.20)$$

где m_α – величина ошибки измерения угла наклона;

m_S – величина ошибки измерения расстояния;

$m_{\text{р}}$ – величина ошибки, обусловленная влиянием наклона рейки;

$m_{\text{виз.}}$ – величина ошибки визирования;

$m_{\text{мо.}}$ – величина ошибки, обусловленная изменением значения МО в процессе выполнения измерений;

$m_{\text{вн.}}$ – величина ошибки, вызванная влиянием внешних условий;

$m_{\text{шт.}}$ – величина ошибки, обусловленная вертикальным перемещением системы «штатив – тахеометр».

Как известно, при измерении выполнены одним приемом (КЛ и КП) величина СКО измеренного превышения на станции равна

$$m_{h_{ст}} = m_{\text{взгл.}}. \quad (3.21)$$

Если измерение превышения будет производиться двумя приемами, то величина СКО будет равна

$$m_h = \frac{m_{\text{ст}}}{\sqrt{2}}. \quad (3.22)$$

Как уже указывалось выше, СКО измерения угла наклона и расстояния высокоточным тахеометром в безотражательном режиме равны, соответственно, m_α = 1,0 –2,0″, m_S = 2,5–3,0мм. Тогда при расстоянии до визирной цели не более 10–15 м величина СКО не будет превышать 0,15–0,25 мм.

Если в некоторых случаях при выполнении нивелирования на данном сооружении (например, при передаче отметки на куст реперов) визирование будет производиться на рейку [55], то в измеряемом угле наклона α появляется ошибка, вызванная случайным ее отклонением от вертикали на угол ε. При измерении углов наклона ошибка определяется по формуле [82]

$$m_\delta = \frac{l\varepsilon^2}{2\rho^2} + \frac{l\varepsilon}{\rho}\operatorname{ctg} z + \frac{a\varepsilon}{\rho}, \qquad (3.23)$$

где l – высота визирования на рейку;

ε – величина угла наклона рейки;

z – зенитное расстояние (угол наклона визирной оси);

a – расстояние от точки установки рейки до точки (плоскости) отражения луча при измерении расстояния.

При l = 1,2 м, z = 88° (α = 2,0°), ε = 5,0′ и a = 1,0 мм получим m = 0,04 мм.

Для ослабления влияния данной ошибки необходимо:

– тщательно выполнить поверку и юстировку круглого уровня при рейке;

– выполнять измерения при угле наклона визирной оси тахеометра не более 2,0°;

– удерживать рейку в вертикальном положении с помощью подпорок.

Как и при выполнении геометрического нивелирования, наблюдения рекомендуется выполнять при хорошей видимости, отчетливых и спокойных изображениях светоотражающей пленки. В солнечные дни следует исключить измерения в жаркую погоду. Также необходимо учитывать влияние нагретых стен данного особо опасного инженерного сооружения на турбулентность воздуха вблизи светоотражающих пленок. Также, с целью ослабления влияния вертикальной рефракции и турбулентности воздуха, необходимо соблюдать симметричную программу наблюдений на станции.

При выполнении нивелирования при одном горизонте тахеометра наблюдения на станции могут производиться по следующим трем программам:

а) *первая программа:* наблюдение на станции в следующей последовательности: $З_{КЛ}$, $П_{КЛ}$, $П_{КП}$, $З_{КП}$;

б) *вторая программа:* наблюдение на станции в следующей последовательности: $З_{КЛ}$, $П_{КЛ}$, $З_{КП}$, $П_{КП}$;

в) *третья программа:* наблюдение на станции в следующей последовательности: $З_{КЛ}$, $З_{КП}$, $П_{КЛ}$, $П_{КП}$.

Первая программа симметрична относительно КЛ и КП, а также и времени взятия отсчетов по рейке и светоотражающей пленке (миниотражателя). Таким образом, если измерение превышения на станции выполняется одним приемом, то оно практически не будет отягощено величиной оседания системы «штатив – тахеометр» при её равномерном опускании. При выполнении измерений одним горизонтом тахеометра требуется два перехода наблюдателя вокруг штатива, а при двух горизонтах – четыре.

Вторая программа симметрична относительно КЛ и КП, но не симметрична по времени взятия отсчетов по рейке и светоотражающей пленке. Таким образом, если измерение превышения на станции выполняется одним приемом, то оно будет отягощено величиной оседания системы «штатив – тахеометр» даже при её равномерном опускании. При выполнении измерений одним горизонтом тахеометра требуется три перехода наблюдателя вокруг штатива, а при двух горизонтах – шесть.

Третья программа не симметрична относительно КЛ и КП и не симметрична по времени взятия отсчетов по рейке и светоотражающей пленке. Таким образом, если измерение превышения на станции выполняется одним приемом, то оно также будет отягощено величиной оседания системы «штатив – тахеометр» даже при её равномерном опускании. При выполнении измерений одним горизонтом тахеометра требуется один переход наблюдателя вокруг штатива, а при двух горизонтах – два.

Из выполненного анализа трех программ измерений одним приемом следует, что компенсация величины оседания системы «штатив – тахеометр» происходит при использовании первой программы. При использовании второй и третьей программ компенсация величины оседания системы «штатив – тахеометр» не происходит, но она происходит при двух горизонтах тахеометра.

Вторая программа:

а) 1-й горизонт $З_{КЛ}$, $П_{КЛ}$, $З_{КП}$, $П_{КП}$;

б) 2-й горизонт $П_{КЛ}$, $З_{КЛ}$, $П_{КП}$, $З_{КП}$.

Третья программа:

а) 1-й горизонт $З_{КЛ}$, $З_{КП}$, $П_{КЛ}$, $П_{КП}$;

б) 2-й горизонт $П_{КЛ}$, $П_{КП}$, $З_{КЛ}$, $З_{КП}$.

Вместе с тем, достоинством третьей программы является минимальное количество перехода наблюдателя вокруг штатива. Эту программу целесообразно использовать при установке штатива на бетонное основание.

Важным фактором в обеспечении точности измерений является контроль измеряемых превышений на станции. При тригонометрическом нивелировании на станции превышение измеряется между осью вращения зрительной трубы тахеометра и центром каждой светоотражающей пленкой (маркой) при *КЛ* и *КП*. В связи с тем, что в процессе измерений *МО* может изменяться, то разности превышений, полученные при *КЛ* и *КП*, не будут величиной, постоянной для данного расстояния, и использование их для оценки качества измерений не будет надежным. Поэтому для контроля необходимо использовать разность превышений из двух приемов.

Кроме того, программа наблюдений должна обеспечивать минимальное количество переходов наблюдателя вокруг тахеометра, что приведет к уменьшению его давления на грунт и, следовательно, на величину перемещения системы «штатив – тахеометр», а также к увеличению скорости работ.

Кроме определения деформационного состояния особо опасных инженерных сооружений производится определение и вспомогательных сооружений (см. таблицу 2.1), для которых величина СКО измерения превышения на станции может быть равна 0,5–1,0 мм. В этом случае тригонометрическое нивелирование может выполняться с точностью III и IV классов (см. таблицу 1.5). Также оно может применяться, если в техническом задании заказчика при выполнении тригонометрического нивелирования как при возведении инженерного сооружения, так и при его эксплуатации будет предписано руководствоваться только нормативным документом [27].

С учетом этого рассмотрим основные требования технологического характера, которые необходимо учитывать при выполнении тригонометрического нивелировании с точностью, предъявляемой к нивелированию III и IV классов [55] или 3-го и 4-го разрядов (см. таблицу 1.10):

– точность применяемых тахеометров и конструкции визирных целей;

– программа выполнения измерений на станции;

– допустимая минимальная высота визирования;

– благоприятное время для выполнения измерений;

– допустимая величина неравенства плеч на станции, а также допустимая величина ее накопления в ходе;

– длина визирного луча при выполнении нивелирования;

– система контролей и допусков на станции.

Для выполнения тригонометрического нивелирования с точностью, предъявляемой к нивелированию III и IV классов, необходимо применять высокоточные тахеометры, обеспечивающие СКО измерения углов наклона m_α =1,0"–2,0" и расстояний до 200–250 м с ошибкой m_S =1,5–3,0 мм, в том числе и с применением безотражательного режима [55].

Необходимо отметить, что тригонометрическое нивелирование III класса на промплощадках, в зависимости от числа измерений превышения на станции, может выполняться как в прямом и обратном направлениях, так и только в прямом. Нивелирование IV класса можно выполняется только в прямом направлении [55].

3.8 Обоснование цикличности выполнения высокоточного нивелирования на техногенных геодинамических полигонах АЭС

Таким образом, на техногенном геодинамическом полигоне выполнение высокоточного геометрического нивелирования можно производить с применением двух методик:

– с прокладыванием нивелирных ходов I класса по двум линиям с изменением горизонта нивелира в прямом и обратном направлениях согласно требованиям нормативного документа [109];

– с прокладыванием нивелирных ходов I класса по одной линии в прямом и обратном направлениях при двух горизонтах нивелира согласно нашему предложению.

При выполнении высокоточного нивелирования с целью определения деформационного состояния земной поверхности важной параметром является цикличность его выполнения. Для геодинамических полигонов АЭС цикличность выполнения нивелирования для каждой промплощадки устанавливается проектной организацией. В основном периодичность такого нивелирования в среднем составляет два цикла в год и она не связывается с цикличностью выполнения измерений для целей деформационного мониторинга инженерных сооружений и применяемого технологического оборудования, например здания реактора и турбинного отделения [16, 41, 42, 120].

В связи с этим при проектировании схемы расположения реперов геодинамического полигона не предусматривается их установка в воронке оседания с целью определения общей динамики земной поверхности на промплощадке. Поэтому определение деформационного состояния земной поверхности территории промплощадки и инженерного сооружения производится отдельно.

С целью получения более объективной картины деформационного состояния земной поверхности территории промплощадки и инженерного сооружения нами при проектировании нивелирной сети геодинамического полигона предлагается дополнительно устанавливать реперы в воронке оседания, особенно в воронке оседания здания реактора. При этом реперы, предназначенные для определения деформационного состояния инженерных сооружений, должны устанавливаться вне зоны влияния воронки оседания.

Цикличность выполнения инженерно-геодезических измерений для целей деформационного мониторинга за вертикальными смещениями инженерных сооружений на стадии строительства и эксплуатации объектов атомной промышленности должна соответствовать требованиям нормативного документа [109] (таблица 3.14).

Таблица 3.14 – Периодичность наблюдений за вертикальными смещениями в строительный и эксплуатационный периоды для зданий и сооружений АЭС

Этап наблюдений	Уровень ответственности сооружения или здания за радиационную и ядерную безопасность согласно федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии		
	I	II	III
При возведении фундамента зданий и сооружений	Один цикл		
При достижении 25, 50, 75 и 100 процентной нагрузки на фундамент	Всего 4 цикла наблюдений		
Во время опробования производственного цикла сооружения	Один и более циклов (в зависимости от особенностей и длительности процесса)		
Приемка сооружения в эксплуатацию	Один цикл		
В первый год эксплуатации	4 раза в год	4 раза в год	1 раз в год
До стабилизации смещений	3 раза в год	2 раза в год	1 раз в год
После стабилизации смещений	1 раз в год	1 раз в 2 года	1 раз в 5 лет
Фундаменты турбогенераторов после бетонирования нижней плиты:	1 цикл		
– до монтажа, по нижней плите;	2 раза в месяц		
– до монтажа, по колоннам;	1 раз в 2 месяца		
– перед пуском;	1 – 2 цикла		
– до стабилизации плиты после пуска генератора, по верхней плите;	2 раза в сутки примерно 2 недели		
– при эксплуатации, по колоннам;	1–2 раза в год		
– после стабилизации вертикальных смещений, по колоннам;	1 раз в 5 лет		
– при эксплуатации генератора, по верхней плите	5–90 дней в зависимости от скорости вертикальных смещений и тепловых деформаций фундамента		
Защитная оболочка (вертикальные смещения)	По утвержденному эксплуатирующей организацией графику		

Необходимо отметить, что указанная в таблице 3.12 цикличность выполнения измерений при монтаже турбоагрегата и последующего определения деформационного состояния всей системы «турбоагрегат – фундамент – основание» не позволит в полной мере выявить величину прогиба верхней плиты и линии валопровода (линии роторов). Поэтому для повышения достоверности прогнозирования развития деформационных процессов турбоагрегатов мощностью 500 МВт и более нами предлагается совмещенная цикличность выполнения высокоточного нивелирования по реперам техногенного геодинамического полигона и нижней плиты турбоагрегатов (таблица 3.15).

Таблица 3.15 – Предлагаемая цикличность выполнения нивелирования реперов геодинамического полигона с эксплуатацией системы ТФО

№ п/п	Этапы возведения турбинного отделения	Число циклов измерений и их последовательность
1	Начало разработки котлована	Один цикл по реперам (исходный цикл нивелирования) геодинамического полигона
2	Разработка котлована	Один цикл измерений квартал по реперам геодинамического полигона.
3	Начало монтажа нижней плиты	Один цикл измерений по реперам геодинамического полигона и маркам нижней плиты
4	Завершение монтажа фундамента турбоагрегата	Один цикл измерений по реперам геодинамического полигона и маркам нижней плиты
5	Начало монтажа турбоагрегата	Один цикл измерений по реперам геодинамического полигона и маркам нижней плиты
6	Окончание монтажа турбоагрегата и его пуск	Один цикл измерений по реперам геодинамического полигона и маркам нижней плиты
7	Эксплуатация турбоагрега та (работа, ремонт)	Один цикл измерений в год по реперам геодинамического полигона и маркам нижней плиты

Также нами предлагается совмещенная цикличность выполнения нивелирования реперов ТГП с эксплуатацией реакторного отделения, которая приведена в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Предлагаемая совмещенная цикличность выполнения нивелирования реперов ТГП и марок реакторного отделения

№ п/п	Этапы возведения реакторного отделения	Число циклов измерений и их последовательность
1	Начало разработки котлована под реакторное отделение	Один цикл по кустам реперов геодинамического полигона в зоне воронки оседания и реперам вне ее (исходный цикл нивелирования)
2	Разработка котлована под реакторное отделение	Один цикл измерений в месяц по кустам реперов геодинамического полигона в зоне воронки оседания и реперам вне ее.
3	Возведение фундамента под реакторное отделение	Один цикл измерений в квартал по указанным реперам геодинамического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
4	Начало возведения здания реактора	Один цикл измерений в квартал по указанным реперам геодинамического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
5	При достижении 25, 50, 75 и 100% нагрузки на фундамент	Четыре цикла измерений по указанным реперам геодинамического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
6	Пуск реактора	Один цикл измерений по указанным реперам геодинамического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
7	Эксплуатация реактора	Два цикла измерений в год по указанным реперам геодинамического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
Примечание. Цикличность наблюдения за осадочными марками реакторного отделения может быть увеличена в зависимости от величины и скорости развития деформационных процессов.		

Такая цикличность выполнения высокоточного нивелирования по реперам геодинамического полигона, а также осадочным маркам фундамента реакторного отделения позволит более объективно выполнять прогноз развития деформационного состояния территории вокруг возводимого реакторного отделения, а затем и при его эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании теоретических и экспериментальных исследований достигнута цель: разработана методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений на ТГП и обеспечения единого координатного пространства для деформационного мониторинга земной поверхности, а также особо опасных и технически сложных инженерных сооружений. Основные научные и практические результаты при выполнении поставленных задач:

– выполнен информационно-аналитический анализ существующих методик и средств производства инженерно-геодезических измерений, на основании которого было установлено, что в настоящее время не в полной мере разработана методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений при создании ТГП на промышленных площадках АЭС для деформационного мониторинга земной поверхности и расположенных на них особо опасных и технически сложных инженерных сооружений;

– на основании современного уровня развития геодезического измерительного оборудования предложена методика производства высокоточных инженерно-геодезических измерений и выполнены исследования вариантов построения ТГП, позволяющие при минимальной трудоемкости с заданной нормативной точностью создать и поддерживать в актуальном состоянии единое координатное пространство для строительства и деформационного мониторинга объектов атомной энергетики с учетом тектонических процессов территории промышленной площадки АЭС;

– выполнены экспериментальные исследования по влиянию неблагоприятных погодных условий, позволившие установить области возможного выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений в зависимости от плотности тумана;

– разработана схема метрологической поверки, которая позволяет регулярно проводить поверку электронных тахеометров для выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений в неблагоприятных условиях промышленной площадки для строящейся и действующей АЭС без применения эталонных линейных базисов;

– для реализации деформационного мониторинга опасных и технически сложных инженерных сооружений в условиях тектонических воздействий на территорию АЭС в едином координатном пространстве (совмещенная цикличность измерений) предложены и выполнены исследования схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений;

– проведена апробация разработанной методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений в условиях строящейся АЭС, которая доказала эффективность предложенных технологических решений, позволяющих без снижения нормативной точности выполнять деформационный мониторинг опасных и технически сложных инженерных сооружений.

Разработанная и апробированная методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений рекомендуется к применению на ТГП строящихся и эксплуатируемых АЭС с реакторами ВВЭР-1200. При ее применении будет с необходимой точностью определяться деформационное состояние промплощадки, здания реактора и системы «турбоагрегат-фундамент-основание».

Перспектива дальнейших исследований заключается в дальнейшем совершенствовании технологических решений при производстве высокоточных инженерно-геодезических измерений для определения деформационного состояния особо опасных и технически сложных инженерных сооружений АЭС с учетом применения нового измерительного технологического оборудования: роботизированных тахеометров, высокоточных наземных лазерных сканеров, а также лазерных трекеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Авакян, В. В. Прикладная геодезия: Геодезическое обеспечение строительного производства – 3-е издание. / В. В. Авакян. – Москва : Академический проект, 2007. – 587 с. – Текст : непосредственный.

2 Анализ технологических схем создания геодезического обоснования на промплощадке. / Г. А. Уставич, А. Г. Неволин, В. А. Падве, А. В. Никонов, В. Г. Сальников. – Текст : непосредственный // Записки Горного института, 2021. – Т. 249. – С. 366–396.

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

4 Афонин, Д. А. Построение геодезической разбивочной сети, закрепляемой пленочными отражателями / Д. А. Афонин. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 301–308.

5 Беспалов, Ю. И. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами / Ю. И. Беспалов, С. Г. Мирошниченко. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С. 12–13.

6 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.

7 Бовшин, Н. А. Исследование зависимости координат EPN/IGS-станций от температуры окружающей среды / Н. А. Бовшин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2022. – № 3. – С. 2–13.

8 Бовшин, Н. А. Исследование зависимости координат EPN/IGS-станций, размещенных на зданиях и других сооружениях, от температуры окружающей среды / Н. А. Бовшин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2023. – № 1. – С. 2–14.

9 Бовшин, Н. А. Исследование зависимости координат EPN/IGS-станций, размещенных на зданиях, от температуры окружающей среды / Н. А. Бовшин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2022. – № 9. – С. 2–13.

10 Брынь, М. Я. Проектирование геодезической сети поисковым методом на основе использования неискаженной модели / М. Я. Брынь, Г. Г. Шевченко. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2020. – № 12. – С. 2–10.

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

12 Вердиев, С. В. Выбор оптимального режима работы электронных тахеометров при геодезических измерениях в условиях сильного аэрозольного загрязнения атмосферы / С. В. Вердиев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. –2018. – № 8. – С. 12–19.

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

14 Влияние положения визирной цели – отражательной марки на точность измерений по схеме обратной линейно-угловой засечки. / И. В. Горяинов, А. А. Кодиров, А. А. Шевчук, С. В. Аверьянов, Е. В. Дельфонцев. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. –№ 3. – С. 29–35.

15 Временные методические рекомендации по применению цифрового нивелира DiNi03 для нивелирования I класса. – Москва : ФГУП «ЦКГФ», 2013. – 22 стр. – Текст : непосредственный.

16 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.

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

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

19 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.

20 ГКИНП-10-186-84. Руководящий технический материал по изучению деформаций земной поверхности геодезическими методами на полигонах атомных электростанций. – Москва : Недра, 1985. – 41 стр. – Текст : непосредственный.

21 Гордеев, В. А. Исследование точности определения горизонтальных смещений при геодезическом мониторинге способом свободного станционирования / В. А. Гордеев, Г. Г. Шевченко. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2022. – № 11. – С. 2–11.

22 Горилько, А. С. Выполнение высокоточного полигонометрического хода короткими лучами для создания планового обоснования на техногенном геодинамическом полигоне / А. С. Горилько Н. М. Рябова, А. Р. Якушева. – Текст : непосредственный //. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Междунар. научн. техн. конгр., 21–22 мая 2025 г., Новосибирск : сборник материалов в 6 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2025. – С. 41–67. – DOI 10.33764/2618-981X-2025-1-1-41-67.

23 Горилько, А. С. Выполнение геодезических измерений в условиях тумана / А. С. Горилько, М. А. Минаева, А. М. Астапов. – Текст : электронный // Актуальные проблемы геодезии, картографии, кадастра, геоинформационных технологий, рационального земле- и природопользования. Электронный сборник тезисов Международной научно-технической конференции. – Новополоцк, 2022. – С. 16–17. – URL: https://elib.psu.by/handle/123456789/36108.

24 Горяинов, И. В. О наилучшей конфигурации обратной линейно-угловой засечки и необходимом количестве пунктов для достижения заданной точности. / И. В. Горяинов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 4. – С. 46–51.

25 Горяинов, И. В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети / И. В. Горяинов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 28–39.

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

27 ГОСТ 24846–2019. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений : межгосударственный стандарт. − Введ. 01.07.2020. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 22 с. – Текст : непосредственный.

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

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

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

31 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.

32 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.

33 ГОСТ Р 8.565-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение атомных станций. Основные положения : национальный стандарт Российской Федерации ; введен 01.07.2015. – Стандартинформ, 2015. – 20 с. – Текст : непосредственный.

34 ГОСТ Р 8.568–2017. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 16 с. – Текст : непосредственный.

35 ГОСТ Р 8.885–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 6 с. – Текст : непосредственный.

36 Градостроительный кодекс Российской Федерации: федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ (в ред. 26.12.2024) (с изм. и доп. вступ. в силу с 01.01.2025). – URL: http://www.consultant.ru. – Текст : электронный.

37 Жарников, В. Б. О классах геометрического нивелирования для контроля деформация / В. Б. Жарников, Б. Н. Жуков. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1990. – № 9. – С. 22 – 26.

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

39 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 // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018.– № 3. – С. 271–276.

40 Измерительный комплекс для аттестации угловых и линейных измерительных систем УМК-М / Е. С. Бахарев, Н. Х. Голыгин, С. В. Травкин, О. Б. Хиноева, Х. К. Ямбаев. – Текст : непосредственный // Приборы. – 2006. – № 5 (71). – С. 50–54.

41 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.

42 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.

43 Исследование стабильности положения пунктов обоснования при их закреплении на разных горизонтах инженерных сооружений / А. С. Горилько, А. М. Астапов, Н. М. Рябова, Т. Д. Денисович. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15–17 мая 2024 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – С. 37– 43. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-1-37-43.

44 Исследование точности измерения длин лазерными дальномерами электронных тахеометров / А. А. Шоломицкий, Н. С., Косарев., А. В. Никонов, Л. Е. Сердаков., Е. Л. Соболева – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. –Т. 29, № 5. – С. 59–68.

45 Исследование точностных характеристик внутреннего электронного уровня API Laser Tracker 3 / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 13–16.

46 Каленицкий, А. И. Геодезическо-гравиметрический мониторинг техногенной геодинамики инженерных сооружений / А. И. Каленицкий. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2000. – № 8. – С. 24 – 27.

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 Комиссаров, А. В. Исследование точности определения деформаций сооружений при помощи электронного тахеометра и наземного лазерного сканера / Ашраф А. Бешр, А. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2008.

IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 1, ч. 1. – С. 107–111.

50 Конопальцев, И. М. К вопросу об улучшении способа геометрического нивелирования / И. М. Конопальцев. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1966.– №4.– С. 61–71.

51 Кузин, А. А. Метод определения плановых координат и высоты рабочего репера на оползне с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения / А. А. Кузин, В. Г. Филиппов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2024. – № 9. – С. 2–11.

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

53 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.

54 Малков, А. Г. О контроле измерений превышений цифровыми нивелирами / А. Г. Малков. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2009. – № 9. – С. 14–15.

55 Методика выполнения нивелирования III и IV классов тригонометрическим способом / Г. А. Уставич, А. А. Никонов, В. Г. Сальников, Н. М. Рябова, А. С. Горилько. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 7. – С. 2–11.

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 Методика развития ПВО с использованием элементов строительных конструкций / Г. Г. Китаев, В. Г. Сальников, Н. М. Рябова, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшедерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА, 2014. – С. 7–13.

60 Мещерский, И. Н. О последовательности отсчетов на станции при высокоточном нивелировании / И. Н. Мещерский. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 1978. – № 6. – С. 32–34.

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

62 Михелев, Д. Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений / Д. Ш. Михелев, И. В. Рунов, А. И. Голубцов. – Москва : Недра, 1977. – 152 с. – Текст : непосредственный.

63 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.

64 Никонов, А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров / А. В. Никонов. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.

65 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.

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

67 НП-001-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии – Москва : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2015. – 67 с. – Текст : непосредственный.

68 НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – Москва : Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности, 2017. – 82 с. – Текст : непосредственный.

69 НП-041-22 Требования по безопасности к строительным конструкциям зданиям и сооружениям атомных электростанций – Москва : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2023. – 78 с. – Текст : непосредственный.

70 НП-064-17 Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. – Москва : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2017. – 70 с. – Текст : непосредственный.

71 О выборе конструкции пунктов высотной основы на промплощадке тепловых электростанций / В. Г. Сальников, А. С. Горилько, А. М. Астапов, Б. Д. Чебаков. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 47–56.

72 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.

73 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.

74 О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (в ред. 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024). – URL: http://www.consultant.ru. – Текст : электронный.

75 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. – Текст : непосредственный.

76 Об обеспечении единства измерений : федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 11.06.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 29.12.2021). – URL: http://www.consultant.ru. – Текст : электронный.

77 Официальный сайт https://www.atomic-energy.ru. // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0. – URL: https://www.atomic-energy.ru. – Текст : электронный (дата обращения 22.08.2024).

78 Оценка точности определения положения точек способом свободного позиционирования / М. Я. Брынь, Ю. В. Лобанова, Д. А. Афонин, Г. Г. Шевченко – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. –2021. – № 5. – С. 2–9.

79 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.

80 ПиНАЭ-5.10-87 Правила и нормы в атомной энергетике. Основания реакторных отделений атомных станций. – Москва : Министерство атомной энергетики СССР, 1987. – 68 с. – Текст : непосредственный.

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

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

83 Подшивалов, В. П. Тригонометрическое нивелирование коротким лучом / В. П. Подшивалов, Али Салим. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. –1994. – № 6. – С. 18–19.

84 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.

85 Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом / Г. А. Уставич, М. Е. Рахымбердина, А. В. Никонов, С. А. Бабасов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22.

86 Разработка стационарного лабораторного стенда для поверки тахеометров / Г. А. Уставич, И. Ю. Васютинский, Д. А. Баранников, А. С. Горилько. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 45–53. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-45-53.

87 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.

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 Российский опыт разработки, создания и применения прецизионных устройств гидростатического нивелирования на объектах научного, гражданского

и промышленного назначения. / И. Ю. Васютинский, С. И. Васютинская, С. П. Буюкян, Н. А. Кузянов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 6. – С. 49–54.

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

91 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.

92 Скрипников, В. А. Построение плановой разбивочной сети с применением спутниковых геодезических приемников (СГП) / В. А. Скрипников. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2001. – № 6. – С. 41–44.

93 СО 153-34.21.322-2003 Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформаций зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – Москва : Центр производственно-технической информации энергопредприятий и технического обучения ОРГРЭС, 2003. – 55 с. – Текст : непосредственный.

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

95 Совершенствование методики веерообразного тригонометрического нивелирования / Г. А. Уставич, А. В. Никонов, И. А. Мезенцев, Е. А. Олейникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 6. – С. 142–150.

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

97 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.

98 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.

99 Соловицкий, А. Н. Особенности геодинамики Кузбасса и методов ее исследования / А. Н. Соловицкий, А. И. Каленицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2025. – № 1 (30). – С. 37–47.

100 СП 126.13330.2017 Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03 – 84. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 58 с. – Текст : непосредственный.

101 СП 151.13330.2012 «Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Часть П. Инженерные изыскания для разработки проектной и рабочей документации и сопровождения строительства». – URL: https://www.consultant.ru/. – Текст : электронный.

102 СП 305.1325800.2017 Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 61 с. – Текст : непосредственный.

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

104 Спиридонов, А. И. Основы геодезической метрологии. / А. И. Спиридонов. – Москва : Картгеоцентр–Геодезиздат, 2003. – 247 с. – Текст : непосредственный.

105 Справочник по геодезическим разбивочным работам / Г. В. Багратуни, В. Ф. Лукьянов, Я. А. Сокольский, А. Н. Сухов. – Москва : Недра 1982. – 128 с. – Текст : непосредственный.

106 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.

107 СТО 9512023-2017 Инженерные изыскания при строительстве атомных электростанций. – Москва : «Росатом». – 40 с. – Текст : непосредственный.

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

109 СТО СРО-Г6054295400007–2023 Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений атомных электростанций. – Москва : Союзатомгео, 2023. – 131 с. – Текст : непосредственный.

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

111 Столбов, Ю. В. Методы расчета и обоснование допусков на строительные работы и геодезический контроль при возведении линейных сооружений / Ю. В. Столбов, С. Ю. Столбова, Л. А. Пронина. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство. – 2018. – № 7 (710). – С. 60–69.

112 Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактив-

ных отходов / А. Н. Дорофеев, Л. А. Большов, И. И. Линге, С. С. Уткин, Е. А. Савельева. – Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. – 2017. – № 1. – С. 32–41.

113 Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. От 25.12.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024). – URL: https://www.consultant.ru/. – Текст : электронный.

114 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.

115 Уставич, Г. А. Геодезия. Книга 2. : учебник для вузов / Г. А. Уставич. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 536 с. – Текст : непосредственный.

116 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.

117 Уставич, Г. А. О совершенствовании технологий нивелирования / Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2005. – № 3. – С. 11–13.

118 Уставич, Г. А. Разработка и совершенствование технологии государственного нивелирования I, II, III и IV классов / Г. А. Уставич, В. Ф. Шаульский, О. И. Винокурова. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2003. – № 8. – С. 5–11.

119 Уставич, Г. А. Разработка программ наблюдений тахеометром на нивелирной станции способом из середины / Г. А. Уставич, М. Е. Рахымбердина. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 163–169.

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

121 Уставич, Г. А. Технология выполнения высокоточного нивелирования цифровыми нивелирами / Г. А. Уставич. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. –2006. – № 2. – С. 3–6.

122 Устинов, А. В. Результаты мониторинга вертикальных перемещений в процессе компенсационного нагнетания на опытном участке Загорской ГАЭС-2 / А. В. Устинов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. –Т. 23, № 4. – С.128–142.

123 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.

124 Шалыгина, Е. Л. Цифровое нивелирование – основные источники ошибок / Е. Л. Шалыгина. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2005. – № 5. – С. 15–17.

125 Шануров, Г. А. Влияние кривизны траектории электромагнитных волн на измерение расстояний / Г. А. Шануров, Р. Р. Шакмеев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2001. – № 7. – С. 14–17

126 Шеховцов, Г. А. Об оценке точности обратной линейно-угловой засечки при передаче координат на монтажные горизонты при строительстве зданий повышенной этажности / Г. А. Шеховцов. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019.– № 3. – С. 275–281.

127 Широв, Ф. В. К вопросу оценки точности измерения СГА больших расстояний / Ф. В. Широв, Р. А. Татевян, В. И. Кафтан. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2003. – № 8. – С. 11–13.

128 Шоломицкий, А. А. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.

129 Энтин, И. И. Высокоточное нивелирование / И. И. Энтин // Труды ЦНИИГАиК. – Москва : Геодезиздат, 1956. – Вып. 111. – 340 с. – Текст : непосредственный.

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

131 Ямбаев, Х. К. Инженерно-геодезические инструменты и системы : учебное пособие для вузов / Х. К. Ямбаев. – Москва : Издательство МИИГАиК, 2012. – 462 с. – Текст : непосредственный.

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

133 Ямбаев, Х. К. Специальные приборы для инженерно-геодезических работ / Х. К. Ямбаев. – Москва : Недра. 1990. – 266 с. – Текст : непосредственный.

134 Яндров, И. А. Возможности использования спутниковых методов в процессе строительства / И. А. Яндров. – Текст : непосредственный // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – №5. – С. 36–43.

135 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.

136 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, Issue 4. – P. 140–145.