

На правах рукописи

Палкин Павел Олегович



Геодезическое обеспечение контроля геометрических параметров изделий
авиастроения с применением прецизионных координатных систем

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, доцент Мустафин Мурат Газизович.

Официальные оппоненты:

Вшивкова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», заведующая кафедрой высшей геодезии;

Сердаков Леонид Евгеньевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное 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 «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (г. Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится 17 июня 2025 г. в 11-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 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/palkin-pavel-olegovich/>

Автореферат разослан 24 апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР №020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 14.04.2025. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 31.

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

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сборка и последующая эксплуатация изделий авиастроения должна обеспечиваться качественным геодезическим контролем геометрических параметров конструкций летательных аппаратов в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Для реализации данной задачи применяются как традиционные методы и средства геодезических измерений, так и современные, позволяющие обеспечить повышенные требования к точности сборки и монтажа конструкций летательных аппаратов и использовать multifunctional средства выполнения этих измерений. Действующие регламенты в настоящее время зачастую носят устоявшийся корпоративный характер, ориентированный на определенный перечень изделий, изготавливаемых с требуемой точностью. При этом требования к сборке и монтажу конструкций летательных аппаратов постоянно возрастают. Поэтому производители вынуждены обращаться к специализированным организациям для выполнения геодезического контроля геометрических параметров конструкций изделий авиастроения или закупать дорогостоящее измерительное оборудование.

В настоящее время геодезическое оборудование и программное обеспечение стремительно развиваются, что, в свою очередь, вызывает необходимость совершенствования технологий и методик для различного рода выверок при сборке и монтаже изделий авиастроения. В этой связи для осуществления контроля геометрических параметров объектов авиастроения весьма перспективными представляются разработка и внедрение в промышленное производство специальной геодезической координатной основы, применяемой для измерений и последующей проверки геометрических характеристик на соответствие требованиям конструкторской и технологической документации.

В области авиастроения, в силу чрезвычайной востребованности его изделий, эти задачи проявляются наиболее остро. Поэтому разработка и исследование методов построений геодезических сетей специального назначения (ГССН)

с использованием современного специализированного геодезического оборудования для контроля геометрических параметров при сборке и монтаже элементов конструкций летательных аппаратов с требуемой точностью является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Разработкой методов, средств и методик производства высокоточных инженерно-геодезических измерений занимались такие ученые в области прикладной геодезии, как Асташенков Г. Г., Афонин Д. А., Брынь М. Я., Васютинский И. Ю., Вшивкова О. В., Зубов А. В., Карпик А. П., Корнилов Ю. Н., Костеша В. А., Кузин А. А., Левчук Г. П., Мустафин М. Г., Петров В. В., Пимшин Ю. И., Пискунов М. Е., Полянский А. В., Потюхляев В. Г., Уставич Г. А., Шоломицкий А. А., Ямбаев Х. К. и многие другие.

Однако, несмотря на выполненные фундаментальные исследования, в области авиастроения в силу особой специфики отрасли все еще остаются нерешенными многочисленные научно-технические вопросы, связанные с обеспечением повышенной мобильности и точности геодезического контроля геометрических параметров конструктивных элементов летательных аппаратов в условиях развивающегося процесса их производства.

Целью исследования является повышение эффективности производства геодезического контроля геометрических параметров конструкций летательных аппаратов при их сборке, эксплуатации и реконструкции путем разработки и создания прецизионной координатной системы на базе современных геодезических приборов и программного обеспечения.

Основные задачи исследования:

1 Выполнить информационно-аналитический обзор существующих научно-технических разработок по геодезическому контролю геометрических параметров объектов авиастроения.

2 Провести анализ конструктивных элементов сборочных приспособлений и летательных аппаратов с целью их классифицирования по геометрическим и точностным характеристикам в соответствии с нормативной документацией.

3 Разработать технологические схемы построения геодезических сетей специального назначения с применением прецизионного геодезического оборудования для геодезического контроля геометрических параметров элементов конструкций летательных аппаратов.

4 Провести экспериментальные исследования и разработать программный алгоритм по учету температуры при выполнении геодезических измерений для контроля геометрических параметров в промышленных условиях.

5 Предложить систему практических рекомендаций по геодезическому контролю геометрических параметров конструктивных элементов при монтаже сборочных приспособлений, сборке и эксплуатационном обслуживании летательных аппаратов.

Объектом научного исследования являются методы, технические средства и технологии геодезического обеспечения монтажа, юстировки и эксплуатации технологического оборудования применительно к объектам авиастроения.

Предмет исследования – совокупность и последовательность технологических операций, используемых при контроле геометрических параметров летательных аппаратов и сборочных приспособлений.

Научная новизна диссертационных исследований заключается в следующем:

1 Предложена классификация геодезических сетей специального назначения, исходя из требуемой точности к координатному определению элементов технологического оборудования, используемого при сборке летательных аппаратов, и контролю их геометрических параметров.

2 Получена зависимость средней квадратической ошибки положения станций наблюдений от конфигурации схемы геодезической сети специального назначения, создаваемой в условиях промышленного цеха авиастроительного предприятия.

3 Выявлена зависимость влияния температуры на точность выполнения геодезических измерений при контроле геометрических параметров в процессе монтажа элементов конструкций и сборки летательных аппаратов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в предложенной классификации и обосновании схемы построения геодезической сети специального назначения, исходя из требуемой точности координатного определения элементов технологического оборудования, используемого для контроля геометрических параметров конструкций летательных аппаратов в процессе их сборки.

Практическая значимость заключается в разработанной системе практических рекомендаций, позволяющих сотрудникам соответствующих служб и организаций выполнять геодезический контроль геометрических параметров элементов конструкций летательных аппаратов с требуемой точностью, что обеспечивает их качественную сборку и последующую надежную эксплуатацию.

Методология и методы исследования. Методология исследований заключается в обосновании и разработке технологических схем процесса наблюдений при геодезическом контроле геометрических параметров элементов конструкций летательных аппаратов, обеспечивающих требуемую точность измерений. При этом использовались следующие методы: моделирования, включающий построение и расчет положения пунктов построенной геодезической сети специального назначения; геодезических измерений, выполняемых высокоточными приборами (электронными тахеометрами); метод наименьших квадратов для математической обработки результатов измерений.

Положения, выносимые на защиту:

1 Предлагаемая в соответствии с разработанной классификацией схема построения геодезической сети специального назначения с применением прецизионных геодезических приборов, включающая избыточные пункты для учета меняющейся производственной обстановки, позволяет обеспечить геодезический контроль геометрических параметров сборочных приспособлений и летательных аппаратов с заданной точностью.

2 Разработанный алгоритм учета температуры элементов конструкций, основанный на статистических данных о положении пунктов при различных ее зна-

чениях, позволяет эффективно использовать разработанные схемы геодезических сетей специального назначения во всем спектре температурных режимов промышленного предприятия.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует областям исследования: 5 – Разработка новых принципов, методов, технических средств и технологий геодезических измерений для определения геометрических и физических параметров Земли, ее поверхности, объектов, явлений и процессов на ней, в том числе для производства наземных топографических съемок; 11 – Методы, технические средства и технологии геодезического обеспечения строительно-монтажных, кадастровых, землеустроительных, проектно-изыскательских, маркшейдерских, геолого-разведочных и лесоустроительных работ; освоения шельфа; монтажа, юстировки и эксплуатации технологического оборудования и других прикладных задач; 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 паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Исследования выполнены на сертифицированных приборах и оборудовании. Методики, используемые в выполнении измерений, нашли широкое применение в геодезической практике. Результаты исследований прошли испытания в лабораторных и промышленных условиях, обладают свойством релевантности относительно данных, полученных различными исследователями в других условиях. Основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на III Всероссийской научно-практической конференции «Геодезия, Картография, Геоинформатика

и Кадастры. Наука и образование (2019 год), Научной конференции студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (2021 год), XVIII Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (2021 год), Научной конференции студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (2022 год), XIX Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (2022 год).

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 6 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, и 2 публикации – в журналах, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 153 страницы машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 142 наименования, содержит 22 таблицы и 86 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первом разделе рассматриваются принципы геодезического контроля геометрических параметров летательных аппаратов. Приводятся способы, методы и приборы, используемые в настоящее время для выполнения геодезических измерений. Рассматриваются существующие научно-технические разработки в области контроля геометрических параметров изделий авиастроения.

На основании проведенного анализа обоснована необходимость совершенствования методов контроля геометрических параметров посредством разработки технологических схем построения геодезических сетей специального назначения. В качестве измерительного оборудования предлагается использование абсолютных лазерных трекеров, прецизионных роботизированных тахеометров и вспомогательной оснастки. Сформулированы цель и основные научно-технические задачи исследования.

Во втором разделе разработана схема построения геодезической сети специального назначения, предназначенной для оценки и контроля геометрических параметров изделий авиастроения в условиях производственного помещения.

В результате выполненных исследований установлено, что допустимые отклонения от проектных значений различны в зависимости от типа конструктивного элемента. Так, например, отклонения от теоретических обводов для фюзеляжа летательного аппарата не должны превышать $\pm 2,0$ мм, а для крыла $\pm 1,0$ мм. Поэтому в зависимости от типа технологического оснащения, используемого при сборке, а затем и контроле геометрических параметров летательных аппаратов, предлагается выполнить классификацию ГССН, которая обеспечит выполнение этих технологических операций с требуемой точностью в созданном координатном пространстве.

Предлагаемая классификация приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация геодезических сетей специального назначения в зависимости от требований к координатному определению положения точек контролируемого изделия

Классификация ГССН	Высокоточная	Точная	Техническая
Допуск на предельное отклонение фактической геометрии изделия авиастроения от проектных значений	до $\pm 1,00$ мм	от $\pm 1,00$ мм до $\pm 2,00$ мм	от $\pm 2,00$ мм
СКО определения положения контролируемой точки	до 0,33 мм	до 0,67 мм	от 0,67 мм
Контролируемое изделие авиастроения	Малогабаритное сборочное приспособление	Крупногабаритное сборочное приспособление	Летательный аппарат

При создании геодезических сетей специального назначения в условиях действующего промышленного цеха важным аспектом является способ закрепления пунктов сети на соответствующем технологическом оснащении. Для этой цели возможно использовать:

- 1) SCRT-отражатели;
- 2) пункты, предназначенные для установки сферических отражателей;
- 3) пункты, закрепленные в виде кернов и рисков;
- 4) светоотражающие марки.

SCRT-отражатель – отражатель, встроенный в раму сборочного приспособления.

Пункты, предназначенные для установки сферических отражателей, можно разделить на две группы:

- 1) накладные;
- 2) углубленные.

К первым можно отнести подставки фирмы Brunson, неодимовые магниты, стальные шайбы с отверстием. Ко второй группе относятся конические и цилиндрические отверстия, обеспечивающие единообразную установку сферического отражателя.

Координаты пунктов, закрепленных в виде кернов и рисков, восстанавливаются различными способами в зависимости от типа поверхности, где находится керн. Если поверхность является плоскостью, то можно использовать специальную оснастку, если поверхность криволинейная, координаты центра керна можно определить с использованием щупов, а также различных жезлов скрытых точек.

Для выполнения измерений с использованием прецизионного роботизированного тахеометра возможно использование светоотражающих марок.

При выборе типа пунктов для закрепления ГССН соответствующего класса точности предлагается руководствоваться двумя основными критери-

ями: стабильностью основания, где закреплена точка с известными координатами, и единообразием центрирования визирной цели. Для оценки стабильности центрирования предполагается, что положение пункта остается неизменным. В связи с этим для обоснованного выбора метода закрепления пунктов ГССН каждого класса точности необходимо определить величину погрешностей, возникающих при центрировании визирных целей. Данная задача была решена путем выполнения серии измерений на вышеуказанные типы пунктов и последующим вычислением СКО центрирования визирной цели. Результаты выполненных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Средняя квадратическая ошибка центрирования визирной цели на различных типах пунктов

Тип пункта	СКО центрирования визирной цели, мм
1 Цилиндрическое отверстие	0,02
2 Стальная шайба	0,02
3 Неодимовый магнит	0,03
4 Пункт фирмы Brunson	0,01
5 Пункт в виде керна	0,05

Согласно полученным результатам сделаны следующие выводы.

1 Геодезические сети специального назначения технического класса точности следует закреплять пунктами, предназначенными для установки сферических отражателей первой группы (накладные), светоотражающими марками, пунктами, закрепленными в виде кернов и рисков.

2 Точные геодезические сети специального назначения следует закреплять отражателями типа «SCRT», пунктами, предназначенными для установки сферических отражателей первой и второй группы, пунктами, закрепленными в виде кернов и рисков.

3 Высокоточные сети специального назначения следует закреплять пунктами, предназначенными для установки сферических отражателей преимущественно второй группы. В случаях, если габаритные размеры позволяют закрепить на поверхности оснастки пункт первой группы, это является допустимым.

В результате анализа условий в действующем промышленном цехе, расположения необходимого для сборки технологического оборудования и конструктивных особенностей контролируемых летательных аппаратов была разработана следующая технологическая схема построения ГССН:

1 Определение мест закрепления пунктов (ers001, ers002, ers003, ers004), которые создают координатное пространство, используемое как при монтаже и выверке сборочных приспособлений, так и при сборке летательного аппарата, с условием обеспечения избыточности количества точек с известными координатами.

2 Выполнение геодезических измерений с использованием геодезического оборудования с произвольных (незакрепленных) станций (inst001, inst002, inst003, inst004) на закрепленные пункты ГССН (ers001, ers002, ers003, ers004).

3 Выбор первой станции для наблюдений (inst1) осуществляется, исходя из условия минимума отклонений расстояний от этой станции до каждого из пунктов ГССН.

4 Остальные станции (inst2, inst3, inst4) располагаются по контуру пунктов ГССН, что необходимо для получения избыточных измерений и последующего уравнивания сети как свободной для определения координат пунктов с требуемой точностью.

Предлагаемый пример схемы построения ГССН представлен на рисунке 2.

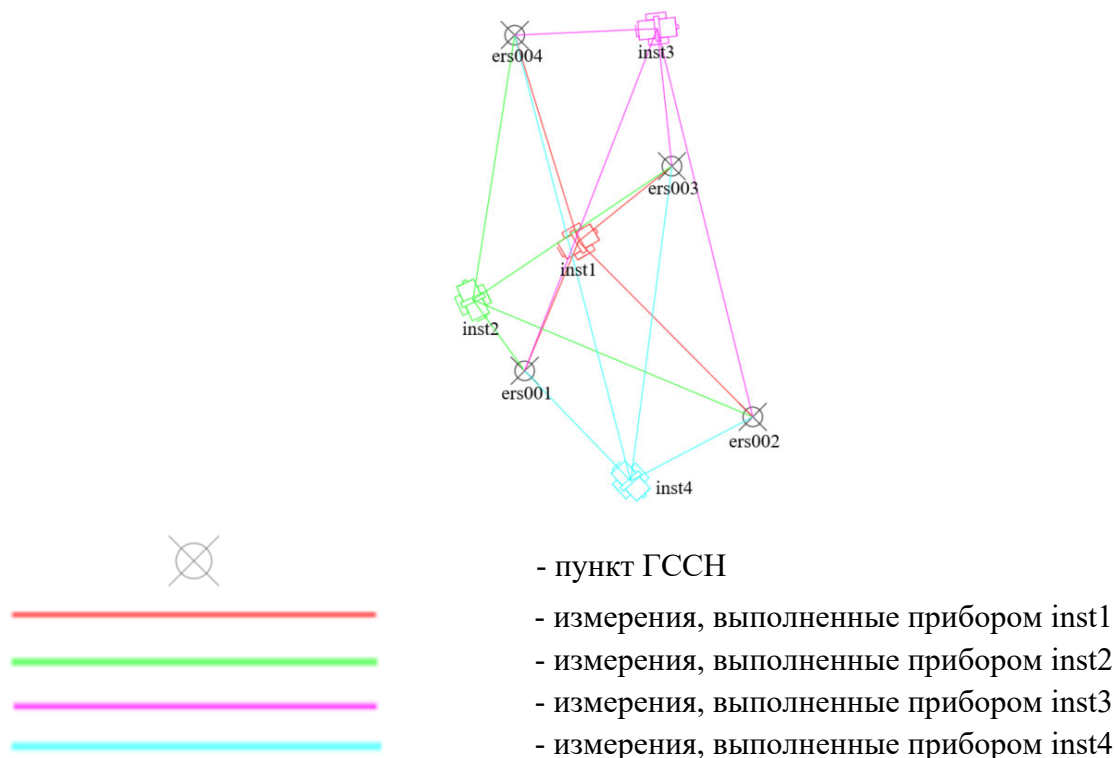


Рисунок 2 – Пример схемы построения ГССН

Уравнивание результатов измерений и оценка точности определения координат пунктов ГССН выполнены с использованием программного обеспечения Spatial Analyzer. Для определения оптимальной схемы построения в зависимости от числа избыточных измерений были выполнены исследования, результаты которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость точности определения пунктов от числа избыточных измерений

Станция наблюдений, включенная в уравнивание	Пункты ГССН	СКО положения пункта, мм
Комбинация № 1		
inst1 + inst2	ers001	0,11
	ers002	0,07
	ers003	0,15
	ers004	0,10
Комбинация № 2		
inst2 + inst3 + inst4	ers001	0,14
	ers002	0,17
	ers003	0,15
	ers004	0,11

Окончание таблицы 3

Станция наблюдений, включенная в уравнивание	Пункты ГССН	СКО положения пункта, мм
Комбинация № 3		
inst1 + inst2 + inst3 + inst4	ers001	0,07
	ers002	0,10
	ers003	0,12
	ers004	0,10

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы по оптимизации выбора положения станций при создании ГССН.

1. Рассмотренные схемы построения ГССН обеспечивают необходимую точность определения координат пунктов, обусловленную требованиями к созданию координатного пространства для контроля геометрических параметров изделий авиастроения (при монтаже и выверке сборочных приспособлений и в процессе сборки летательных аппаратов).

2. Несоблюдение условия выбора положения первой станции наблюдений (минимум отклонений расстояний от станции до каждого из пунктов ГССН) обуславливает наиболее низкую точность определения координат пунктов.

3. При выполнении поставленного условия максимальное число избыточных измерений приводит к повышению точности определения координат примерно в два раза (сравнение комбинации № 3 и комбинации № 2).

В процессе авиастроительного производства, включающего монтаж и выверку сборочных приспособлений, изготовление конструктивных элементов воздушного судна, финальную сборку планера и окончательную сборку летательного аппарата, видимость пунктов ГССН постоянно изменяется вследствие установки и демонтажа различных деталей. Данная особенность затрудняет точное нормативное определение необходимого количества пунктов ГССН, а также выбор конкретных мест их закрепления. Динамические изменения производственных условий, влияющие на видимость, а также сложные формы объектов и их конфигурации могут быть учтены при проектировании геодезической сети специального назначения.

Для решения данной задачи разработан алгоритм, позволяющий минимизировать погрешность определения положения измерительного оборудования, зависящую от конфигурации геодезической сети специального назначения. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 3.

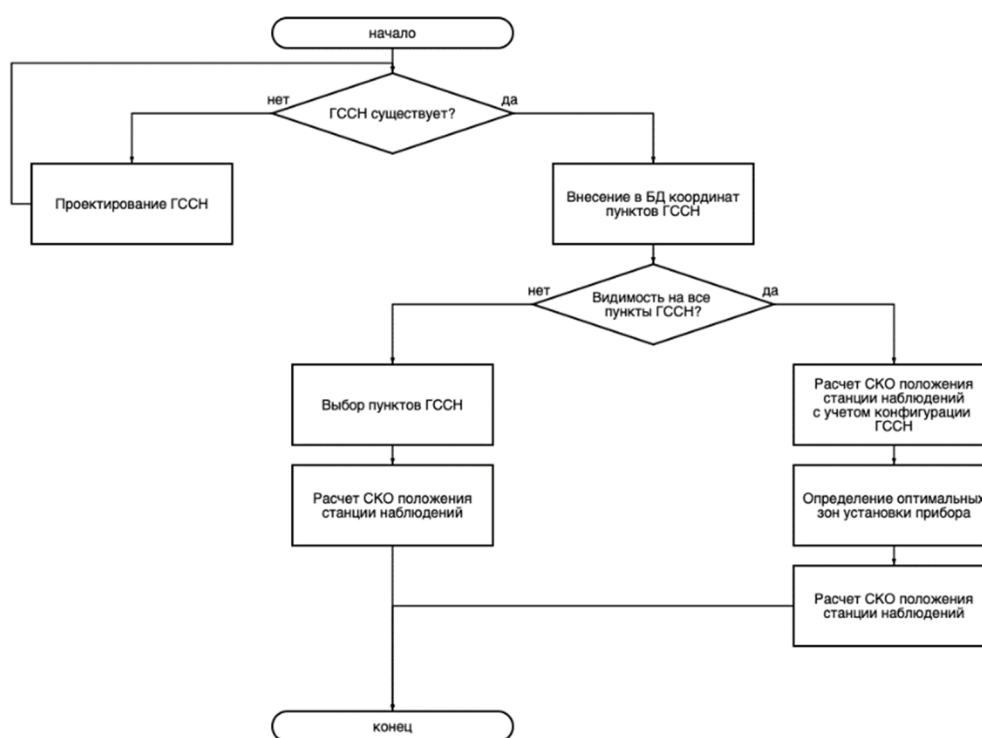


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма

Разработанный алгоритм обеспечивает выполнение ключевых задач, необходимых для организации прецизионного контроля геометрических параметров объектов авиастроения.

1 Проектирование геодезической сети специального назначения в условиях производственного цеха с целью обеспечения высокоточного позиционирования измерительного оборудования относительно контролируемого объекта. В данном случае сеть создается с учетом требований к точности измерений и пространственным ограничениям.

2 Определение наиболее оптимальных зон установки геодезического оборудования в условиях существующей ГССН. Алгоритм позволяет выполнить градацию величины ошибки определения положения станции наблюдений. Помимо

этого, осуществляется расчет априорных СКО при выходе за границы каждой зоны (зеленой, желтой, красной).

3 Оптимизация выбора пунктов ГССН в условиях ограниченной видимости. Алгоритм позволяет выполнить расчет СКО определения положения станции наблюдений, на основании которого возможно корректирование программы выполняемых измерений.

В третьем разделе выполнены исследования, позволяющие учесть непостоянство температурного режима при выполнении высокоточных геодезических измерений в процессе монтажных и сборочных работ.

При выполнении натурных измерений для обеспечения монтажа и выверки сборочных приспособлений было установлено, что пространственное положение пунктов ГССН зависит от температурного режима. Смещение пунктов ГССН обусловлено тепловыми деформациями оснований, на которых они закреплены. Известно, что температурный режим в производственных помещениях нестабилен и изменяется как в суточном цикле, так и в зависимости от времени года. Амплитуда температурных колебаний может достигать 30 °С, что приводит к смещению пунктов ГССН на несколько миллиметров. Данные деформации, в свою очередь, увеличивают ошибку определения положения измерительного прибора, что недопустимо при прецизионном контроле геометрических параметров объектов авиастроения.

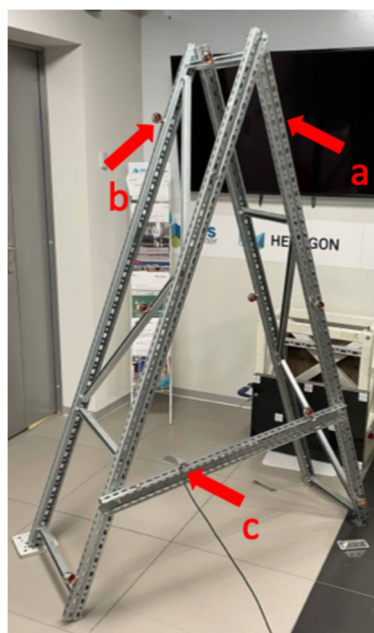
Выявленные смещения на объекте характеризовались разнонаправленностью и отличной друг от друга скоростью деформаций.

Одним из основных требований, предъявляемых к пунктам геодезической сети, является стабильность их положения. По причине нарушения данного условия при изменении температурного режима необходимо выполнение повторного цикла координирования всех пунктов геодезической сети специального назначения, включающее в себя полевые работы, обработку результатов наблюдений и их уравнивание. Описанный процесс требует значительных временных затрат, что снижает экономическую и производственную эффективность. Это, в свою очередь, увеличивает стоимость изделия и удлиняет его производственный цикл.

На основании данных, представленных в рассмотренных источниках литературы, а также результатов полевых наблюдений было установлено, что деформационные процессы имеют циклический характер, зависящий от температуры. Было выдвинуто предположение о том, что пространственное положение пунктов ГССН зависит не только от температурного режима, но и от физических характеристик поверхности, на которой они расположены. Для учета температурной деформации, установления закономерностей их возникновения и введения корректирующих поправок необходимо учитывать смещения каждого пункта сети отдельно, а не всего объекта в целом.

В рамках решения данной задачи автором проведено экспериментальное исследование в лабораторных условиях, направленное на оценку деформаций пунктов геодезической сети специального назначения ГССН, закрепленных на металлической конструкции (рисунок 4).

В ходе эксперимента на тест-объект было установлено восемь пунктов геодезической сети специального назначения в виде сферических отражателей, а также термощуп для мониторинга температуры исследуемой конструкции (рисунок 4).



а – тест-объект; b – пункты ГССН; с – термощуп

Рисунок 4 – Исследуемый объект

Опорная сеть, устойчивая к температурным воздействиям, была закреплена с использованием анкерных креплений в стенах лаборатории, на которых размещены отражатели.

В ходе эксперимента температуру в лабораторном помещении изменяли в диапазоне от 24,8 °С (1-й цикл измерений) до 3,9 °С (9-й цикл измерений), а затем от 3,9 °С (9-й цикл измерений) до 23,1 °С (33-й цикл измерений).

При минимальной температуре объекта (9-й цикл) были зафиксированы следующие смещения координат пунктов ГССН: вдоль оси X они варьировались от $-0,24$ мм (пункт 7) до $+0,18$ мм (пункты 3, 8); вдоль оси Y – от $-0,16$ мм (пункт 8) до $+0,11$ мм (пункты 2, 4); вдоль оси Z – от $+0,10$ мм (пункт 4) до $+0,53$ мм (пункт 1).

При последующем повышении температуры до значений, близких к исходным (33-й цикл), наблюдались смещения, которые не превышали 0,08 мм во всех направлениях.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

1 Деформации пунктов геодезической сети специального назначения при изменении температуры происходят с разной скоростью и разнонаправленно. В этой связи невозможно использовать какой-либо общий температурный коэффициент учета деформаций пунктов для всей сети.

2 Выявленная закономерность, заключающаяся в соответствии между определенной температурой и положением пунктов сети, дает возможность разработать алгоритм формирования базы данных, содержащей информацию о диапазонах смещений пунктов при различных температурных режимах.

С целью повышения точности контроля геометрических параметров объектов авиастроения была разработана программа, алгоритм которой позволяет учитывать смещения, связанные с изменением температурного режима. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма учета температурных деформаций

Разработанный алгоритм был протестирован на объектах авиастроения. Исходя из полученных результатов промышленного эксперимента, можно сделать вывод о том, что предлагаемая методика позволяет повысить точность определения положения станции наблюдений за счет учета температурного смещения более чем в четыре раза при изменении температуры на 22 °С.

В четвертом разделе представлена разработка практических рекомендаций по контролю геометрических параметров изделий авиастроения: сборочных приспособлений и элементов конструкций летательных аппаратов.

На основе выполненных исследований были разработаны критерии выбора применяемого оборудования, учитывающие требуемую точность геодезических работ, измерительный объем, мобильность комплекса и типы измеряемых поверхностей. Обобщенные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Обобщенные критерии выбора оборудования для контроля геометрических параметров изделий авиастроения

Прибор Критерий	Лазерный трекер	Прецизионный роботизированный тахеометр
Категория объекта (зависящая от допустимых отклонений от проектной формы)		
Высокоточный	+	
Точный	+	+
Технический	+	+
Измерительный диапазон менее 160 м	+	+
Измерительный диапазон более 160 м	-	+
Мобильность	Менее мобилен по следующим причинам. 1 Комплект оборудования, включающий контроллер, ноутбук. 2 Большой вес оборудования и большие габариты кейса для транспортировки	Более мобилен
Необходимость дополнительных устройств	Для выполнения измерений необходимо подключение к персональному компьютеру	Есть возможность обработки результатов измерений непосредственно в самом приборе
Класс пыле- влаго-защиты	Менее защищен	Более защищен
Типы поверхностей для измерений	Отражатель	Отражатель, отражательная пленка, любая поверхность

В соответствии с вышепредложенными алгоритмами разработана типизированная схема геодезических работ, применяемая для монтажа и выверки сборочного приспособления, предназначенного для производства крупных элементов летательного аппарата, включающая создание и развитие ГССН, выбор плотности пунктов и способов их закрепления, а также описание методики производства контрольных измерений.

Для определения положения контрольных точек (кернов) летательного аппарата разработана типизированная схема геодезических работ. При этом координаты керна определяются двумя методами, один из которых основан на применении прецизионного роботизированного тахеометра и вспомогательных марок (рисунок 6, а), а второй предполагает использование лазерного трекера в сочетании с жезлом скрытых точек (рисунок 6, б). Разработаны алгоритмы для решения данной задачи. Блок-схема алгоритма определения координат контролируемой точки (керна) на поверхности летательного аппарата с использованием

тахеометров и вспомогательных марок представлена на рисунке 7, а, а с применением жезла скрытых точек — на рисунке 7, б.

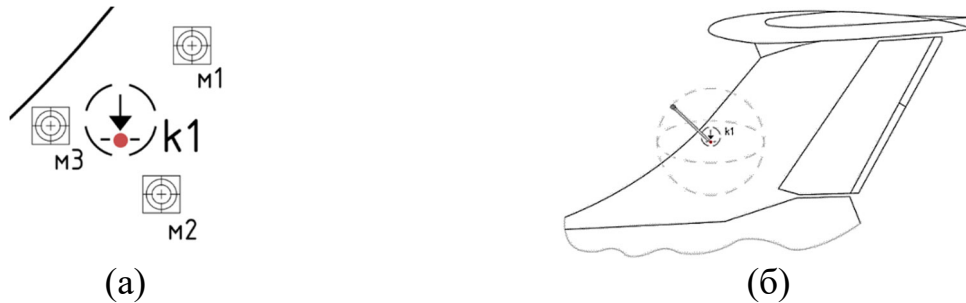


Рисунок 6 – Методы определения положения контрольных точек ЛА

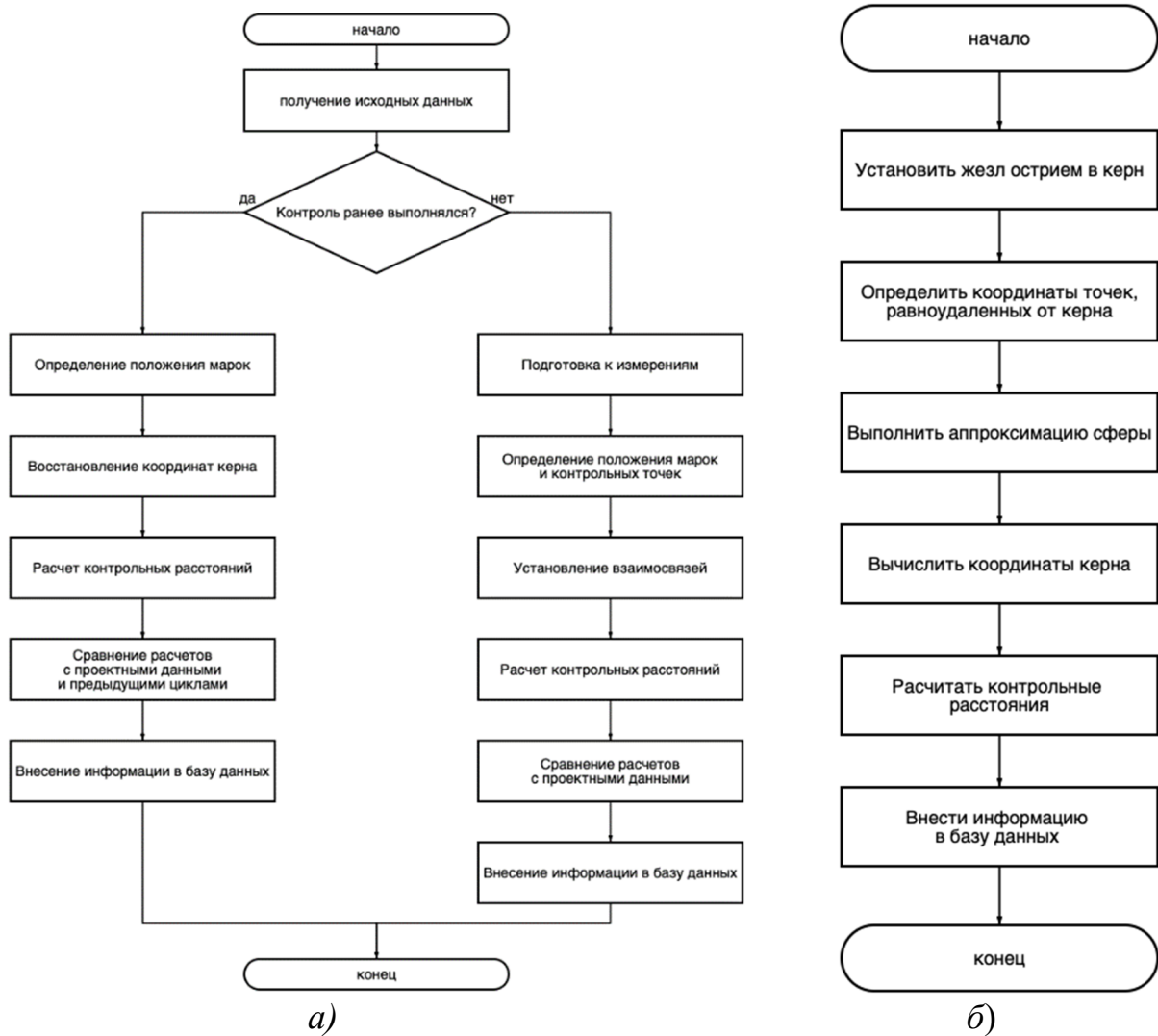


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма определения положения контрольных точек самолета: а) на основе сформированных взаимосвязей;
б) с использованием жезла скрытых точек

Первый метод (см. рисунок 7, *а*) позволяет выполнять бесконтактные измерения для определения координат контрольных точек летательного аппарата, таких как k_1 (см. рисунок 6, *а*), на основе предварительно установленных геометрических взаимосвязей, сформированных между керном k_1 и светоотражающими марками m_1, m_2, m_3 в ходе первичного цикла наблюдений.

Применение жезла скрытых точек обеспечивает возможность определения пространственного положения керна, находящегося вне зоны прямой видимости, путем проведения дополнительных геометрических построений (см. рисунок 6, *б*) и последующего вычисления его пространственных координат.

Предложенные рекомендации по выполнению нивелирования самолета были реализованы на натурных объектах. При этом было обеспечено соответствие требованиям нормативной точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований решена актуальная задача разработки специализированной прецизионной координатной системы с использованием современного геодезического оборудования и программного обеспечения для контроля геометрических параметров летательных аппаратов, имеющая важное значение в области авиастроения.

Основные результаты и выводы состоят в следующем:

1. Выполнен информационно-аналитический обзор существующих научно-технических разработок по геодезическому обеспечению контроля геометрических параметров объектов авиастроения, в результате которого обоснована актуальность и востребованность выполнения исследований по этому направлению, сформулирована цель и основные научно-технические задачи для ее реализации.

2. Проведены исследования по определению точности закрепления пунктов геодезических сетей специального назначения и позиционирования геодезического оборудования при различных конфигурациях сети. В рамках исследований

разработана классификация ГССН в зависимости от требований к точности определения геометрических параметров изделий авиастроения; определены требования к размещению станций наблюдений и числу избыточных измерений, которые обеспечивают наивысшую точность определения координат пунктов; установлено, что рекомендуемая схема построения ГССН при использовании прецизионных геодезических приборов обеспечивает заданную точность создания координатного пространства в условиях промышленного цеха.

3. Разработан программный алгоритм по учету температуры, позволяющий вносить корректирующие температурные поправки в результаты геодезических измерений, что обуславливает повышение точности определения координат станций наблюдений в среднем в два раза при изменении температуры на 10 °С.

4. Разработанные схемы геодезических работ послужили основой для составления системы практических рекомендаций, позволяющих выполнять контроль геометрических параметров летательных аппаратов с требуемой точностью.

Результаты исследований имеют практическую направленность и рекомендованы к использованию в учебном процессе по геодезическим специальностям, на предприятиях авиационной промышленности при производстве инженерно-геодезических измерений для определения геометрических параметров изделий авиастроения, а также в научно-исследовательских организациях для развития существующих методик контроля.

Перспективы дальнейших исследований открываются в двух направлениях. Первое заключается в большей детализации и разнообразии элементов контроля, что предопределяет широкое использование модельного подхода с построением трехмерной компьютерной модели воздушного судна. Второе – это унификация методов контроля геометрических параметров, связанная с их систематизацией и вовлечением передового опыта разных отраслей производства, в том числе в машиностроении, строительстве зданий и сооружений, промышленной геодезии и др.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Палкин, П. О. Выверка промышленного оборудования и крупногабаритных изделий в машиностроительной отрасли с использованием роботизированных высокоточных тахеометров на примере летательных аппаратов / П. О. Палкин, С. Г. Гетманский. – Текст : непосредственный // Маркшейдерский вестник. – 2024. – № 3 (153). – С. 15–22.

2 Палкин, П. О. Проектирование локальной геодезической сети для контроля геометрических параметров объектов авиастроительной отрасли / П. О. Палкин, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 27–36. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-27-36.

3 Kuzin, A. A. Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks / A. A. Kuzin, P. O. Palkin. – Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1728. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1728/1/012010>.

4 Kuzin, A. A. Using high accuracy geodetic measurements to fix the main bases of the ship in shipbuilding and ship-repairing / A. A. Kuzin, P. O. Palkin. – Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1728. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1728/1/012015>.

5 Палкин, П. О. Геодезическое обеспечение работ в судостроении и судоремонте / П. О. Палкин. Текст : непосредственный // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование : сб. материалов III Всероссийской науч.-практ. конф. 06–08 ноября 2019 г., Санкт-Петербург. – 2019. – С. 134–138.

6 Палкин, П. О. Применение геодезических методов для размерного контроля при проведении работ в авиационной отрасли с использованием лазерных трекеров / П. О. Палкин, С. Г. Гетманский. – Текст : непосредственный // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование : сб. материалов IV Всероссийской науч.-практ. конф. 2021 г., Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург : Политехника, 2021. – С. 161–166.