

На правах рукописи

Астапов Андрей Михайлович



Разработка методики определения деформационного состояния
инженерных сооружений и применяемого технологического оборудования

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Уставич Георгий Афанасьевич.

Официальные оппоненты:

Соловицкий Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», профессор кафедры геологии и географии;

Сердаков Леонид Евгеньевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера» Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник сектора 1-31.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (г. Москва).

Защита диссертации состоится 18 марта 2025 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/astapov-andrey-mikhaylovich/>

Автореферат разослан 31 января 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 13.01.2025. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 187.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

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

Основные задачи исследований:

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

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

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

Научная новизна диссертационных исследований заключается в следующем:

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

а также предложена технологическая схема визуального отображения в 3D-формате их тепловых деформаций, которая позволяет в зависимости от режима работы турбоагрегата «останов-пуск-работа» определять характер и величину изменения значений центровок роторов валопровода;

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

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

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

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

Положения, выносимые на защиту:

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

– выполненное совершенствование технологической схемы визуализации тепловых деформаций и обоснование цикличности наблюдений осадок и дефор-

маций фундаментов турбоагрегатов мощностью 500 МВт и более позволяет определять характер и величину изменения значений центровок роторов валопровода в зависимости от режима работы турбоагрегата;

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

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

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

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

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, устанавливается достоверность результатов исследования, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассматриваются существующие технологические схемы осуществления деформационного мониторинга инженерных сооружений башенного типа. Рассматриваются способы и приборы для выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений. По итогам выполненного анализа существующих технологических схем мониторинга сформулирована цель и основные научно-технические задачи для выполнения исследований.

Во втором разделе выполнены исследования по совершенствованию методики производства инженерно-геодезических работ с целью определения крена инженерных сооружений башенного типа. В основу предлагаемой методики положено применение БАС для определения в пространстве геометрии инженерного сооружения башенного типа, к которым относятся дымовые и вентиляционные трубы, с последующим определением координат наблюдаемых точек на поверхности трубы, а затем и ее крена. Технологическая схема определения крена инженерных сооружений башенного типа приведена на рисунке 1. Она состоит из полевого и камерального этапов.

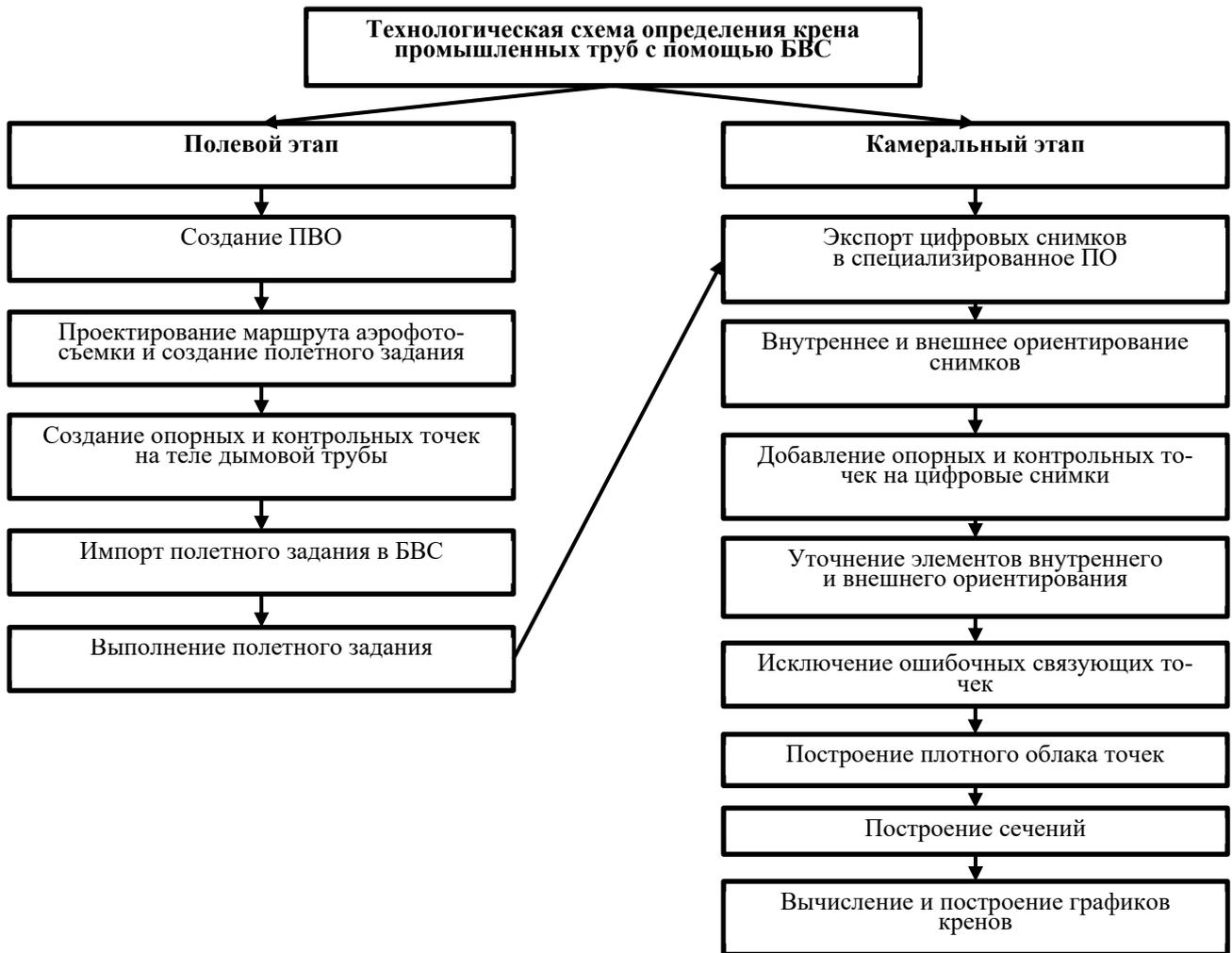


Рисунок 1 – Технологическая схема определения кренов дымовых труб с помощью беспилотного летательного аппарата

Полевой этап включает в себя:

- создание на промплощадке в районе расположения трубы планово-высотного обоснования (ПВО);
- координирование пунктов ПВО, а также опорных и контрольных марок на внешней стороне промышленной трубы;
- проектирование маршрута съемки и создание полетного задания с учетом расположения прилегающих инженерных сооружений, а также геометрических параметров промышленной трубы;
- импорт полетного задания в БАС;
- выполнение съемки согласно запроектированному маршруту.

Камеральный этап включает в себя:

- экспорт полученных цифровых снимков в специализированное программное обеспечение;
- выполнение внутреннего и внешнего ориентирования;
- нанесение опорных и контрольных марок на полученные цифровые снимки;
- исключение ошибочных точек из разряженного облака точек;
- построение плотного облака точек и сечений с заданным шагом;
- вычисление величины (изменения) крена трубы и построение графика.

Пункты ПВО должны располагаться таким образом, чтобы была возможность координирования опорных точек, а также марок, расположенных на промышленной трубе. Учитывая тот факт, что на промплощадке могут находиться и другие высотные сооружения, то пункты обоснования необходимо размещать вне зоны влияния возможной многопутности сигнала.

Создание ПВО в районе расположения трубы может производиться способами, обеспечивающими величину СКО определения координат пунктов не хуже 5,0–7,0 мм. В случае применения высокоточных тахеометров величину СКО определения координат обоснования способом полярной засечки можно найти по формуле

$$m_p^2 = m_l^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 l^2 + m_{ц.р.}^2 + m_{и}^2 + m_{ф}^2, \quad (1)$$

где m_s – ошибка измерения расстояния; m_β – ошибка измерения угла (дирекционного угла); $m_{ц.р.}$ – ошибка за влияние центрирования и редукции; $m_{и}$ – ошибка исходных данных; $m_{ф}$ – ошибка фиксации марки.

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

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

$$m_{yi} = \sqrt{m_s^2 \sin^2 \alpha + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} S_i \cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

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

При выполнении исследований для обеспечения перевода пунктов ПВО в систему координат WGS 84 на пунктах ПВО устанавливались ГНСС-приемники и измерения выполнялись в режиме «Статика». После обработки измерений в Trimble Business Center и преобразования в прямоугольную систему координат WGS 84/UTM zone 44 N был получен каталог координат исходных пунктов. Схема созданного ПВО приведена на рисунке 2.

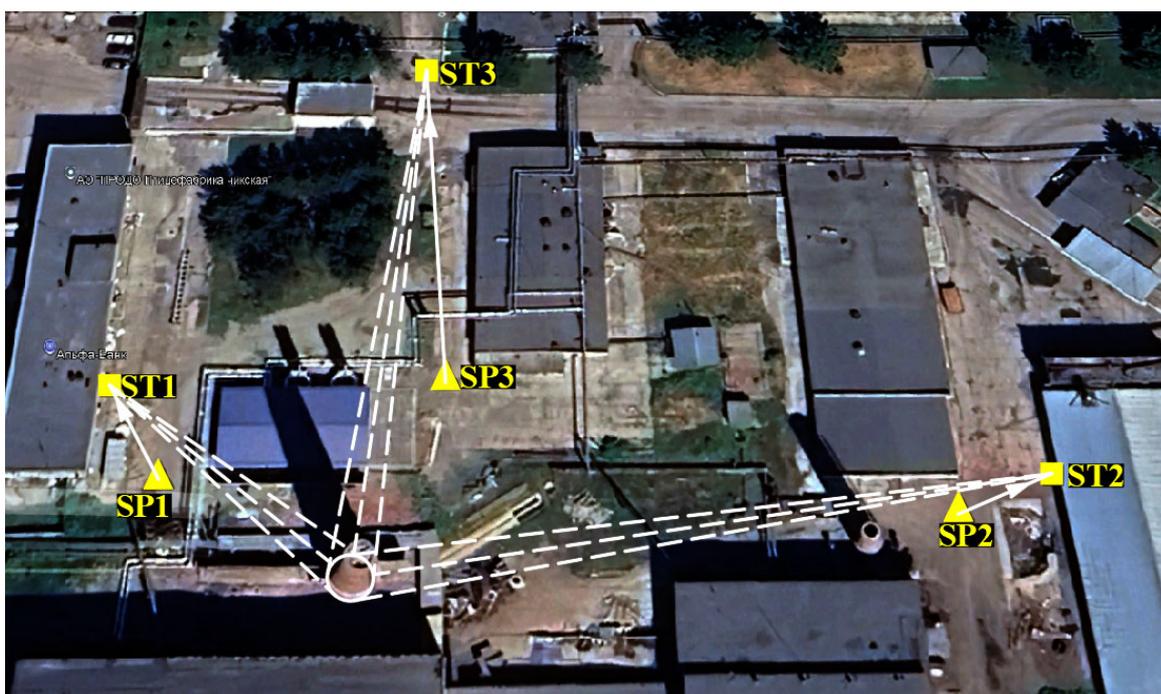


Рисунок 2 – Схема планово-высотного обоснования
на территории промплощадки

С целью оценки точности получения значений крена трубы с применением БАС, с пунктов ПВО также были определены его значения способом малых углов, которые принималось за теоретические.

Для определения геометрии трубы необходимо на ее внешней поверхности заложить определенное количество марок, которые подразделяются на опорные и контрольные. Опорные марки используются в процессе вычисления элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков, а также они являются основой координатной привязки цифровой модели, а контрольные – для оценки величин ошибок полученной модели. Расположение опорных и контрольных марок, а также их число обуславливается геометрией сооружения. Учитывая, что сечение дымовой трубы является окружностью, которую можно описать тремя точками, для этого создается три колонны вертикально расположенных марок (рисунок 3). При этом марки должны располагаться на одной высоте с отклонением от ряда не более 0,5–1,0 м. Расстояние между группами опорных марок должны составлять 10–20 % от высоты трубы, обеспечивая наличие на снимке минимум двух рядов опорных марок. Кроме того, для оценки точности построенной модели между группами марок необходимо располагать одну-две контрольные марки. Также, учитывая геометрическую форму снимаемого объекта, марки необходимо распределять равномерно по всей трубе. В качестве марок удобно выбрать края скоб металлических стяжек. После закладки марок производится определение их координат способом полярной засечки и тригонометрическим нивелированием короткими лучами с СКО порядка 2,0–2,5 мм.

Координирование марок на трубе рекомендуется выполнять в системе координат, в которой будут получены координаты центра фотографирования снимка. При невозможности ее использования, координирование можно выполнить в локальной системе координат, но при этом координаты центров снимков будут исключены из обработки.

Начальным этапом выполнения работ является проектирование маршрута съемки, при котором необходимо оценить возможность автоматической съемки, а также выявить опасные зоны полета, где может произойти столкновение БАС с другими объектами. При наличии таких препятствий съемку необходимо выполнять в полуавтоматическом режиме, а в опасных – в ручном режиме. После

этого в ПО Drone Harmony выполняется создание полетного задания и проектирование маршрута съемки в виде набора окружностей, координаты центров которых одинаковы в плане и разные по высоте (рисунок 4, а). Для построения корректной и информативной модели дымовой трубы значения перекрытий снимков должны быть не менее 80 %, и исходя из этого рассчитываются минимальная скорость полета БАС и интервал фотографирования, а также радиусы и высоты окружностей полета. В результате получается набор окружностей радиусом 10 метров и с шагом по высоте 5 метров (рисунок 4, б).



а)

б)

Рисунок 3 – Расположение опорных и контрольных точек

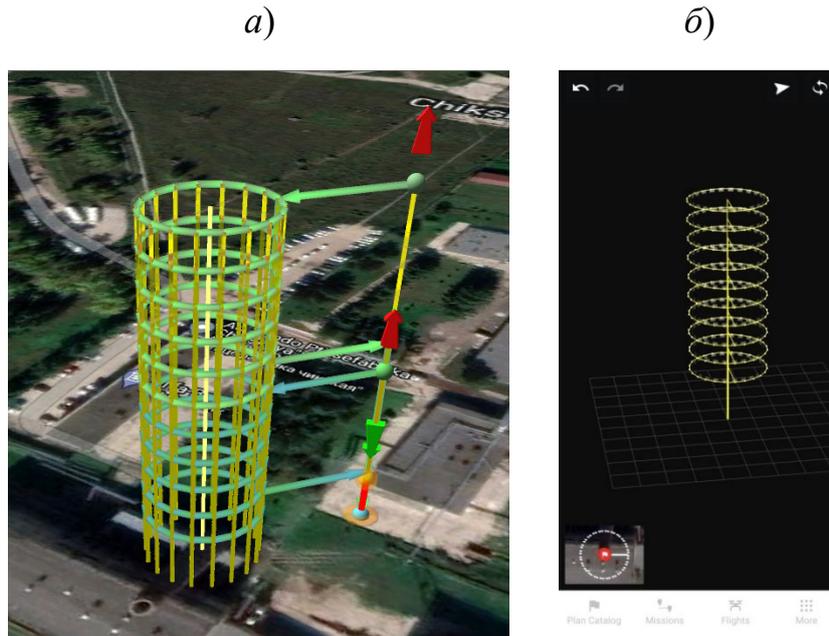


Рисунок 4 – Пример запроектированного полетного задания

Камеральная обработка включает в себя следующие основные этапы: построение и уравнивание сети фототриангуляции с определением параметров ориентирования камер, построение плотного облака точек, затем цифровой модели трубы и разверстки наружной поверхности трубы.

Из разреженного облака связующих точек исключаются ошибочные точки по двум критериям: точности определения положения со значениями коэффициента 15–25 и ошибке репроецирования со значениями коэффициента 0,15–0,20. В результате будет получено разреженное облако связующих точек высокого качества (рисунок 5, а). На следующем этапе в автоматическом режиме происходит построение плотного облака точек (рисунок 5, б). Завершающим этапом является построение цифровой модели и ее текстуры (рисунок 5, в). На основании текстурированной модели в режиме реального времени можно производить (в дополнение к определению крена трубы) оценку состояния ее внешней стенки.

Для вычисления крена трубы необходимо задать набор пространственного положения сечений с выбранным шагом по высоте (8–10 м). Для этого был разработан специальный модуль «Модуль вычисления сечений» (рисунок 6).

а)



б)



в)



Рисунок 5 – Построение модели трубы

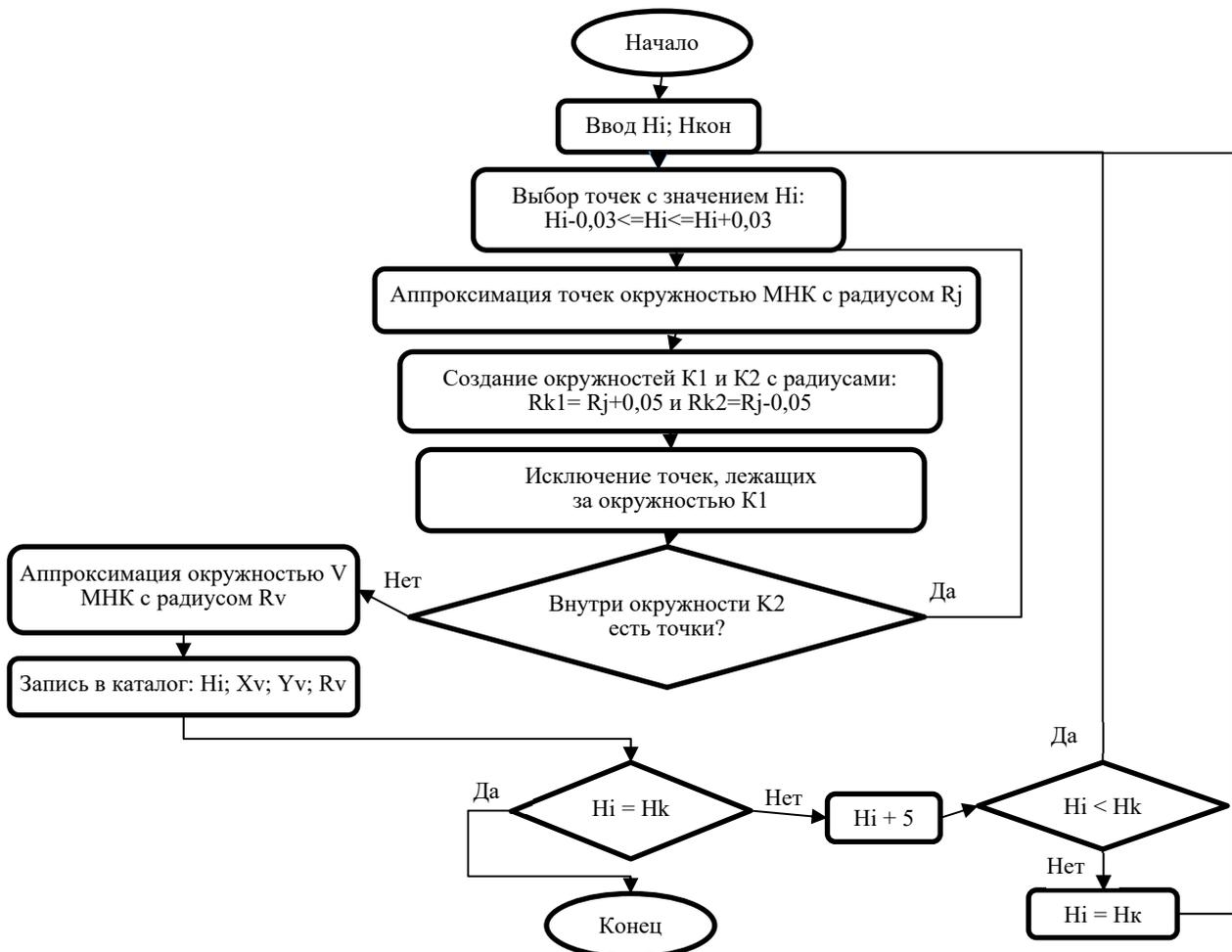


Рисунок 6 – «Модуль вычисления сечений»

Определение крена дымовых труб происходит на основании плотного облака точек, сечения получаются в результате аппроксимации окружностью выборки точек по критерию высоты, принадлежащих внешней поверхности дымовой трубы. Далее полученный txt файл с параметрами сечений импортируется в специализированное ПО, где в автоматическом режиме происходит вычисление значений кренов по формуле

$$Q = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2}, \quad (4)$$

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

На основании полученных экспериментальных данных были построены сечения трубы с определенным шагом, а также вычислены крены и их составляющие (таблица 1).

Таблица 1 – Значения кренов дымовой трубы

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

Параметры сечений и вычисленные значения крена сравнивались со значениями, полученными способом малых углов (таблица 2). Из таблицы следует, что значения кренов отличаются не более чем на 22,0 мм, при допустимой точности их измерения, равной 57,0 мм.

Таблица 2 – Сравнение значений кренов дымовых труб, полученных различными способами

Значения крена, полученные способом малых углов			Значения крена, полученные способом БАС			Разность параметров сечений			
Q_X (мм)	Q_Y (мм)	Q (мм)	Q_X (мм)	Q_Y (мм)	Q (мм)	dX (мм)	dY (мм)	$d_{\text{план}}$ (мм)	dR (мм)
0	0	0	0	0	0	10	-8	12	-1
-12	1	12	-16	-11	19	13	5	14	-11
2	3	4	-3	-26	26	15	22	26	6
16	-17	23	39	4	40	-14	-28	31	11

Кроме определения крена сооружений башенного типа, БАС могут применяться при обследовании и создании вертикальных инженерно-топографических планов для ведения исполнительных съемок и реконструкции технологического оборудования, например, паропроводов на ТЭС, которые устанавливаются вертикально и располагаются на внешней стороне стен. Выполненные исследования показали, что такие планы можно создавать с точностью масштаба 1 : 200.

В третьем разделе рассматривается методика определения деформационного состояния технологического оборудования АЭС и ТЭС.

Основным технологическим оборудованием АЭС и ТЭС являются турбоагрегаты мощностью 500 МВт и более, нормальная работа которых также зависит от деформационного состояния его фундамента и основания в общей системе «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО). Деформационное состояние данной системы зависит от режима работы турбоагрегата «останов – работа – пуск», так как вследствие изменения его температурного режима происходят неравномерные изменения высоты колонн фундамента. Это приводит к недопустимому изгибу линии роторов валопровода и изменению их расцентровок. Завод-изготовитель задает допустимое раскрытие δ_1 - δ_3 и δ_2 - δ_4 полумуфт роторов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, которое должно удовлетворять условию

$$\delta_1 - \delta_2 \leq \pm 0,03 \text{ мм.} \quad (5)$$

Из практики наблюдений за деформациями системы ТФО турбоагрегатов мощностью 500 МВт и более установлено, что за одни сутки величина прогиба (выгиба) линии валопровода составляет $f = 0,8$ – $1,0$ мм. Тогда, принимая $f = 1,0$ мм, получим $m_{\text{пред}} = 0,40$ мм и $m = 0,13$ мм.

Применительно к турбоагрегатам мощностью 500 МВт и более предлагается оптимальная цикличность выполнения высокоточного нивелирования с целью определения деформационного состояния линии валопровода в зависимости от изменения тепловых деформаций его фундамента. Для наглядного отображения величины тепловых деформаций целесообразно применять их трехмерное представление при нагреве фундамента. При создании 3D-модели для последующего расчета центровок учитываются величины тепловых деформаций по оси линии валопровода. Величины этих деформаций получают как среднее значе-

ние из деформаций левой и правой сторон верхней плиты. На рисунке 7, а отображена в 3D-формате деформация нижней плиты фундамента, на которой наглядно показаны участки с различным перемещением осадочных марок.

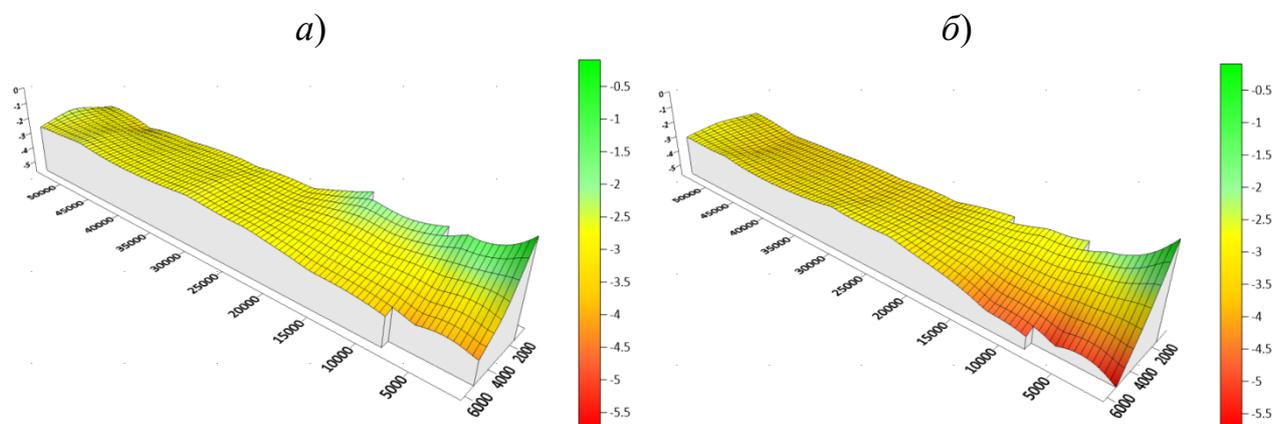


Рисунок 7 – Отображение в 3D-формате деформации нижней и верхней плит фундамента

Применительно к системе ТФО, в итоге, важным аспектом является отображение деформации верхней плиты фундамента в 3D-формате в зависимости от режима работы турбоагрегата, так как она показывает суммарную величину этой деформации, которая и оказывает влияние на положение линии валопровода.

На рисунке 7, б отображена в 3D-формате деформация верхней плиты фундамента, на которой показаны участки с различным перемещением осадочных марок. Представленные модели были построены в программе SURFER, интерполяция в узлах сетки выполнена методом кригинга, который учитывает закономерности деформаций поверхности.

При создании ПВО на промплощадке и выполнении высокоточного тригонометрического нивелирования короткими лучами для определения деформационного состояния инженерных сооружений и технологического оборудования (турбоагрегаты) применяются высокоточные тахеометры, которые должны проходить ежегодную метрологическую поверку в специализированной организации. Вместе с тем, во время работы на промплощадке, особенно в стесненных условиях, имеют место случайные механические удары по корпусу тахеометра. В этом случае возникает необходимость в проведении внеочередной (технологической) метрологической поверки дальномерной части.

Для выполнения метрологической технологической поверки на промплощадке нами предлагается методика ее реализации способом «двух станций». При этом могут быть применены две схемы выполнения измерений (рисунок 8):

- со стационарной установкой нескольких штативов A , C , D , E , F , K и B и применением одного отражателя, который во время выполнения измерений последовательно переставляется в трегеры этих штативов;

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

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

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

- производить измерения в пасмурную погоду при слабом ветре;
- штативы должны быть без люфтов в соединениях и устанавливаться на бетонное основание или твердый грунт;
- для увеличения устойчивости штативов к их станковому винту необходимо подвешивать груз весом до 5–6 кг.

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

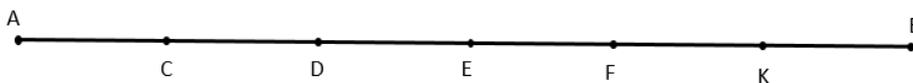


Рисунок 8 – Схема поверки тахеометра с двух станций

После этого отражатель вынимается из трегера штатива C , переносится и устанавливается в трегер штатива D с последующим измерением расстояния AD эталонным и поверяемым тахеометрами.

Аналогичным образом производятся измерения расстояний AE , AF , AK и AB с использованием отражателей, установленных на штативах в точках E , F , K и B (таблица 3). Указанные действия составляют прямой ход, после чего измерения выполняются в обратном ходе. Для этого тахеометр переносится и устанавливается по створу в точке B с последующим измерением расстояний BK , BF , BE , BD , BC и BA .

Таблица 3 – Результаты поверки тахеометра в лабораторных условиях с двух A и B станций (стационарная установка штативов)

S	TM30 (средние значения из 15 измерений, мм)		GeoMax (средние значения из 15 измерений, мм)		Разности, мм		Среднее значение разностей, мм
	штатив в точке A	штатив в точке B	штатив в точке A	штатив в точке B	$\Delta_1=A-A$	$\Delta_2=B-B$	
AC (BK)	8246,2	4416,1	8246,8	4416,8	-0,6	-0,7	-0,6
AD (BF)	28482,8	31886,1	28483,3	31886,7	-0,5	-0,6	-0,6
AE (BE)	49356,6	49186,6	49357,2	49187,4	-0,6	-0,8	-0,7
AF (BD)	66657,0	70060,8	66657,5	70061,4	-0,5	-0,6	-0,6
AK (BC)	94127,6	90297,0	94128,4	90297,7	-0,8	-0,7	-0,8
AB (BA)	98543,7	98543,4	98544,4	98544,2	-0,7	-0,8	-0,8

По окончании измерений приступают к обработке полученных результатов измерений вычислением СКО по формулам Гаусса и Бесселя.

СКО измерений, вычисленная по формуле Бесселя, для тахеометра TM30 равна 0,58 мм, а для GeoMax, вычисленная по формулам Бесселя и Гаусса, соответственно, 0,76 и 0,62 мм.

При реализации схемы с использованием одного штатива с отражателем путем установки его в произвольно выбранных точках A , C , D , E , F , K и B измерения выполняются эталонным и поверяемым тахеометрами с установкой их только в точках A и B . Для этого эталонный и поверяемый тахеометр поочередно устанавливается в точке A , штатив с отражателем в точке C и производятся измерения не менее чем тремя сериями (таблица 4). После этого штатив с отражателем переносится и устанавливается в произвольно выбранную точку D , затем

в E и т. д. в точку B , где и производятся аналогичные измерения тахеометрами. По окончании измерений тахеометр с точки A переносится в точку B и измерения продолжают с установкой штатива с отражателем в произвольно выбранных точках K, F, E, D, C и A .

Таблица 4 – Результаты поверки тахеометра в лабораторных условиях с двух A и B станций (произвольная установка отражателя)

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

Преимущество данной схемы перед первой заключается в использовании при выполнении измерений только одного штатива с отражателем.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

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

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

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

3 Патент № RU 2808389 С1, МПК G01C 11/18 (2006.01), B64C 39/02 (2006.01), B64U 101/32 (2023.01). Способ определения кренов дымовых труб с помощью беспилотного летательного аппарата : 2023108302 : заявл. 04.04.2023 : опубл. 28.11.2023 : бюл. № 34 / Астапов А. М., Косарев Н. С., Уставич Г. А. – 2023. – 8 с. – Текст : непосредственный.

4 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.

5 Хлебникова, Т. А. Разработка методики создания цифровых инженерно-топографических планов с использованием материалов съемки беспилотной авиаци-

онной 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.

6 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.

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

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

9 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.