

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

На правах рукописи

Палкин Павел Олегович



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

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Мустафин Мурат Газизович

Новосибирск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	10
1.1 Общие сведения об авиастроительной отрасли.....	10
1.2 Негативные последствия несоответствия геометрических параметров элементов при производстве летательного аппарата его эксплуатации и реконструкции	14
1.3 Производство летательных аппаратов.....	17
1.3.1 Сборочные приспособления	19
1.3.2 Сборка летательного аппарата.....	24
1.4 Реконструкция, переоснащение и перевооружение летательных аппаратов	27
1.5 Применяемые методы контроля геометрических параметров.....	29
1.5.1 Монтаж и юстировка сборочных приспособлений	29
1.5.2 Сборка летательного аппарата и регламентные технические работы.....	35
1.5.3 Нивелирование самолета с использованием лазерной центрирующей измерительной системы	37
1.5.4 Нивелирование самолета с использованием оптических приборов.....	39
1.5.5 Нивелирование самолета с использованием лазерных трекеров.....	41
1.5.6 Сборка летательного аппарата, монтаж и юстировка сборочных приспособлений, выполняемые с использованием современного геодезического оборудования.....	42
1.6 Существующие разработки в области контроля геометрических параметров.....	47
1.7 Предпосылки (обоснования) к совершенствованию методики контроля геометрических параметров.....	56
1.8 Выводы по разделу 1	59
2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	61
2.1 Классификация геодезических сетей специального назначения	61
2.2 Проектирование геодезической сети специального назначения	68

2.1.1	Типы пунктов геодезических сетей специального назначения.....	69
2.1.2	Определение СКО центрирования визирной цели. Классификация и закрепление пунктов ГССН	70
2.3	Построение геодезической сети специального назначения	76
2.4	Выбор местоположения станции наблюдений	80
2.5	Выводы по разделу 2	85
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО АЛГОРИТМА ПО УЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ	87
3.1	Постановка эксперимента	87
3.2	Проведение экспериментальных исследований	90
3.3	Разработка алгоритма учета температурных деформаций	110
3.4	Проверка разработанного алгоритма в натуральных условиях.....	113
3.5	Выводы по разделу 3	114
4	РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ АВИАСТРОЕНИЯ	116
4.1	Критерии выбора геодезического оборудования.....	116
4.2	Разработка типизированных схем геодезических работ для контроля геометрических параметров объектов авиастроения.....	120
4.2.1	Схема, применяемая для монтажа и выверки сборочного приспособления, предназначенного для производства крупных элементов летательного аппарата (объект точной категории).....	120
4.2.1.1	Создание и развитие геодезической сети специального назначения	122
4.2.1.2	Выполнение измерений.....	123
4.2.2	Схема, применяемая для определения положения контрольных точек летательного аппарата (объект технической категории)	125
4.2.2.1	Определение координат керна с использованием роботизированного тахеометра	127
4.2.2.2	Определение координат керна с использованием лазерного трекера	131
4.3	Выводы по разделу 4	134
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	137

ВВЕДЕНИЕ

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 кон-

троля 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 значениях, 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 принци-

пов, 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 строительного-монтажных, кадастровых, землеустроительных, проектно-исследовательских, 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 Междуна-

родном 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.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

1.1 Общие сведения об авиастроительной отрасли

Авиационная промышленность является одной из наиболее наукоемких отраслей машиностроения с высокой удельной стоимостью продукции, где исследуются, разрабатываются и серийно выпускаются военные и гражданские самолеты, вертолеты, авиакосмические системы, авиационные двигатели и бортовые системы. В России первые авиационные заводы появились в начале XX в. в период с 1910 по 1912 г., а к концу 1917 г. в стране насчитывалось 34 авиапредприятия [77]. В довоенные годы в СССР активно создавались новые заводы и конструкторские бюро, а также реконструировались старые, что позволило резко повысить мощности и качество самолетостроения в нашей стране. К началу Великой Отечественной войны в производство были запущены истребители МиГ-1, МиГ-3, Як-1, ЛаГГ-3, штурмовик Ил-2, бомбардировщик Пе-2. В годы Великой Отечественной войны были разработаны новые типы боевых самолетов, а по окончании было реализовано перевооружение боевой авиации реактивными самолетами, и появились многоцелевые фронтовые истребители, стратегические бомбардировщики, тяжелые военно-транспортные самолеты. Также в XX в. активно развивалась гражданская авиация и появилась отечественная школа вертолетостроения.

Необходимо отметить, что каждый исторический период в авиастроительной отрасли характеризуется появлением принципиально новых типов и моделей летательных аппаратов (ЛА). Развитие авиастроительной отрасли обуславливается множеством факторов, среди которых, прежде всего, следует выделить:

- технологические;
- научные;
- экономические;
- социальные;
- политические.

Технологический процесс позволил перевести авиастроительную отрасль на новые мощности и обеспечил возможность повышения качества при производстве летательных аппаратов. Это обусловлено появлением новых материалов, совершенствованием существующих и созданием новых способов соединения частей самолета, производством более мощных и экономичных двигателей, улучшением аэродинамических характеристик планеров. Каждый из этих аспектов способствовал созданию более безопасных и эффективных самолетов.

Например, при производстве летательных аппаратов применение алюминия и титана позволяет достигать малого веса конструкции, высокой прочности и устойчивости компонентов при применении их в высокотемпературных условиях. Однако разрабатываемые новые сплавы позволяют создавать более прочные и устойчивые к перегрузкам компоненты.

Многие современные самолеты состоят более чем на 50 % из композитных материалов. Это позволяет уменьшить вес самолета, улучшить топливную экономичность и снизить износ конструкции. Применение армированных полимеров, используемых в строительстве самолетов, повышает прочность конструкции при меньшем ее весе.

Улучшение аэродинамических характеристик летательного аппарата достигается путем оптимизации формы корпуса, крыльев и хвостового оперения. Помимо формы и геометрических характеристик составляющих элементов планера, важную роль в модификации играет способ соединения компонентов друг с другом.

Развитие данных аспектов, которые мы назвали технологическим прогрессом, неизбежно приводит к необходимости использования более точных систем контроля геометрических параметров при производстве летательных аппаратов.

На сегодняшний день среди ведущих авиастроительных предприятий России, которые производят передовые образцы летательных аппаратов, учитывая опыт прошедшего столетия, можно выделить следующие:

- Российская самолетостроительная корпорация «МиГ»;
- авиационный холдинг «Сухой»;

- Авиационный комплекс имени С. В. Ильюшина;
- публичное акционерное общество «Туполев»;
- Московский вертолётный завод имени М. Л. Миля.

Среди зарубежных производителей следует упомянуть:

- Aviation Industry Corporation of China (Китай);
- The Boeing Company (США);
- Airbus (ЕС, Франция);
- Lockheed Martin Corporation (США);
- General Dynamics Corporation (США).

Современный уровень развития авиационной промышленности требует системного подхода к производству, при котором весь комплекс объектов и явлений, связанных с изготовлением изделия, рассматривается как производственная система, в которой реализуется производственный процесс создания изделия.

Составной частью производственного процесса летательных аппаратов является технологический процесс монтажа и выверки (юстировки) сборочных приспособлений (рисунок 1.1), сборки частей самолета (рисунок 1.2) и всего самолета целиком (рисунок 1.3), который выполняется с использованием средств технологического оснащения, включающих в себя в том числе геодезическое оборудование и специальную оснастку.



Рисунок 1.1 – Сборочные приспособления

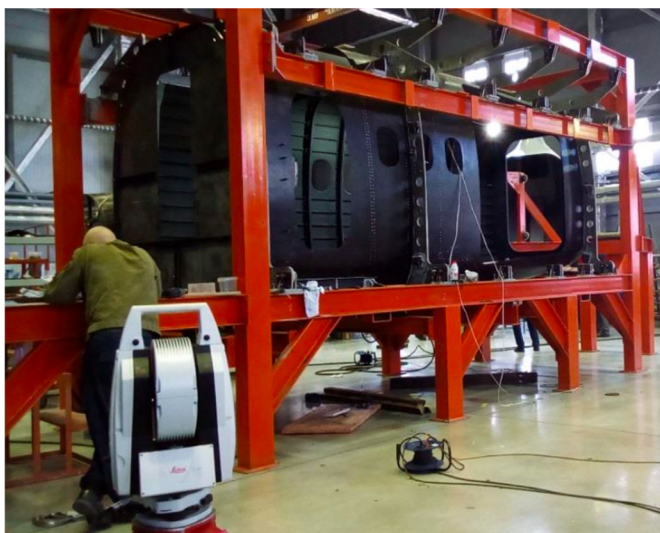


Рисунок 1.2 – Процесс сборки частей самолета



Рисунок 1.3 – Процесс сборки летательного аппарата и контроля его геометрических параметров

Поэтому важнейшей частью производственной системы являются технологическая система, совокупность функционально взаимосвязанных элементов производственной структуры предприятия, средств технологического оснащения производства и исполнителей, выполняющих в регламентированных условиях сборку (производство) изделия в соответствии с требованиями нормативно-технологической документации.

Основным показателем высокого качества сборки планера самолета является точность геометрических размеров и форм; соблюдение проектного положения отдельных элементов как при строительстве самого летательного аппарата, так и при сборке и юстировке сборочных приспособлений, оснастки и стапелей, согласно конструкторской документации [17].

1.2 Негативные последствия несоответствия геометрических параметров элементов при производстве летательного аппарата его эксплуатации и реконструкции

Вопросу соблюдения геометрических параметров при строительстве, реновации, реконструкции и ремонте летательных аппаратов на всех этапах развития авиационной промышленности придавалось большое значение:

- во всем мире существуют конструкторские бюро, основной задачей которых является проектирование надежного и безопасного воздушного судна, обладающего высокими летными характеристиками;
- на каждом производстве есть отделы, отвечающие за корректность выполнения сборки летательного аппарата;
- в аэропортах осуществляется техническое обслуживание воздушных судов.

Однако, несмотря на все предпринятые мероприятия, вследствие нарушения геометрических параметров ЛА возникает снижение летно-технических характеристик, и происходят катастрофы.

Одними из основных причин снижения летно-технических характеристик воздушного судна являются: некорректность углов установки силовых агрегатов и нарушение положения центра тяжести (центровки) воздушных судов.

При установке двигателей необходимо контролировать соответствие их проектному положению для обеспечения правильного направления тяги. Помимо этого, необходимо соблюдать корректное проектное положение гондол двигателей и корректность установки обтекателей [61]. В информационном руководстве Cessna 172S обозначено, что установка обтекателя позволяет увеличить скорость на два узла [22].

Из этого можно сделать вывод о том, что соответствие вышеописанного оборудования проектному положению позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление и, соответственно, увеличить дальность полета путем снижения расхода топлива.

Центр тяжести воздушного судна – это точка балансирования самолета, которая влияет на его устойчивость. Чтобы обеспечить безопасность полета центр тяжести должен находиться в определенных пределах, установленных производителем самолета. Данный параметр оказывает влияние на устойчивость и управляемость летательного аппарата, обеспечивает предсказуемые взлет и посадку. Помимо этого, положение центра тяжести воздушного судна влияет на аэродинамический баланс, при изменении которого происходит снижение крейсерской скорости и увеличение расхода топлива.

Для осуществления целенаправленного безопасного рейсового полета самолет должен быть наделен свойствами балансировки, устойчивости и управляемости.

Продольная балансировка самолета – это уравнивание всех сил и моментов, действующих на самолет в продольной вертикальной плоскости, относительно центра тяжести самолета. Самолет должен обладать продольной (относительно поперечной оси Z), путевой (относительно вертикальной оси Y) и поперечной (относительно продольной оси X) балансировкой. Система координат самолета представлена на рисунке 1.4.

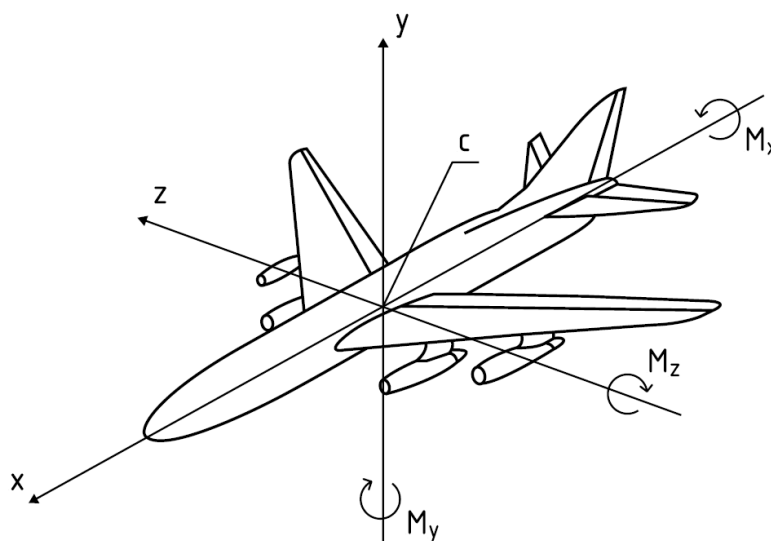


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение системы координат самолета

Продольная устойчивость – это способность самолета сохранять или восстанавливать исходный режим полета после прекращения действия случайных сил.

Продольная управляемость самолета – это способность самолета изменять угол атаки (режим полета) при отклонении руля высоты пилотом.

Центровка зависит от количества и от расположения пассажиров и грузов на борту воздушного судна. Известны случаи, когда изменение или неправильный расчет центровки приводили к катастрофе. Из этого можно сделать вывод, что проектное расположение внутренних компонентов должно строго контролироваться с целью обеспечения безопасности полетов, так как их вес и положение внутри ЛА влияют на дальнейшие расчеты [60].

Основными причинами авиакатастроф можно назвать изменение геометрических параметров воздушного судна во время его эксплуатации или после выполнения ремонтных работ, а также ошибки в калибровке инерциальных навигационных систем [34].

У авиалайнера Boeing 747SR-46 через 12 минут после взлета разрушился хвостовой гермошпангоут. Это привело к нарушению герметичности трубопроводов всех гидросистем самолета, которые вышли из строя, и лайнер потерял управление. Помимо этого, разрушение привело к проникновению воздуха салона в полость киля, который оторвался от фюзеляжа из-за перепада давления.

В ходе расследования было установлено, что 2 июня 1978 г. борт JA8119, заканчивая рейс JAL 115 по маршруту Токио–Осака, ударился хвостовой частью о взлетную полосу аэропорта Осаки, в результате чего был поврежден хвостовой гермошпангоут. В процессе проведения ремонта не были выполнены технические условия, предусмотренные компанией «Boeing». Под воздействием переменных нагрузок во время циклов «взлёт-посадка» металл толщиной 0,9 см в местах сверления постепенно разрушался и в конце концов не выдержал [77].

У авиалайнера Boeing 737-297 через 23 минуты после взлета сорвало значительную часть конструкции фюзеляжа в носовой части, в результате чего люди, находившиеся в салоне самолета, подверглись действию набегающего потока воздуха и кислородному голоданию.

В ходе расследования происшествия с рейсом AQ 243, проводимого Национальным советом по безопасности на транспорте (NTSB), основными причинами были названы:

- коррозия металла;
- плохая эпоксидная связка частей фюзеляжа;
- усталость заклепок;
- повреждения металла фюзеляжа, вызванных по причине множества циклов «взлет-посадка» (самолет совершал лишь короткие рейсы) [24].

Авиалайнер Boeing 747-209В через 25 минут после взлета развалился на части и упал в Тайваньский пролив.

Расследованием причин катастрофы рейса CI 611 проводил Совет по авиационной безопасности (ASC). Согласно отчету, причиной крушения самолета в воздухе стала усталостная трещина на секции № 46 хвостовой части самолета, которая ранее была повреждена во время посадки под большим углом и впоследствии была некачественно отремонтирована [55].

Из-за неисправности инерциальных навигационных систем (как одной из причин нарушений в работе самолета) также происходили авиационные катастрофы: авиалайнер Boeing 737-4Q8, рейс PK-KKW [23].

1.3 Производство летательных аппаратов

Технология производства летательного аппарата – область технологии машиностроения о сущности производства ЛА, о взаимной связи этих процессов и закономерностях их развития. Создание такого сложного изделия, как самолет, представляло бы чрезвычайно трудную задачу, если бы в процессе эскизного и технического проектирования его не делили на законченные в конструктивном и технологическом смысле части.

В самолетостроении ряд причин конструктивного, технологического, эксплуатационного и организационно-экономического характера диктует необходимость деления планера самолета, а, следовательно, и проведения автономных сборочных работ

на отдельных подборках с последующей их стыковкой (рисунок 1.5). Необходим высокий уровень изготовления сборочных единиц и их сборки в единый продукт. Для достижения требуемой точности при изготовлении необходим высокоточный контроль геометрических параметров в течение всего периода производства.

В процессе разработки конструкции сначала производят разделение планера на агрегаты, узлы и соединительные детали, входящие в планер, затем агрегаты делят на отсеки, узлы и соединительные детали, входящие в агрегаты. После этого отсеки делят на узлы и соединительные детали, входящие в отсеки, и, наконец, узлы отсеков, агрегатов и планера – на составляющие их детали. Десятки и сотни сложных пространственных, крупногабаритных, маложестких деталей должны быть расположены в пространстве теоретических обводов изделия, надежно зафиксированы в заданном положении, качественно соединены способом, указанным в конструкторской документации.

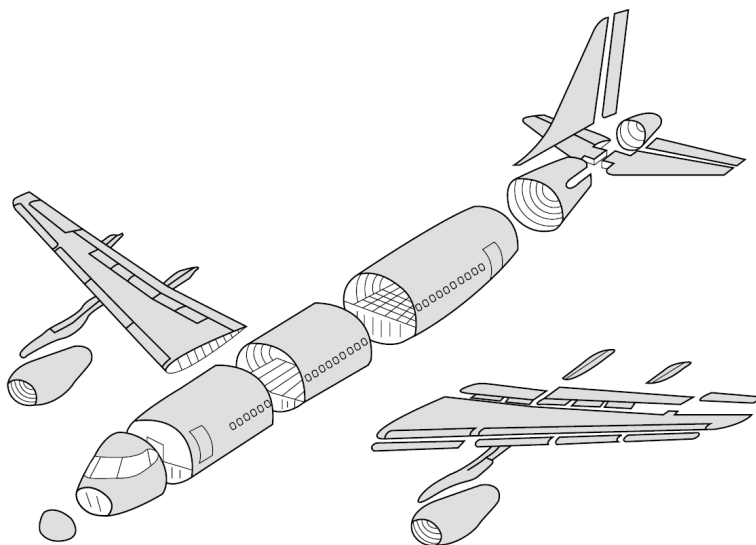


Рисунок 1.5 – Схема членения самолета на отдельные сборочные единицы

Первым процессом, при котором из отдельных деталей формируется узел, панель, агрегат являются сборочные работы. Сборочные работы – это совокупность технологических операций по установке деталей, узлов в сборочное положение и соединение их между собой в вышестоящую по сложности сборочную единицу [14].

Сборочные работы являются важнейшей составной частью производственного процесса предприятия по созданию летательного аппарата.

Сборочные работы многовариантны как по возможному составу и последовательности операций технологического процесса, так и по составу применяемой оснастки, оборудования, инструмента и т. д. Проектирование оптимальных технологических процессов сборки сложных изделий требует трудоёмких вычислений, связанных с выбором схемы сборки, с расчетом точности сборки, с нормированием трудоёмкости и расчётом технологической себестоимости сборки и т. п.

Эффективность решения многих конструктивных и производственных проблем во многом зависит от уровня технического, технологического и организационного развития сборочных производств. Этот уровень определяется, в первую очередь, теми методами сборки, которые закладываются при подготовке производства и используются в серийном производстве новых изделий.

Метод сборки характеризует, как базируются и с помощью каких средств устанавливаются и закрепляются детали друг относительно друга в целях обеспечения их правильного и точного взаимоположения при сборке в собираемом изделии [70]. Для выполнения сборочных работ используются сборочные приспособления (СП) [66].

Важно подчеркнуть, что качество сборки и, как следствие, летно-технические характеристики ЛА определяются не только качеством изготовления отдельных комплектующих деталей, но и применяемыми методами и точностью, с которой был выполнен монтаж СП и выполнялась финальная сборка ЛА.

1.3.1 Сборочные приспособления

Сборочные приспособления – это устройства, обеспечивающие необходимое расположение, фиксацию и соединение сборочных единиц и входящих в них деталей с заданной точностью и требуемой жесткостью собираемой конструкции. Кроме того, сборочное приспособление должно обеспечивать возможность закладки входящих деталей и узлов, выемку готового изделия, безопасные и комфортные условия труда сборщиков.

Применяемые для сборки ЛА СП представляют сложную пространственную конструкцию высокой жесткости — основное технологическое оснащение (ТО) сборочных работ. Повышение требований к точности сборки, необходимости повышения производительности с ростом габаритов и тоннажа машин привели к усложнению СП, превращению их в сложные инженерные сооружения, особенно на агрегатной и общей (окончательной) сборке, что определило их конструктивные особенности и классификацию. Допустимые значения отклонений от проектной документации при монтаже сборочных приспособлений определяются, прежде всего, их функциональным назначением.

Сборочные приспособления принято классифицировать по двум основным признакам:

- технологическому – в зависимости от назначения СП, вида выполняемых соединений и операций, вида сборочной единицы;

- конструктивному – в зависимости от конструктивно-силовой схемы и других конструктивных особенностей: стационарных, неразъемных, поворотных и т. д.

С точки зрения универсальности все СП можно разделить на три категории:

- универсальные (УСП), которые, как правило, невозможно использовать для сборки самолетных конструкций;

- специальные, предназначенные для сборки конкретной сборочной единицы, например, гермокабины, отсека фюзеляжа, лонжерона, окончательной сборки узла или агрегата;

- специализированные (групповые), используемые для сборки однотипных по конструктивно-технологическим признакам сборочных единиц и состоящие из почти полностью стандартизованных элементов. Такие СП широко используются для сборки шпангоутов, нервюр и т. п.

По назначению, в зависимости от выполняемых сборочных работ, различают:

- приспособления для узловой сборки, в которых производят сборку, например, лонжеронов, нервюр, панелей, рулевых поверхностей, средств механизации и т. д.

- приспособления для агрегатной сборки – стапели для сборки крыла, фюзеляжа, оперения и т. п., их отсеков и секций.

Как первая, так и вторая группы (по назначению) СП могут быть:

– операционными, на которых ведется, например, комплектация узла или агрегата, установка входящих деталей и их соединение средствами крепежа, сверление, герметизация, испытания и т. п. Находят применение и целесообразны при серийном и крупносерийном производстве;

– универсальными, где ведется сборка объекта (лонжерона, киля, отсека фюзеляжа и т. п.) от начала до конца. Широко используются при мелкосерийном производстве.

По признаку узкоцелевого назначения [71], что определяют технические условия (ТУ) на проектирование СП, выделяют:

1 Собственно сборочные приспособления, предназначенные:

- для сборки-клепки, выполнения болтовых соединений;
- сборки-склейки;
- сборки-сварки.

2 Разделочно-стыковочные стапели (стенды).

3 Специализированные:

- для отстыковки и балансировки агрегатов;
- для отработки кинематики навесных агрегатов;
- нивелировочные стенды;
- сборочно-монтажные (внестапельные рабочие места);
- контрольные (контроль обводов) или контрольно-испытательные.

4 Транспортно-подъемные – средства подъема изделий; рамы крепления панелей на клепальном автомате; тележки для внестапельной сборки; стыковки; приспособления конвейерных линий и т. п.

По конструктивным и эксплуатационным признакам СП могут классифицироваться на следующие.

1 Сборно-разборные.

2 Неразъемные (сварные, клепаные).

3 Стационарные, передвижные (переносные).

4 Поворотные.

5 Операционные и многооперационные.

6 Комплектовочные.

7 Комбинированные.

Приведенная классификация говорит о многообразии вариантов СП в зависимости от решаемых ими технологических задач, что определяет их структуру и состав конструктивных элементов.

Основными требованиями к СП, обеспечивающими их функциональное назначение, являются:

1 Обеспечение заданной точности сборки изделия в соответствии с ТУ, что определяет точность изготовления самого приспособления.

2 Постоянство заданных размеров и положения базовых поверхностей (сборочных баз) при изменении условий в течение всего периода эксплуатации.

3 Необходимая жесткость с целью сохранения точности в течение всего периода эксплуатации между регламентными осмотрами и ремонтами.

4 Удобное положение деталей, узлов при сборке с возможностью расширения механизации и автоматизации сборки и экономии производственных площадей.

5 Снижение металлоемкости при заданной жесткости и экономичность в изготовлении.

6 Минимальное количество подгонок, промеров, разметок и т. п. при точном выполнении технологии сборки.

7 Соблюдение требований безопасности работ при высокой их производительности.

К конкретным СП, в зависимости от их назначения, предъявляется ряд специфических требований, определяемых особенностями собираемых изделий, что указывается в ТУ (ТЗ) на проектирование (по точности, методам базирования, степени нормализации и т. п.) [71].

Типовые СП и их элементы представлены на рисунках 1.6–1.13.

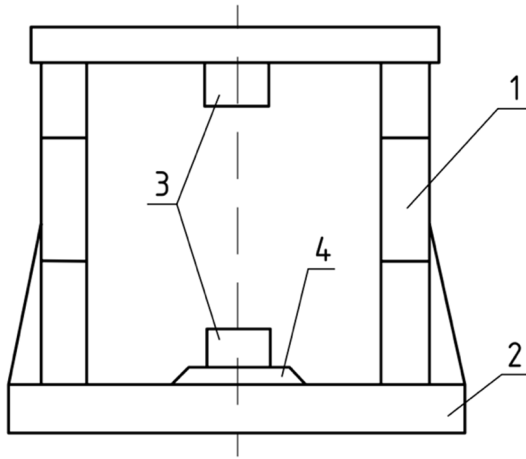


Рисунок 1.6 – СП портального типа

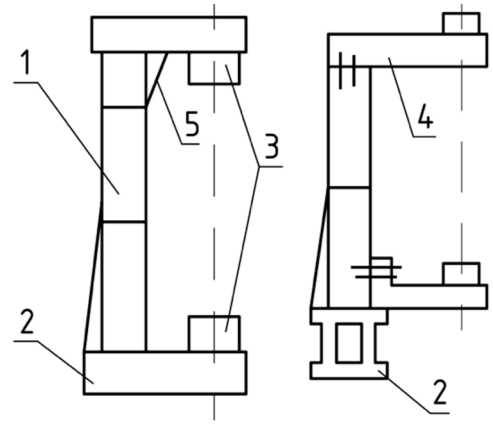


Рисунок 1.7 – СП консольного типа

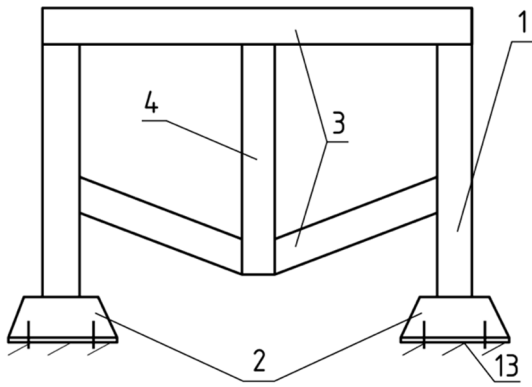


Рисунок 1.8 – Рамные СП

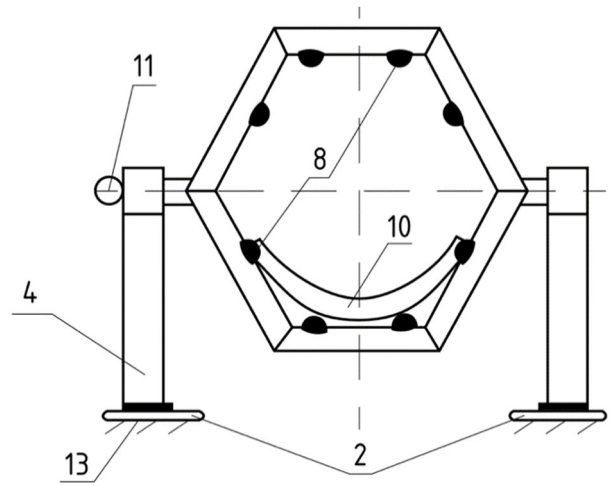


Рисунок 1.9 – Безбалочные СП

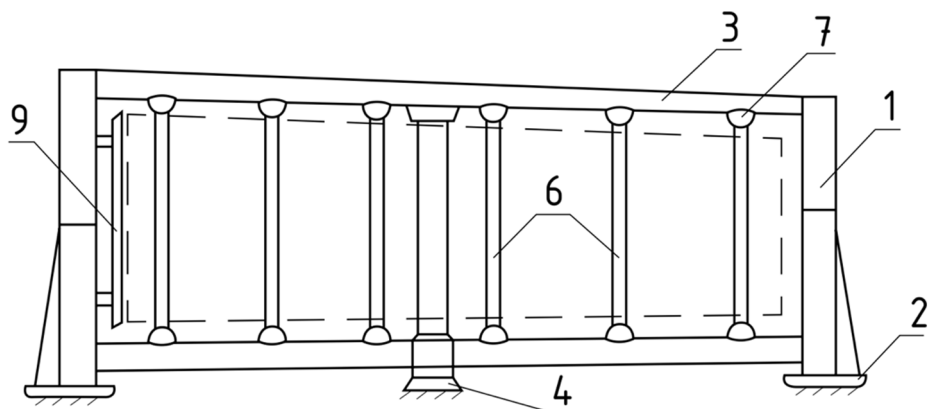


Рисунок 1.10 – Многобалочные СП

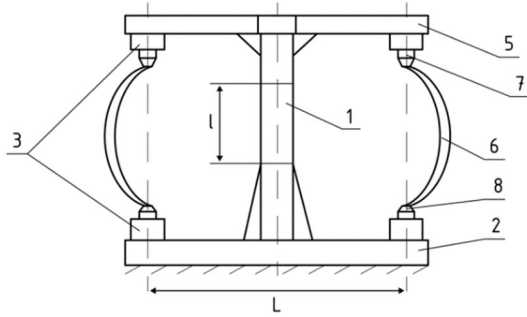


Рисунок 1.11 – СП эстакадного типа

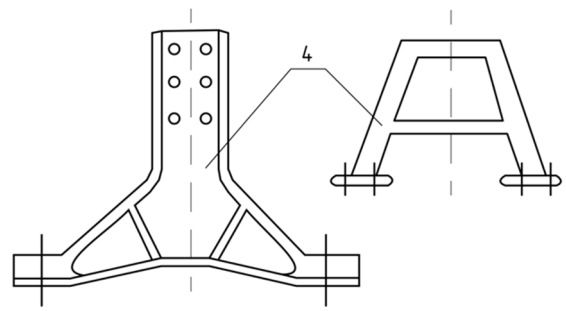


Рисунок 1.12 – Стойки

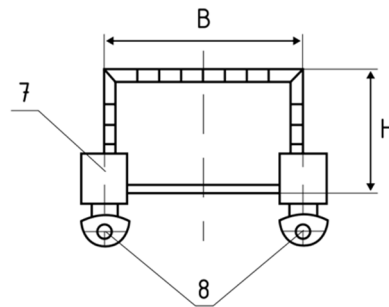


Рисунок 1.13 – Установочные элементы

На рисунках 1.6–1.13: 1 – колонны; 2 – основания; 3 – балки; 4 – стойки; 5 – кронштейны; 6 – рубильники; 7 – стаканы; 8 – заливочные элементы; 9 – стальные плиты; 10 – ложементы; 11 – механизм поворота; 12 – механизм подъема ложементов и рубильников; 13 – фундаменты.

Сборочные приспособления являются основой, необходимой для соблюдения проектных параметров при строительстве ЛА. При изготовлении составляющих элементов СП, при их монтаже и юстировке поля допусков на отклонения от проектной геометрии в три раза меньше, чем поля допусков, предъявляемые при сборке частей самолета, осуществляемой с использованием данных сборочных приспособлений [15].

1.3.2 Сборка летательного аппарата

Сборку узлов, секций, отсеков и агрегатов можно осуществлять различными методами. Метод сборки предопределяет структуру всего технологического процесса сборки, выбор оборудования, уровень качества готовых сборочных единиц.

Конструкция самолета и технология его изготовления находятся во взаимосвязи: существенные изменения в конструкции, выполненные на основе новейших достижений науки и техники, неизбежно вызывают необходимость использования новых технологических процессов, и наоборот, новые технологические решения позволяют усовершенствовать конструкцию самолета.

Схема применяемых методов сборки авиационных конструкций приведена на рисунке 1.14, рассмотрим основные из них.



Рисунок 1.14 – Классификация методов сборки

Сборка по базовым поверхностям деталей – процесс, при котором базирование деталей изделия осуществляется по сопрягаемым поверхностям деталей, установленных ранее.

Возможность применения данного метода определяется следующими условиями:

- обеспечением заданной точности установки детали;
- достаточной жесткостью базовых элементов и их способностью воспринимать фиксирующие и другие нагрузки, возникающие при сборке.

Точность установки детали определяется точностью сборочной базы, образованной поверхностями ранее установленных деталей изделия.

Сборка с базированием по отверстиям – процесс сборки деталей летательных аппаратов, осуществляемый как с использованием сборочных приспособлений, так и без них.

Если для сборки не используются специальные сборочные приспособления, то базирование деталей выполняется по сборочным отверстиям в деталях. Сборка производится на верстаках или в специальных устройствах, предназначенных для обеспечения удобства выполнения работ и придания жесткости деталям.

Если сборка осуществляется данным методом с использованием сборочных приспособлений, то она представляет собой процесс, при котором базирование деталей выполняется по базовым отверстиям в сборочной оснастке упрощенной конструкции и устанавливаемых деталях.

Сборка по базовым отверстиям универсальна и хорошо сочетается с другими методами сборки. Так, например, при сборке панелей и секций фюзеляжа возможно применение комбинированной схемы базирования, при которой:

- верхние панели собирают с установкой обводов шпангоутов по базовым отверстиям;
- указанную базу сохраняют и в стапеле сборки отсека;
- боковые панели собирают с установкой обводов шпангоутов по базовым отверстиям, в качестве установочной базы на сборке отсека используют обводы и базовые отверстия.

Сборка с базированием от поверхности каркаса – процесс, при котором базирование обшивки летательного аппарата выполняется по сопрягаемым поверхностям сборочных приспособлений.

При таком способе базирования обшивку или панель устанавливают внутренней поверхностью на опорные поверхности и прижимают рубильниками, лентами или шнурами. В этом случае погрешности обводообразующих элементов сборочного приспособления полностью переносятся на обводы окончательно собранного изделия. Поэтому необходимо добиваться наибольшей точности обводов при монтаже и выверке сборочного приспособления, так как при установке обшивки или панели их невозможно будет исправить.

Сборка с базированием от наружной поверхности обшивки – процесс, при котором базой для устанавливаемых обводообразующих элементов летательных аппаратов являются опорные поверхности сборочных приспособлений, выполненные по наружной поверхности обшивки. Этим способом собирают большинство отсеков с помощью стапелей с откидными рубильниками.

Сборка с базированием от внутренней поверхности обшивки – процесс, при котором базирование обшивки по ее внутренней поверхности выполняется по базовым поверхностям сборочной оснастки или на поверхности специальных макетных элементов (нервюр, шпангоутов и др.) с последующим базированием сопрягаемых с обшивкой составных частей каркаса на внутреннюю поверхность обшивки [66].

Любой вышеописанный метод подразумевает либо сборку летательных аппаратов без использования сборочной оснастки, либо использование различных сборочных приспособлений, монтаж и юстировка которых была выполнена ранее. Однако на современном этапе развития авиационной промышленности, учитывая высокие требования к производству летательных аппаратов, видится необходимость использования прецизионных координатоопределяющих систем, предназначенных для контроля сборки деталей в режиме реального времени.

1.4 Реконструкция, переоснащение и перевооружение летательных аппаратов

Ресурс самолета является одним из главных показателей его эксплуатации. При производстве летательных аппаратов в конструкторском бюро закладывается определенный период работы техники (как правило, в часах налета), по истечении которого аппарат снимается с эксплуатации [3].

Считается, что ресурс летательного аппарата равен ресурсу его планера, так как за время эксплуатации возможны ситуации, что силовой агрегат летательного аппарата может быть подвергнут капитальному ремонту и даже замене несколько раз. Ресурс планера зависит от степени совершенства его конструкции, качества сборки, во время которой необходимо соблюдение геометрических параметров, установленных при проектировании летательного аппарата, условий эксплуатации

и многих других факторов. Для продления ресурса необходимо обеспечить его качественное техническое обслуживание (включающее, в том числе, и измерительные работы, выполняемые для подтверждения соответствия реальной геометрии воздушного судна проектной).

С целью продления срока службы летательных аппаратов, а также для улучшения эксплуатационных характеристик выполняется реконструкция самолета, в состав которой может также входить переоснащение летательного аппарата и его перевооружение.

Реконструкция самолета включает в себя обновление ключевых элементов конструкции, которые подвержены износу, а также модернизацию отдельных систем. Например, во время реконструкции на ЛА могут быть заменены и / или установлены:

- отдельные части фюзеляжа, крыльев, хвостового оперения;
- новые навигационные системы и датчики для улучшения полетных характеристик;
- системы наведения;
- системы радаров;
- системы средств радиоэлектронной борьбы;
- системы вооружения.

Вышеописанные обновления позволяют достичь летательному аппарату, изготовленному ранее, характеристик, соответствующих современному развитию технологий.

Преимуществами реконструкции ЛА являются:

- продление срока службы летательного аппарата;
- повышение безопасности: замена поврежденных элементов, устранение дефектов, вызванных ошибками при проектировании и сборки самолета;
- экономическая эффективность: модернизация существующего ЛА обходится дешевле, чем изготовление нового;
- быстрое внедрение новой единицы в парк: реконструкция и переоснащение занимают меньше времени, чем разработка и производство нового самолета.

При реконструкции нередко обновляется и перевооружается техника, изготовленная до возникновения современных методов и способов проектирования и изготовления летательных аппаратов. Однако при выполнении данных работ необходимо обеспечить контроль геометрических параметров, отвечающий требованиям сегодняшнего дня.

1.5 Применяемые методы контроля геометрических параметров

1.5.1 Монтаж и юстировка сборочных приспособлений

Важнейшим критерием качества изделия является соответствие их геометрических параметров требованиям конструкторской документации.

Существует несколько способов контроля положения элементов сборочных приспособлений при их монтаже (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Средства монтажа сборочной оснастки

Рассмотрим основные из них.

1 Монтажно-фиксирующий шаблон. Данный шаблон можно применять при сборке большой группы приспособлений, предназначенных для изготовления шпангоутов, лонжеронов, нервюр, балок и подобных им узлов. По имеющимся в шаблоне вырезам и отверстиям можно точно разместить на каркасе приспособления, фиксаторы и зажимы.

Данный метод монтажа прост и имеет низкую трудоемкость, однако он не может быть использован при монтаже СП с пространственным расположением базовых элементов. Монтаж базовых элементов с помощью монтажно-фиксирующего шаблона в сборочных приспособлениях пространственной конструкции затруднен из-за сложности установки шаблонов по дистанции и обеспечения заданного положения осей отверстий в вилках, расположенных на различных дистанциях и в разных плоскостях.

2 При изготовлении стапелей для сборки крупных и средних агрегатов, а также секций самолета фиксирующие элементы устанавливаются другими способами, так как изготовление и эксплуатация громоздких и тяжелых монтажных эталонов сложны и экономически невыгодны. В таких случаях стапели монтируют по инструментальному методу, при котором в первую очередь используются инструментальный стенд и плаз-кондуктор. На каркасах стапелей по инструментальному стенду монтируются установочные элементы для навески рубильников и ложементов. Отверстия в этих элементах заданы от строительных осей. Рубильники, изготовленные по шаблону плаз-кондуктора, имеют аналогичные установочные отверстия. Таким образом, навесив рубильники на отверстия установленных элементов каркаса, получают рабочий контур рубильников, точно ориентированный относительно строительных осей агрегата.

Важнейшим условием применения этого метода является необходимость базирования всех элементов за одну установку. Каркас остается в первоначальном положении в процессе установки всех вилок, так как относительно первой вилки отсчитываются координаты для монтажа всех остальных элементов. При перестановке каркаса вернуть в исходное положение базовую вилку практически невозможно.

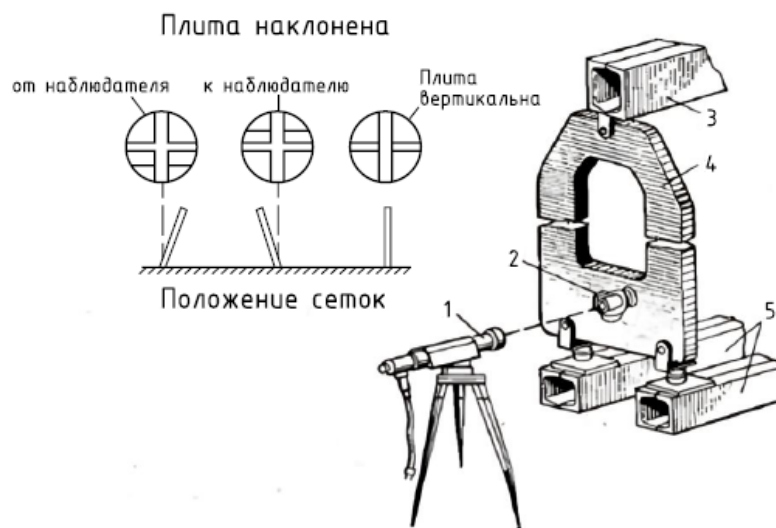
Характерным недостатком является то, что установка элементов каркаса осуществляется вручную с использованием переходных фитингов и калибров. Во время работы необходимо снимать и вновь устанавливать поперечную линейку, что вызывает дополнительные трудности, связанные с большой массой линейки и необходимостью неоднократно контролировать её установку, что неизбежно влечет понижение точности выполняемых работ. Кроме того, для установки элементов на размеры, не

кратные шагу отверстий поперечной линейки, увеличивается вспомогательное время за счет настройки переходных фитингов и калибров.

3 Монтаж сборочных приспособлений, а также контроль точности сборки оснастки можно выполнять специальными оптическими геодезическими приборами, проверяя горизонтальность, взаимную параллельность и перпендикулярность плит, соосность осей и отверстий узлов фиксации, расположенных под любым углом к горизонту. Традиционно для контроля геометрических параметров используется следующее оборудование: прецизионный нивелир, автоколлиматор с отражающими зеркалом, теодолит, квадрант с зеркалом, центропризма, стойка с маркой [8].

Принципиальная схема проверки автоколлиматором вертикальности плиты представлена на рисунке 1.16.

Если на своем пути лучи встретят зеркало, расположенное под прямым углом к направлению пучка лучей, то, отразившись от зеркала, они вернуться в трубу автоколлиматора по тому же направлению. Это свойство автоколлиматора используют для проверки положения плит и других элементов приспособлений. Автоколлиматор устанавливают горизонтально по имеющемуся в нем точному уровню [8].

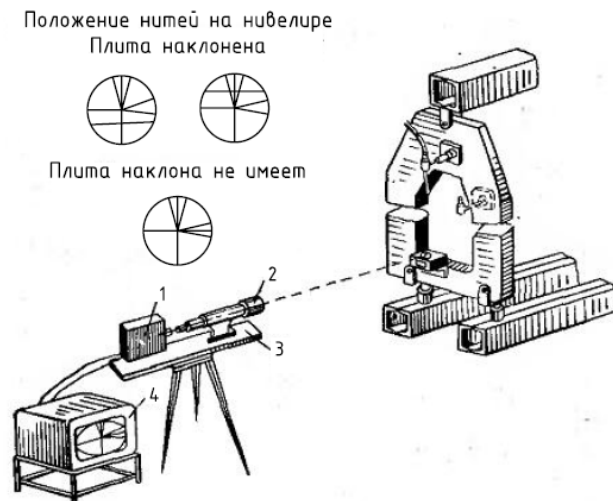


- 1 – автоколлиматор; 2 – отражающее зеркало; 3 – верхняя балка приспособления;
4 – плита узла разъема собираемого агрегата; 5 – нижние балки приспособления

Рисунок 1.16 – Схема проверки автоколлиматором вертикальности плиты сборочного приспособления

При монтаже и контроле крупногабаритного сборочного приспособления применяют оптико-телевизионную установку с комплектом целевых знаков. Установка позволяет контролировать с высокой точностью положение горизонтальных и вертикальных плоскостей, а также расположение фиксирующих и зажимных элементов.

Передающая камера установки 1 (рисунок 1.17) и нивелир 2 расположены на одном основании 3, позволяющем поднимать их на необходимую высоту и вращать вокруг общей вертикальной оси. Видеоприемное устройство 4 выполнено быстро съемным, поэтому в процессе работы его можно располагать отдельно от ОТУ в удобном для наблюдения месте [8].



1 – передающая камера; 2 – нивелир; 3 – основание; 4 – видеоприемное устройство

Рисунок 1.17 – Схема контроля установки плиты приспособления при помощи оптико-телевизионной установки

На рисунке 1.18 приведена схема монтажа рубильников с помощью оптико-механических приборов.

Монтаж СП выполняется в следующей последовательности:

- 1) каркас СП устанавливается в требуемое положение;
- 2) на каркасе закрепляется зрительная труба 8, 11 вдоль базовой оси визирования;
- 3) на противоположной стороне закрепляют целевой знак 13 вдоль базовой оси визирования;

4) с помощью пентапризмы 14 образуют систему линии визирования, параллельную базовым линиям визирования. Линию визирования фиксируют целевыми знаками;

5) на координатной линейке 16 вдоль оси визирования устанавливают два целевых знака для возможности перемещения зрительной трубы с пентапризмой вдоль линейки;

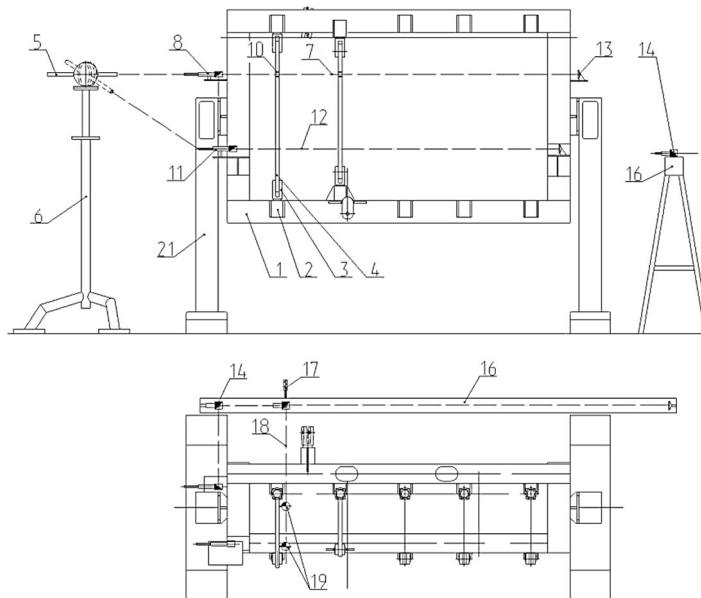
6) на рубильник 4 устанавливают вилки 3, одновременно вставив их хвостовики в стаканы 2;

7) базовый элемент устанавливают на каркасе СП и крепят каким-либо способом;

8) с помощью целевых знаков 10, 19 положение базового элемента регулируется в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

9) установленный элемент фиксируется заливкой вилок цементом;

10) для установки следующего элемента зрительная труба перемещается вдоль дистанционной линейки на необходимую дистанцию.



1 – каркас; 2 – стакан; 3 – вилка; 4 – рубильник; 5 – теодолит; 6 – монтажная стойка; 7, 12 – базовые оси визирования; 8, 11 – визирные трубы; 10 – целевой знак; 13 – позиционные целевые знаки; 14 – визирная труба с пентапризмой; 16 – координатная линейка;

17 – штырь; 18 – вспомогательная ось визирования; 19 – целевой знак; 21 – монтажная рама

Рисунок 1.18 – Схема монтажа рубильников с помощью оптико-механических приборов

Необходимо отметить ряд существенных недостатков данного способа монтажа:

- при работе на относительно небольших расстояниях геодезические приборы могут иметь неустранимые и неконтролируемые погрешности, связанные, например, с перефокусировкой при наблюдении объектов, расположенных на разных расстояниях;

- визирные оси оптических приборов не являются материальными, представляют собой некоторые воображаемые линии, положение которых в пространстве определяется положением самих оптических приборов;

- привязка оптико-механических приборов к конкретным конструкциям и техпроцессам требует разработки и изготовления высокоточной специализированной оснастки, которую трудно унифицировать;

- субъективность процессов измерения и контроля, неудобства при работе в цеховых условиях;

- сложность и дефицитность многих приборов, требование высокой квалификации исполнителей;

- сложность позиционирования базирующих и фиксирующих элементов в процессе монтажа.

4 Освоение промышленностью малогабаритных надежных конструкций оптических квантовых генераторов с их уникальными свойствами решило проблему построения высокоточных устройств, систем и приборов различного назначения, свободных от недостатков существующих средств измерения, включая оптические. Следует отметить специфические свойства, предопределившие их широкое применение в лазерно-оптических средствах измерения и контроля: укрупненные каркасные и фиксирующие элементы стапеля монтируются непосредственно в агрегатном цехе с помощью лазерных центрирующих измерительных систем (ЛЦИС). Кроме того, с помощью этих систем можно выполнять операции контроля прямолинейности, плоскостности, соосности. Для сборки стапелей лазерные приборы жестко базируются на стапеле и могут многократно выставляться в идентичное положение при ремонте и модернизации. Для выставления подборок (например, продольных

балок) стапеля в них предусматриваются технологические установочные поверхности (отверстия, площадки). В стапеле расположены узлы, обеспечивающие выставление подборок по лучам. Юстировочные болты позволяют установить балку на требуемые размеры x , y , z и углы относительно строительных осей агрегата.

Применение ЛЦИС позволяет сократить количество эталонной оснастки на 10–15 %, а трудоёмкость монтажа стапелей уменьшить на 25–30 %.

Для монтажа стапелей с помощью ЛЦИС разрабатывается плановая технологическая координатная плита (ТКП), изготавливаются вспомогательная оснастка, вертикальные стойки, координатные линейки. Это усложняет и увеличивает трудоёмкость монтажа стапеля.

Рассмотренные методы контроля геометрических параметров при монтаже и выверке сборочных приспособлений выявляют производственные и экономические негативные эффекты, с которыми сталкивается авиастроительная отрасль. Очевидно, что применение технологии, позволяющей отказаться от использования шаблонов, плазов, инструментальных стенов, обеспечивающей возможность наблюдений с различных станций (без необходимости закрепления специальных оборудованных мест на сборочных приспособлениях), повысит эффективность производственных процессов и обеспечит более высокую точность и темп производства.

1.5.2 Сборка летательного аппарата и регламентные технические работы

Нивелирование самолёта является заключительным этапом общей сборки самолёта.

Целью нивелирных работ является контроль правильности стыковки отдельных агрегатов относительно друг друга и контроль допустимых отклонений органов управления (элеронов, закрылков, рулей высоты и направления) самолётом. Геометрические параметры самолёта (габаритные, углы установки крыла, оперения, углы стреловидности крыла) задаются в конструкторской документации. На основе этих данных разрабатываются нивелировочные чертежи, где указываются положения реперных точек, где углы установки агрегатов выражены через координаты положения специальных реперных точек (рисунок 1.19).

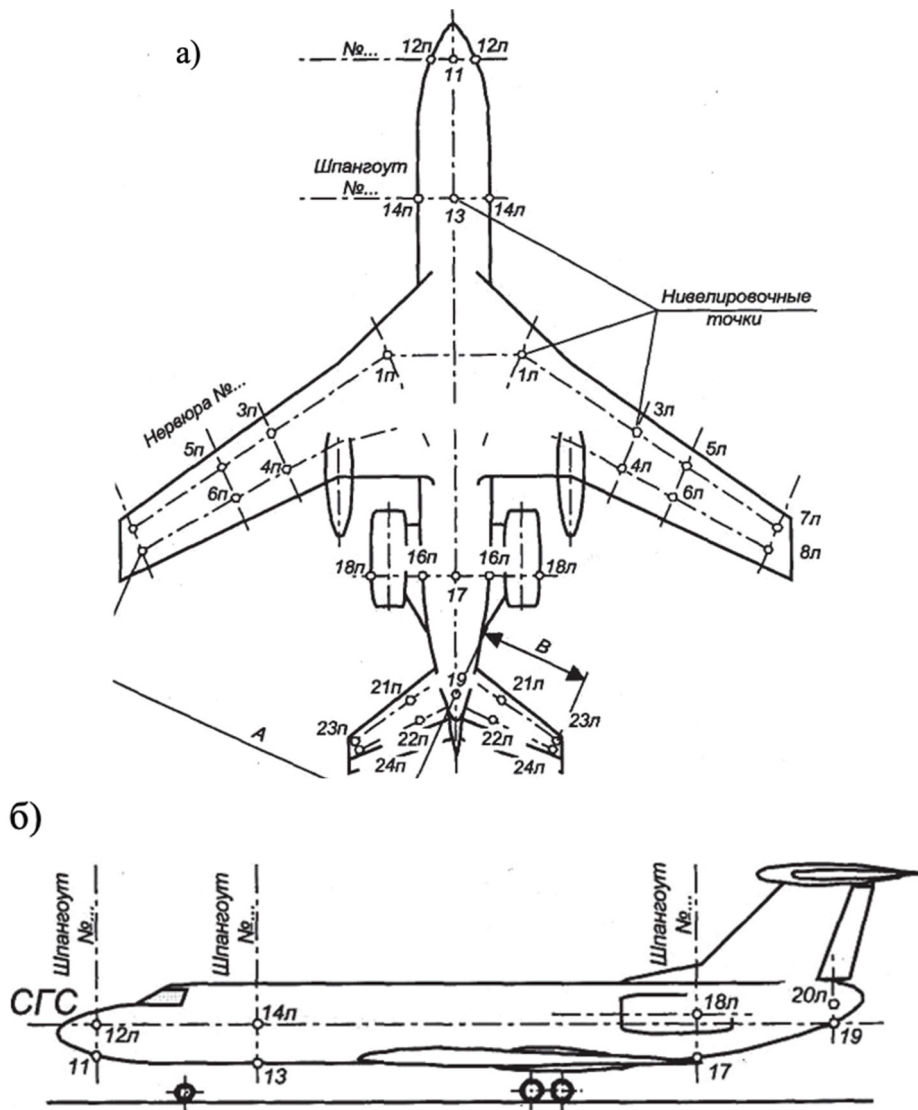


Рисунок 1.19 – Фрагмент нивелировочного чертежа самолета: а) вид сверху;
б) вид сбоку

На нивелировочном чертеже приводятся таблицы, в которых указаны относительные координаты всех реперных точек в проекции реперной точки на горизонтальную и вертикальную плоскости.

Также в таблицах задают допуски на возможные отклонения реперных точек в зависимости от применяемого оборудования (например: обычные линейки, оптическое оборудование, лазерное оборудование). Рассмотрим порядок нивелирования с использованием лазерных систем, оптических приборов и абсолютных лазерных трекеров.

1.5.3 Нивелирование самолета с использованием лазерной центрирующей измерительной системы

При использовании лазерной системы процесс нивелирования нагляден, так как плоскости нивелирования видимые (тонкие плоскости имеют красный, оранжевый цвета). При применении лазерных систем основная часть времени затрачивается на подготовку и наладку измерительного оборудования. Лазерные системы эффективно применять на расстоянии до 200 м, так как при увеличении дистанции лучи становятся размытыми, и, следовательно, точность измерений падает.

Нивелирование самолета с использованием ЛЦИС проходит поэтапно.

На первом этапе ведут подготовительные работы. Самолет устанавливают на регулируемые по высоте опоры на специальной площадке с изолированным фундаментом. Оптические приборы выставляют в рабочее положение относительно технологической координатной плиты и координатных линеек. При этом учитывают, чтобы прибор обеспечивал хороший обзор всех реперных точек (применяется от 10 до 20 лазеров). Затем выверяют приборы на расчётные уровни.

Горизонтальные технологические координатные плиты устанавливаются по реперным площадкам, а вертикальные задают в виде жестких вертикальных плит и координатных линеек. Линейки несут систему координатных отверстий для базирования лазерных лучей от излучателей. На втором этапе проводят установку самолета в линию полета.

Самолет выставляют в линию полета так, чтобы продольная и поперечная оси располагались в горизонтальной плоскости. Горизонтальность проверяют по четырем точкам (две на крыле и две на фюзеляже).

Затем проводят нивелирование самолета: проверяют положение нивелировочных точек в соответствии с нивелировочно-регулирующим чертежом и таблицей. Данные заносят в нивелировочный паспорт. Паспорт сопровождает машину весь период эксплуатации.

В случае если нивелировочная точка вышла за пределы допуска, эксплуатация изделия не допускается. При этом должны быть выявлены и устранены причины,

вызвавшие дефект (проверены стапели сборки агрегатов, разделочные стенды, контрольно-измерительные приспособления). Тщательно проверяют трафареты для нанесения реперных точек.

На рисунке 1.20 показана схема проверки реперных точек 1 с помощью ЛЦИС 2 и видимых лазерных лучей 3, размещенных по строительным осям самолета 5 и перпендикулярно горизонтальной плоскости в местах расположения реперных точек самолета. Положение реперных точек по высоте контролируется относительно горизонтальной плоскости, образованной лазерными лучами 4, с помощью специальных мерных штанг 6, которые предварительно по лазерным лучам выставляются перпендикулярно плановой проекции самолета или горизонтали.

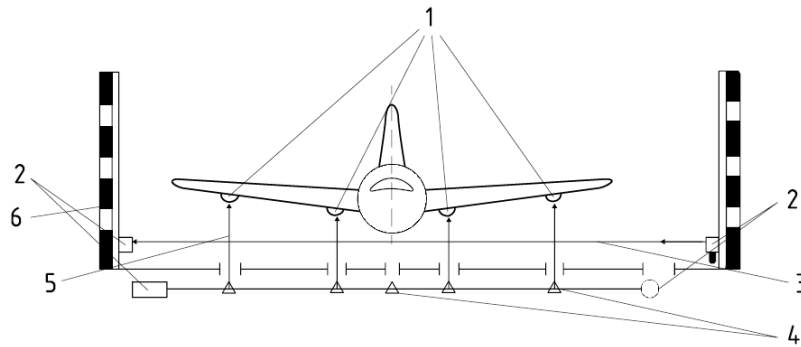


Рисунок 1.20 – Проверка точности стыковки крыла с фюзеляжем по реперным точкам с помощью ЛЦИС

Стыковку агрегатов самолета начинают с установки фюзеляжа в горизонтальное положение на гидравлических подъемниках так, чтобы лазерные лучи, идущие снизу, попадали на реперные точки.

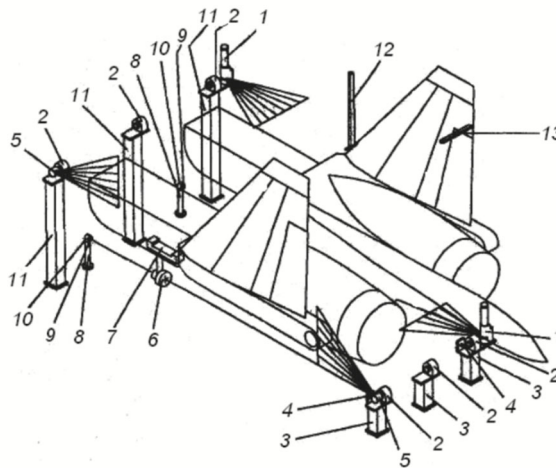
С помощью блока индикации добиваются наиболее точного расположения агрегатов относительно базовых осей в плановой проекции самолета.

Система ЛЦИС состоит из лазерного излучателя, базового знака и ПЧЦЗ, который является фотоэлектрическим приемником светового излучения и служит для центрирования целевого знака по оси луча лазера. Фоторезисторы ПЧЦЗ преобразуют световую энергию лазерного луча в электрический сигнал, регистрируемый блоком индикации. При совпадении оси лазерного луча с центром ПЧЦЗ блок ин-

дикации регистрирует нулевой уровень сигнала. Чувствительность (точность) индикации с помощью ПЧЦЗ лежит в пределах $\pm 0,05$ мм.

На рисунке 1.21 представлен пример стенда разделки стыковых узлов и стыковки агрегатов хвостовой части самолета с помощью ЛЦИС, которая в этом случае выполняет следующие функции:

- контролирует нивелировочные точки агрегатов хвостовой части самолета до стыковки, в процессе стыковки и после стыковки;
- контролирует угловое положение узлов навески специальных подвесок относительно осей изделия [17].



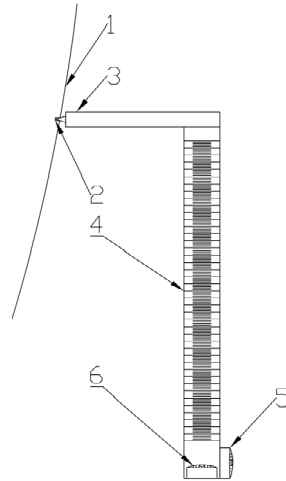
- 1 – лазерный нивелир; 2 – подставка; 3, 8, 11 – координатные стойки; 4 – мишень;
 5 – сканирующий узел; 6 – зеркальный датчик; 7 – технологическое приспособление;
 9 – визуальный целевой знак; 10 – координатор; 12 – нивелирная линейка; 13 – измерительная линейка

Рисунок 1.21 – Лазерная измерительная система для стыковки хвостовой части самолета

1.5.4 Нивелирование самолета с использованием оптических приборов

Схема измерения высотной отметки контрольной точки при геометрическом нивелировании представлена на рисунке 1.22. На поверхности самолета 1 нанесена контрольная точка в виде керна 2. В керн контрольной точки устанавливают специальную штангу 3, на одном из концов которой прикреплена специальная рейка 4.

На рейку нанесена шкала, по которой при нивелировании берутся отсчеты. Для установки рейки в вертикальное (в отвесное) положение в плоскостях ZOX и ZOY внизу рейки прикреплены два цилиндрических уровня 5, 6.



1 – поверхность самолета; 2 – контрольная точка; 3 – штанга; 4 – рейка;
5, 6 – цилиндрические уровни

Рисунок 1.22 – Схема геометрического нивелирования

Для проведения работ по нивелированию самолета с использованием высокоточного нивелира требуется бригада, состоящая из трех человек:

- первый устанавливает штангу в контрольную точку, выполненную в виде керна;
- второй приводит и фиксирует рейку в отвесное положение по двум уровням;
- третий выполняет высокоточные измерения с использованием нивелира.

Рассмотренные способы нивелирования самолета, которое необходимо на всех циклах жизни летательного аппарата, демонстрируют трудоемкость выполняемых работ: для обеспечения единства измерений одновременно могут использоваться несколько десятков приборов; а большая часть времени затрачивается на подготовительные работы. Для оптимизации производственных процессов наиболее эффективной является методика, позволяющая выполнять измерения меньшим количеством приборов в единой локальной системе координат и задействующая бригады меньшего состава.

1.5.5 Нивелирование самолета с использованием лазерных трекеров

При использовании абсолютных лазерных трекеров реализуется полярный способ определения координат. Прибор измеряет горизонтальный и вертикальный углы, наклонное расстояние до визирной марки. Затем по формулам 1.1 определяется положение точки в пространстве в прямоугольной системе координат

$$\begin{aligned} X &= S \cos \nu \cos \beta, \\ Y &= S \cos \nu \sin \beta, \\ H &= S \sin \nu, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где S – наклонное расстояние, ν – вертикальный угол, β – горизонтальный угол

Выбор типа визирной марки, а также выбор оснастки для проведения нивелировочных работ зависит от типа поверхности: если элемент самолета, где нанесена контрольная точка, – плоскость, то возможно применение сферического отражателя (рисунок 1.23, *а*) и специальной оснастки – подставок (рисунок 1.23, *б*); если же элемент представляет собой криволинейную поверхность, то необходимо использовать специальные щупы (рисунок 1.23, *в*) либо различные жезлы скрытых точек [138, 123, 86, 139].



Рисунок 1.23 – Инструментарий при использовании лазерного трекера:

а) сферический отражатель; *б*) специальная оснастка; *в*) щупы

1.5.6 Сборка летательного аппарата, монтаж и юстировка сборочных приспособлений, выполняемые с использованием современного геодезического оборудования

На современном этапе развития инженерной геодезии для контроля геометрических параметров сложных пространственных форм узлов, агрегатов, внешних обводов, а также геометрических параметров самого летательного аппарата наиболее технологичным и универсальным методом является координатоопределяющая технология [29].

На исследуемой поверхности объекта с помощью координатоопределяющей системы (КОС) определяют пространственные координаты характерных точек (или значительного количества точек – облака точек), что позволяет вычислить необходимые геометрические характеристики обмеряемой конструкции.

Подобная схема обмера обладает высокой гибкостью, позволяя однообразно определять геометрические параметры таких сложных поверхностей, как длина, ширина, радиус кривизны, положение и ориентация в пространстве, перемещение, деформация, соответствие заданной форме и др. При необходимости, получаемые при этом результаты позволяют с высокой достоверностью строить САД-модель поверхности объекта сложной формы [78].

Учитывая оперативность проведения измерений – в реальных производственных условиях, в режиме реального времени – могут быть выявлены отклонения от проектных геометрических характеристик (соосность, перпендикулярность, плоскостность, цилиндричность, положение, взаимная ориентация и др.) и применены мероприятия, сводящие к минимуму вредное воздействие нештатной геометрии отдельного элемента на качество монтажа сборочных приспособлений и на сборку всего летательного аппарата.

Основными преимуществами координатоопределяющей системы являются:

- высокая точность измерений;
- мобильность;
- большой измерительный объем.

Рассмотрим основные области применения координатоопределяющих систем при производстве летательных аппаратов:

– на заводе The Boeing Company координатоопределяющая система используется на всех этапах сборки самолетов, в том числе в технологиях сборки секций фюзеляжа самолета. Также на предприятии данная система применяется для контроля точности при калибровке станков и корректировки позиционирования промышленных роботов;

– на заводе Airbus система введена в технологические процессы образования заклепочных соединений, где точное позиционирование заклепок в заклепочном шве контролируется с использованием КОС;

– на различных предприятиях ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (ОАК) происходит внедрение процессов автоматизации в агрегатно-сборочное производство на протяжении последних 20 лет. Так, например, КОС используются в филиале ПАО «Яковлев» – Иркутском авиационном заводе для сборки и стыковки секций фюзеляжа летательных аппаратов (рисунок 1.24).



Рисунок 1.24 – Стыковка и сборка фюзеляжа самолета ИЛ-114-300

Однако использование КОС возможно не только для сборки и стыковки сборочных единиц (или лучше сказать: не только для взаимной увязки размеров сборочных единиц), но и для изготовления, монтажа и юстировки сборочных приспособлений.

Например, на Казанском авиационном заводе (КАЗ) им. С. П. Горбунова – филиале АО «Туполев» в процессе выполнения работ по монтажу, ремонту, реконструкции, реновации СП используется КОС, с помощью которой определяется положение контролируемых точек (согласно конструкторской документации) (рисунок 1.25).



Рисунок 1.25 – Использование КОС для монтажа СП

На производствах композитной авиационной техники (ИЦ «КАИ – Композит») КОС применяется для контроля отклонений геометрических параметров рабочих поверхностей мастер-моделей, матриц, сборочной оснастки, проверке взаимного расположения узлов и агрегатов самолета, а также при контроле внешних обводов готового изделия (рисунок 1.26) [25].



Рисунок 1.26 – Применение КОС для контроля внешних обводов готового изделия

При выборе координатоопределяющей системы, способной выполнять измерения в авиастроительной отрасли и удовлетворяющей требованиям оперативности и точности проведения измерений, следует рассматривать следующие приборы:

- высокоточный роботизированный тахеометр (рисунок 1.27);
- абсолютный лазерный трекер (рисунок 1.28).



Рисунок 1.27 – Высокоточный роботизированный тахеометр



Рисунок 1.28 – Абсолютный лазерный трекер

Как правило, приборы работают под управлением программного комплекса. Измерения выполняются с автоматическим наведением на цель. Использование этой функции (ATR режим) исключает индивидуальную ошибку наблюдателя. Автоматическое наведение на визирную цель, прецизионный дальномер и наличие высокоточного двухосевого компенсатора позволяют тахеометру выполнять измерения в стеснённых производственных условиях с точностью до сотых долей миллиметра. Элек-

тродвигатели тахеометра функционируют с применением пьезотехнологии, прямые приводы позволяют значительно увеличить скорость вращения и при этом обеспечивают высокоточное позиционирование. Данная технология обеспечивает низкое электропотребление, благодаря отсутствию шестерен привод практически не требует технического обслуживания.

Абсолютные датчики горизонтального и вертикального углов в комплексе с технологией АТН обеспечивают тахеометру высокую эффективность в режиме поиска и слежения за визирной целью. Угловые датчики обладают точностью $0,5''$ (1σ).

Достигнуть точности порядка $0,005$ – $0,015$ мм в измерительном пространстве цеха позволяют следующие интерферометры. Это класс автоматизированных промышленно-геодезических систем, предназначенных для высокоточного обмера крупногабаритных объектов сложной формы, в которых интерферометр совмещен с полноповоротным угломерным прибором. Эти приборы называются лазерными трекерами.

Однако, в отличие от тахеометра, расстояние может измеряться как абсолютным дальномером, так и относительным – интерферометром. При этом точность абсолютного дальномера составляет $0,01$ мм (3σ), а накопление ошибки при определении разности расстояний интерферометром составляет $0,0003$ мм на метр. Точность угловых датчиков вертикального и горизонтального круга составляет $m_{\beta} = 0,5''$.

Интерферометр трекера постоянно подсчитывает изменение количества целых длин волн вменяющейся дистанции, а угловые датчики фиксируют текущее значение угла. Из этих данных система постоянно вычисляет текущее значение координат отражателя. Скорость измерений составляет до $1\ 000$ точек в секунду. В случае прерывания луча – потери значения количества целых длин волн в изменяющейся дистанции, включается второй канал измерения расстояний – высокоточный абсолютный дальномер. С его помощью определяется новое положение отражателя и возобновления слежения интерферометром от новой начальной точки.

Методика применения лазерного трекера в машиностроении подобна методике применения тахеометра, при этом высокая точность и быстродействие системы позволяют решать многие задачи в динамике, существенно повысить точность и автоматизацию измерений.

1.6 Существующие разработки в области контроля геометрических параметров

В настоящее время вопросу контроля геометрических параметров при выполнении работ в авиастроительной отрасли, а также использованию роботизированных высокоточных средств измерений уделяется большое внимание.

В трудах [17, 66] авторы подчеркивают важность контроля геометрических параметров на всех этапах жизненного цикла воздушного судна и приводят допуски на отклонения форм самолета от проектных. На примере самолета RRJ авиалайнер разделен на три зоны. На рисунке 1.29 представлено зонирование поверхности фюзеляжа, на рисунке 1.30 – зонирование поверхности крыла, на рисунке 1.31 – зонирование киля и стабилизатора, а на рисунке 1.32 – зонирование пилона и гондолы двигателя.

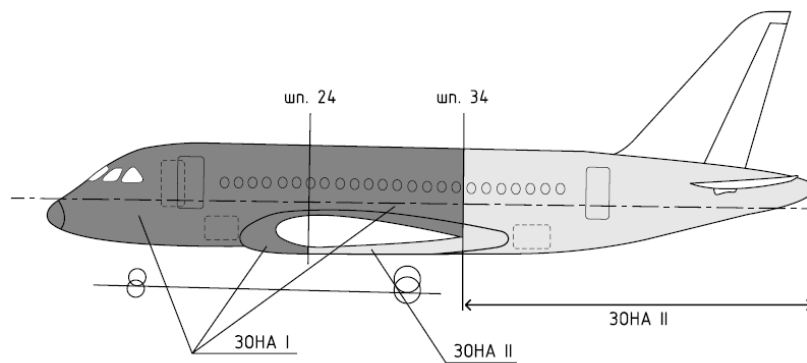


Рисунок 1.29 – Зонирование поверхности фюзеляжа

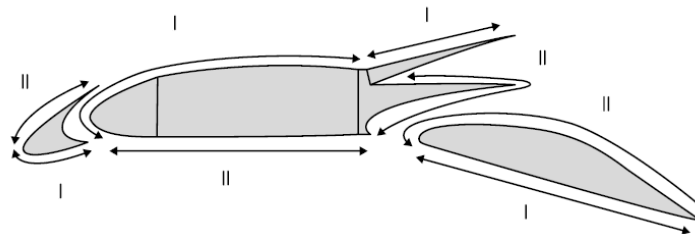


Рисунок 1.30 – Зонирование поверхности крыла

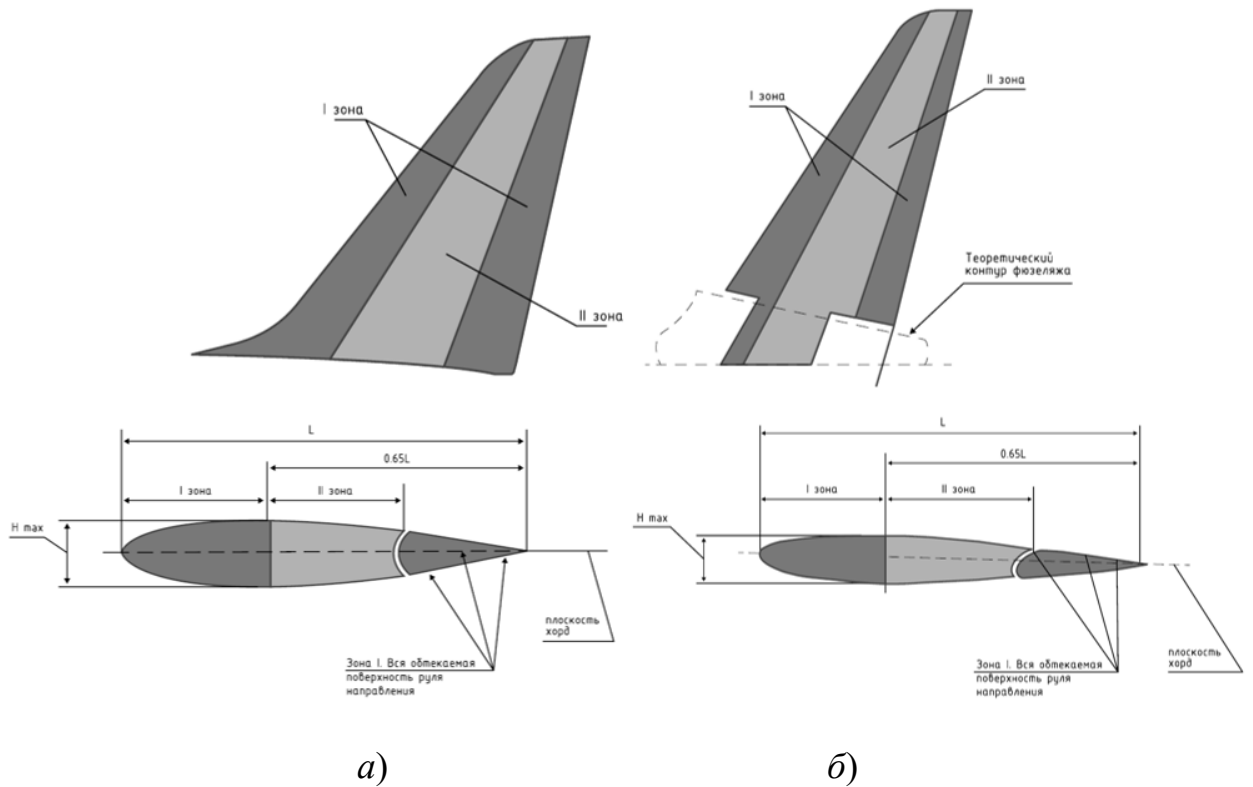


Рисунок 1.31 – Зонирование киля и стабилизатора

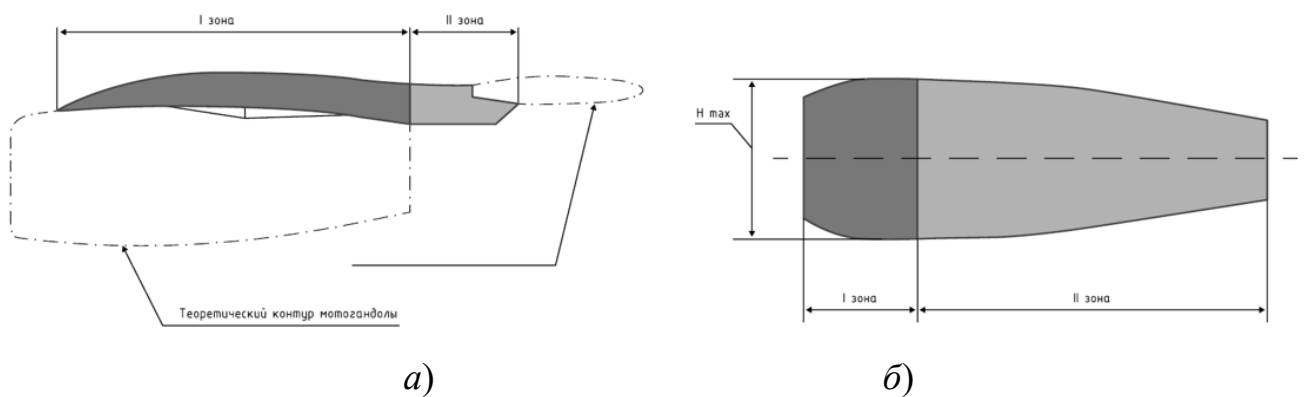


Рисунок 1.32 – Зонирование пилона и гондолы двигателя

Для каждой зоны каждого элемента существует определенное значение допустимого отклонения от теоретических обводов (проектных параметров).

Так, например, значения отклонений для I и II зоны не должны превышать:

- для фюзеляжа: $\pm 2,0$ мм;
- для крыла: $\pm 1,0$ мм;
- для киля и стабилизатора: $\pm 1,0$ мм;
- для пилона и гондолы: $\pm 2,0$ мм.

Невписываемость элементов механизации крыла (интерцепторов, тормозных щитков и закрылков) в контур крыла должна быть не более $\pm 2,0$ мм, а для элеронов – не более $\pm 1,5$

Важно отметить, что допускаемые отклонения от проектных значений указаны для собранных узлов и агрегатов, для производства которых использовались сборочные приспособления. Следовательно, согласно [15] отклонения при монтаже и юстировке СП должны быть ниже не менее, чем в 3 раза.

В трудах описываются допуски, с которыми необходимо изготовить детали летательного аппарата и воздушное судно в целом, однако не указываются методы и средства измерения, которые необходимо использовать.

В статьях [4, 5] авторы описывают наиболее длительный и ответственный этап подготовки производства на авиастроительных предприятиях – технологическую подготовку сборочного производства, которая включает в себя изготовление, монтаж и обслуживание сборочных приспособлений. Авторы обращают внимание, что в современных условиях на российских предприятиях применяется технология безэталонного монтажа сборочной оснастки, которая реализуется при наличии электронной модели конструкции сборочного приспособления и координатоопределяющей системы. В статьях приводятся примеры монтируемых элементов сборочной оснастки (таблица 1.1), а также указывается точность, с которой, как правило, необходимо выполнять монтаж от $\pm 0,05$ мм до $\pm 0,1$ мм.

Таблица 1.1 – Примеры элементов сборочных приспособлений

№ п/п	Название	Масса, кг	Размеры, мм	Эскиз
1	Установочные кронштейны (вилки и проушины)	1–7	100–300	
2	Выдвижные фиксаторы и упоры	3,5–40	250–650	
3	Рубильники и ложементы	5–40	200–2000	

В автореферате [21] автор указывает действительные значения отклонений при сборке летательных аппаратов и сборочных приспособлений на авиастроительном предприятии различными методами.

Систематическая ошибка включает в себя, как правило:

- погрешность измерительных средств;
- погрешность технологической оснастки, предназначенной для установки этих средств;
- погрешности базы для установки этой оснастки.

Составляющими случайной погрешности являются:

- грубая погрешность измерения;
- погрешности, приобретаемые под воздействием внешних условий.

Сделаны заключения о погрешностях, которые возникают при изготовлении сборочных приспособлений при использовании контрольно-макетной оснастки как средства монтажа. Так, суммарная погрешность монтажа ступеней находится в пределах от 0,20 до 0,50 мм, однако на практике при изготовлении контрольно-монтажной оснастки, размеры которой более 10 м, точность изготовления значительно снижается, и погрешность монтажа увеличивается в три-четыре раза.

Суммарная погрешность монтажа сборочных приспособлений с помощью координатных станков колеблется от 0,05 до 0,80 мм. Важно отметить, что данная погрешность возникает не только из-за неточности координатной сетки инструментальных станков, но и вследствие погрешностей фитингов, калибров и других установочных средств, закрепляемых на координатных линейках.

Автор отмечает, что большие габаритные размеры и высокие точностные требования привели к тому, что оптические методы и лазерные средства измерений стали основными при изготовлении сборочных приспособлений в авиастроительной отрасли, так как они на порядок точнее иных способов контроля геометрических параметров при выполнении монтажных работ и сборке летательных аппаратов.

Необходимую точность при контроле геометрических параметров крупногабаритных изделий авиастроительной отрасли можно обеспечить с использованием координатоопределяющей технологии. Однако размеры контролируемых изделий

оказывают негативное влияние, так как с увеличением дистанции снижается точность выполняемых измерений, и, следовательно, необходимо создавать геодезические сети, позволяющие выполнять наблюдения с различных станций, при этом в единой системе координат.

В работе [16] авторы описывают различные методы контроля геометрических параметров, которые применялись ранее: сборка с помощью различных жестких шаблонов и лазерных систем измерения геометрических параметров, разработанные в 1970-80-е гг., которые подразумевали визуальный отсчет показаний, требовали высококвалифицированного обслуживающего персонала. В статье указывается, что современные средства измерений (например, лазерный трекер) находят широкое применение во многих отраслях промышленности, особенно в машиностроении, по причине их высокой точности, производительности, мобильности и компактности (измерительное средство легко приблизить к измеряемому объекту, разместить в сборочном цехе). Авторы описывают возможные сценарии применения лазерных трекеров в авиастроительной отрасли:

- контроль крупногабаритных изделий (фюзеляжи и крылья самолетов);
 - сборка крупногабаритных изделий (подчеркивается возможность применения систем для отслеживания положения в режиме реального времени, что позволяет их эффективно использовать для сборки изделий из нескольких компонентов, например при стыковке крыла самолета с фюзеляжем);
 - контроль сложных криволинейных поверхностей самолета методом сравнения с CAD моделью;
 - монтаж и юстировка стапелей, сборочных линий, сварочных кондукторов.
- Рассмотрены актуальные проблемы внедрения координатоопределяющих систем, среди которых необходимо выделить следующие:

- в условиях производственных помещений, где осуществляется производство летательных аппаратов, колебание годичных и суточных температур, а также значение вертикального градиента температуры воздушного тракта настолько велико, что при контроле геометрии объектов необходимо это учитывать, а, следовательно, необходимо провести исследования температурных условий в помещениях;

– существуют формальные препятствия в виде недостаточно развитой нормативной базы.

В статье утверждается, что эффективность применения систем контроля геометрических параметров будет многократно возрастать, если это учесть еще на стадии проектирования потенциального объекта измерений и отразить в конструкторской и технологической документации.

Эффективность можно достичь путем проектирования пунктов геодезических сетей на рамах сборочных приспособлений и их координирования на этапе разработки элемента.

В работе [42] автор обозначает необходимость для отечественной авиапромышленности постоянного повышения конкурентоспособности выпускаемых летательных аппаратов. Утверждается, что внедрение современных систем автоматизации на различных этапах производственного цикла является одним из основных способов повышения конкурентоспособности отечественных летательных аппаратов. Для выполнения контроля при монтаже сборочных приспособлений, а также при выполнении сборки и стыковки изделий авиационной техники предлагается использовать лазерный трекер, так как применение данной системы позволяет сократить длину измерительной размерной цепи и уменьшить накопление погрешности измерения, что существенно повышает точность координатного позиционирования.

В работе [75] автор обозначает необходимость в повышенных требованиях по установке различной аппаратуры, для достижения которых требуется изготовление высокоточной сборочной оснастки и использование трудоёмкой технологии доводочных (юстировочных) работ, что неизбежно приводит к увеличению стоимости и сроков изготовления летательных аппаратов. В работе описывается возможность применения лазерного трекера для обеспечения соответствия геометрии изделия требованиями конструкторской документации, а также обозначается необходимость дальнейшего развития подхода и технологии измерений, так как использование высокоточных средств геометрического контроля позволяет существенно снизить материально-технические издержки и сократить срок производства изделия.

В работах [18, 74] авторы описывают создание методики как для высокоточного контроля геометрических параметров отдельных деталей, так и для проверки взаимного расположения элементов изделия. Описаны основные средства измерений, состав оборудования и последовательность работ на примере одного объекта.

В вышеперечисленных работах рассматривается актуальность и необходимость использования координатоопределяющей технологии, однако для ее развития необходима разработка типизированных схем геодезических измерений для условий авиастроительного производства, где будут учитываться особенности отрасли: высокие требования к качеству и точности выполняемых измерений, большие габаритные размеры объектов, изменяющиеся условия видимости и пр.

Зарубежные ученые также описывают необходимость применения современных координатоопределяющих систем в авиастроительной промышленности. Например, авторы работ [131, 119, 128] делают выводы о том, что использование лазерного трекера является предпочтительным решением для контроля геометрии крупных компонентов в процессе производства, для калибровки систем навигации и вооружения благодаря его преимуществам, а именно точности и мобильности комплекса. Координатоопределяющая система позволяет контролировать качество продукции, фиксировать отклонения, которые достигают значений выше предельно допустимых относительно электронной модели. Данные отклонения возникают из-за множества предыдущих производственных процессов, во время которых определенный узел или агрегат собирается из многих составляющих.

В научно-технических материалах компании, специалисты которой выполняют измерительные работы в авиастроительной отрасли, представлены статьи, где рассматривается применение лазерного трекера для монтажа сборочных приспособлений [90] и выполнение нивелирования самолета [31]. В представленных статьях описываются точности, достигаемые при выполнении работ с использованием лазерного трекера, а также понимать, насколько эффективнее применять данное оборудование по сравнению с традиционными оптико-механическими средствами измерений.

В материалах, представленных на сайте компании Промышленные измерения [39], представлены основные негативные аспекты использования методов монтажа

сборочных приспособлений, предполагающих наличие эталонов, полномасштабных макетов, шаблонов, специальных заливочных стендов:

- необходимы большие складские помещения;
- регулярный контроль геометрических характеристик эталонов;
- их отстыковка при выполнении ремонтных или планово-ремонтных работ;
- возникновение необходимости закладки целого эталона при выходе из строя хотя бы одного узла изделия.

В материалах описывается опыт применения различных координатоопределяющих систем: роботизированный тахеометр, лазерный трекер, высокоточный лазерный сканер.

Авторы обращают внимание, что для обеспечения работ с крупногабаритными изделиями необходимо выполнять измерения с разных станций с последующим их объединением. Для объединения следует использовать специальные пункты, координаты которых известны и определяются с более высокой точностью.

Среди основных видов деятельности в современной авиастроительной отрасли, где использование современных средств актуально, выделяют:

- геометрический контроль, оцифровка эталонов, макетов, шаблонов;
- геометрический контроль сборочных приспособлений при монтаже, юстировке и во время эксплуатации;
- геометрический контроль элементов летательного аппарата, узлов, отсеков и агрегатов;
- нивелирование летательного аппарата.

Большой вклад в развитие промышленной геодезии в РФ внес Петров В. В. В работах [50, 43, 78, 49, 59, 78, 29] описано применение координатоопределяющих систем для решения задачи контроля геометрических параметров во многих сферах:

- автомобилестроение (<https://www.promgeo.com/services/engineering/automotive-industry/>);
- гидроэнергетика (<https://www.promgeo.com/services/engineering/adjustment-of-guides/>);

- мониторинг деформаций архитектурных зданий (<https://www.promgeo.com/services/engineering/deformation-observation/>);
- целлюлозно-бумажная промышленность (<https://www.promgeo.com/services/engineering/paper/>);
- радиоастрономия (<https://www.promgeo.com/services/engineering/astro/>);
- судостроение (<https://www.promgeo.com/services/engineering/shipbuilding/>);
- лазерное сканирование и 3D-моделирование в промышленности (<https://www.promgeo.com/services/engineering/industrial/>);
- лазерное сканирование и 3D-моделирование произведений искусства (<https://www.promgeo.com/services/engineering/art/>);
- выверка вращающихся печей (<https://www.promgeo.com/services/engineering/kiln/>);
- автоматизация процессов измерений и высокоточная робототехника (<https://www.promgeo.com/services/engineering/robotics/>).

В работах ученых [63, 41, 37, 54, 13, 29, 7] описывается возможность использования роботизированного тахеометра, лазерного трекера для выполнения высокоточных работ в области машиностроения, энергетики, а также для наблюдения за деформационными процессами. Допуски на отклонения габаритных размеров изделий, а также отклонения их форм от проектных в авиастроительной отрасли сопоставимы со значениями, описанными авторами в работах. Это позволяет руководствоваться данными, полученными в результате экспериментов и выполненных работ. Так как большинство процессов, описываемых в статьях, невозможно выполнить с одной станции, то для работы с объектом в единой системе координат необходимо создавать сети, примеры пунктов которых описаны в работах [29, 41, 7]. Вопросы создания и конфигурации геодезических сетей для выполнения высокоточных измерительных работ также рассматривались зарубежными учеными [103, 95, 80, 83].

Актуальность применения координатоопределяющих систем в машиностроительной отрасли рассматривается в работах зарубежных авторов [127, 135, 97, 136, 82, 118, 124, 122, 87, 119, 92, 141, 115].

В работах [138, 123, 139, 86] описывается выполнение высокоточных измерений для определения пространственного положения точек с использованием жезла скрытых точек, что также может быть активно применено в авиастроительной отрасли, например, при выполнении нивелирования самолета.

При работе с высокоточным лазерным оборудованием, помимо технологий и методов производства работ, необходимо учитывать, что результаты измерений, выполненных с использованием координатоопределяющей системы, зависят как от технического состояния средства измерений и оснастки, так и от условий окружающей среды. В работах [110, 81, 85, 108, 125, 104, 121, 129, 105] рассмотрены способы калибровки измерительной системы и подготовка оборудования к измерениям, методы проведения полевых проверок как СИ, так и оснастки с целью обеспечения наивысшей возможной точности.

Так как к объектам авиастроительной отрасли предъявляются повышенные требования, то для обеспечения точности необходимо учитывать все факторы, которые могут ее понижать: систематические погрешности оборудования (как дальномерного, так и угломерного блоков), влияние температуры окружающей среды, погрешности используемых отражателей и пр.

Влияние температуры и окружающей среды на качество измерений и на поведение объекта измерений, а также возможные способы учета рассмотрены в работах [102, 132, 84, 142, 134, 56, 9].

1.7 Предпосылки (обоснования) к совершенствованию методики контроля геометрических параметров

На основе проведенного анализа существующих разработок в области контроля геометрических параметров объектов авиастроительной отрасли, а также опираясь на собственный опыт, можно обозначить следующее: в настоящее время контроль при монтаже и юстировке сборочных приспособлений, при производстве и ремонте летательных аппаратов осуществляется с использованием современных координатоопределяющих систем (лазерных трекеров, роботизированных тахеометров, сканеров и пр.), оптических приборов (высокоточных нивелиров и теодолитов) и носителей жестких форм (шаблонов и плазов). Несмотря на то, что приме-

нение носителей жестких форм является устаревшим способом контроля геометрических параметров, они применяются по сей день, так как обеспечивают требуемую точность при производстве определенных элементов.

На современном этапе развития авиационной промышленности и геодезических измерений в большинстве случаев рекомендуется применять координатоопределяющую технологию, так как она позволяет осуществлять измерения в режиме реального времени с прецизионной точностью, обладает гибкостью, способной отвечать требованиям сегодняшнего дня, и обеспечивает непрерывный контроль без каких-либо существенных ограничений для работы производства.

Существующие актуальные работы описывают оборудование и оснастку, которые необходимо применять для контроля, приводят примеры использования. Однако внедрение новой нормативной и руководящей документации происходит несвоевременно: в настоящее время не существует общего алгоритма, который можно было бы применить для реализации работ по контролю геометрических параметров объектов авиационной промышленности. Действующие регламенты, как правило, носят корпоративный, штучный характер, адаптированный под конкретный объект, без возможности дальнейшего тиражирования.

Согласно анализу, при сборке самолета для разных зон планера и для разных элементов предъявляются различные предельно-допустимые отклонения форм от их проектных значений, и, следовательно, значения допустимых отклонений при монтаже сборочных приспособлений будут отличаться. В этой связи необходимо ввести классификацию измерений, геодезических сетей специального назначения и применяемого оборудования с целью достижения наиболее благоприятных экономических и производственных показателей.

Геодезические сети специального назначения, а также позиционирование прибора относительно пунктов этих сетей – это актуальные вопросы при проведении высокоточных работ в области машиностроения. При этом необходимо помнить, что в авиационной промышленности взаимная видимость между пунктами сетей специального назначения в зависимости от этапа строительства меняется; некоторые пункты утрачиваются, а сами контролируемые объекты обладают большими габаритными размерами и состоят из множества компонентов, что затрудняет ра-

боты с применением лазерного оборудования. Необходимо разработать методику и практические рекомендации для создания геодезических сетей специального назначения на всех этапах производства (от монтажа сборочной оснастки до нивелирования летательного аппарата после общей сборки), определить типы пунктов данных сетей, предложить алгоритмы для расчета оптимального положения измерительного прибора относительно видимых пунктов с целью обеспечения требуемой точности для проведения геодезических работ.

Для выполнения контроля финальной сборки летательного аппарата, а также для проверки состояния после ремонта при выполнении нивелирования самолета в настоящее время применяются методы, для реализации которых необходим непосредственный контакт с измеряемыми точками: при геометрическом нивелировании необходимо устанавливать и фиксировать штангу с закрепленной рейкой на контрольных точках, а при координатоопределяющей технологии в керн необходимо устанавливать отражатель, устройства для определения положения скрытой точки, щупы (например, Leica B-Probe, Leica T-Probe).

Процесс выполнения измерений осложняется затрудненным доступом к нивелировочным точкам самолета. Как следствие, увеличивается время производства геодезических работ, а так как нивелировочные точки могут располагаться и на высоте, то процесс является небезопасным. Так же помимо непосредственного выполнения геодезических измерений, сооружение строительных лесов, обеспечивающих доступ к высокорасположенным контрольным точкам, требует дополнительного времени, что неблагоприятно сказывается на экономической составляющей процесса.

В этой связи необходимо разработать усовершенствованную методику нивелирования самолета, обеспечивающую возможность бесконтактных, безопасных и оперативных измерительных работ.

В условиях суточных и сезонных колебаний температуры в производственных помещениях необходимо учитывать данный параметр с целью достижения наивысшей точности измерений. На сегодняшнем этапе развития отрасли, как правило, всегда учитывается температура окружающего воздуха при производстве измерений, но температура объекта измерений, и, следовательно, деформации, возникающие в результате из-

менения температурных условий, либо учитываются не всегда, либо учитываются по схеме, которую невозможно применить в условиях отечественной промышленности. Для учета температурного фактора с целью повышения точности наблюдений необходимо разработать алгоритм, позволяющий фиксировать изменения геометрии объекта наблюдений в зависимости от температуры окружающей среды.

1.8 Выводы по разделу 1

1 Обоснована необходимость использования высокоточных систем контроля геометрических параметров в производстве летательных аппаратов. Это обусловлено технологическим прогрессом, включающим внедрение новых материалов, совершенствование методов соединения частей самолета, а также улучшение аэродинамических характеристик планеров.

2 Проведен анализ наиболее распространенных нарушений геометрических характеристик авиационных конструкций и их последствий.

3 Исследована технология производства летательных аппаратов, согласно которой первым этапом являются сборочные работы, в ходе которых отдельные детали формируют узлы, панели и агрегаты. Охарактеризовано многообразие сборочных приспособлений, применяемых в авиастроении, и рассмотрены различные методы сборки летательных аппаратов.

4 Проанализированы существующие методы контроля геометрических параметров объектов авиастроения, включая монтажно-фиксирующие шаблоны, инструментальные методы, а также методы, основанные на применении геодезического оборудования.

5 Изучены современные разработки в области контроля геометрических параметров. Рассмотрены состав работ и оборудование, необходимое для реализации геодезического контроля на этапах выверки элементов конструкций сборочных приспособлений и сборки летательных аппаратов.

6 Сформулированы предпосылки к совершенствованию методики контроля геометрических параметров объектов авиастроения.

Анализ состояния изученности вопроса исследования показал, что в настоящее время координатоопределяющие системы применяются на всех этапах производства летательных аппаратов. Они используются при монтаже и выверке сборочных приспособлений, при периодическом контроле их состояния и геометрических параметров, а также в процессе модернизации производства с целью перехода от жестких носителей форм к электронным моделям. Кроме того, координатные системы находят применение в производстве, ремонте, модернизации и реконструкции летательных аппаратов.

Таким образом из проведенного анализа следует, что тема «Геодезическое обеспечение контроля геометрических параметров изделий авиастроения с применением прецизионных координатных систем» крайне актуальна.

2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1 Классификация геодезических сетей специального назначения

В первом разделе было установлено, что в авиационной промышленности конструктивные особенности летательных аппаратов (прежде всего их размер), а также причины, вызванные организационно-экономическими аспектами, обуславливают необходимость членения самолета при его проектировании и дальнейшем производстве. Схема членения планера самолета представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема членения планера

В современном авиастроении процессы проектирования и конструирования летательных аппаратов, а также сборочных приспособлений, необходимых для их производства, преимущественно осуществляются с применением методов трехмерного компьютерного моделирования. Одним из ключевых аспектов при этом является обеспечение точного соответствия геометрических параметров компонентов, изготавливаемых на различных предприятиях авиационной промышленности, с последующей их сборкой в единое изделие.

Для достижения данной цели при проектировании и изготовлении используется единая система координат (СК), метод задания которой представлен на рисунке 2.2.

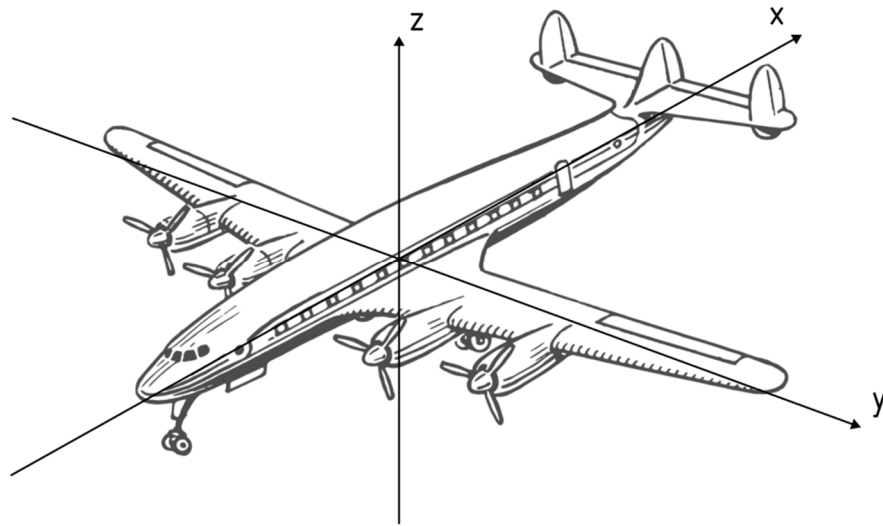


Рисунок 2.2 – Направление осей в системе координат летательного аппарата

Известно, что допустимые значения отклонений от проектных значений при сборке разных компонентов летательного аппарата различны: от $\pm 0,5$ мм до $\pm 10,0$ мм. Из этого следует, что точность оборудования, применяемого для геометрического контроля при монтаже и юстировке, также будет различаться: от $\pm 0,2$ мм до $\pm 3,3$ мм.

В этой связи предлагается классифицировать объекты авиастроения по уровню точности, необходимому для контроля их геометрических параметров, выделяя три основные категории.

1 Высокоточные (допуск на отклонение от проектного значения не превышает $\pm 1,0$ мм).

2 Точные (допуск на отклонение от проектного значения не превышает $\pm 2,0$ мм).

3 Технические (допуск на отклонение от проектного значения более $\pm 2,0$ мм).

К категории высокоточных объектов авиастроения относятся малогабаритные сборочные приспособления, предназначенные для изготовления таких элементов летательного аппарата, как люки, двери, крышки различных отсеков, антенны,

а также элементов механизации, включающих закрылки, предкрылки, интерцепторы и пр.

К категории точных объектов относятся сборочные приспособления, используемые при производстве крупных конструктивных частей летательного аппарата, таких как фюзеляж, крыло и оперение. Кроме того, к данной группе следует отнести стапели общей сборки, в которых осуществляется финальный этап сборки планеров летательных аппаратов.

К техническим объектам авиастроения относятся летательные аппараты, геометрический контроль которых осуществляется как на этапе установки отдельных компонентов (оперения, крыла, двигателей и других конструктивных элементов), так и после окончательной сборки. Основной задачей данного контроля является верификация соответствия фактической геометрии воздушного судна проектным параметрам. Кроме того, геометрический контроль выполняется при проведении ремонтных работ и в ходе технического обслуживания летательного аппарата. Его результаты позволяют подтвердить соответствие конструкции требованиям, установленным конструкторской документацией, что является необходимым условием обеспечения безопасной эксплуатации воздушного судна.

На современном этапе развития авиастроения и геодезии для контроля геометрических параметров объектов, к которым предъявляются высокие требования по точности, целесообразно использовать координатоопределяющую технологию, позволяющую с высокой точностью определять пространственное положение элементов конструкции.

Необходимо отметить, что в условиях авиастроительного производства выполнение измерений осложняется тем, что невозможно контролировать параметры с одной станции наблюдений. Это можно объяснить двумя причинами.

1 Конструктивные особенности, большие габариты объектов не обеспечивают прямой видимости на все точки, положение которых необходимо контролировать (рисунок 2.3).

2 Размер сборочного приспособления и его предназначение не подразумевают стационарное использование измерительного оборудования.

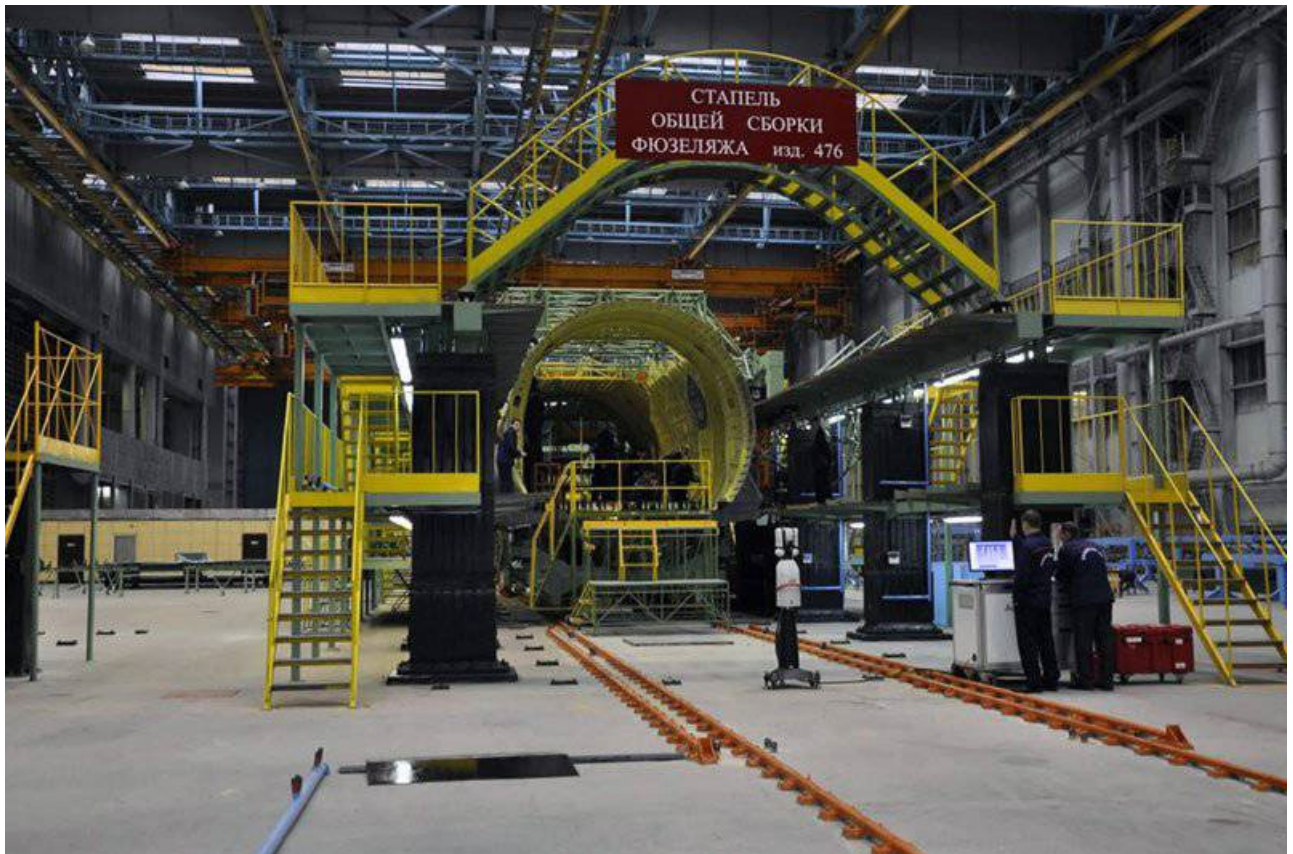


Рисунок 2.3 – Сборочное приспособление «Стапель общей сборки»
(<https://topwar.ru/10412-il-476.html>)

Следовательно, для объединения всех измерений, выполненных с разных станций, в единую систему координат необходимо создать геодезическую сеть специального назначения (ГССН).

В настоящее время не существует единого подхода, которым можно было бы руководствоваться при создании ГССН для контроля геометрических параметров разных категорий элементов. Так как геодезическим службам, выполняющим измерения, удобно было бы оперировать лишь точностью, предъявляемой для выполнения контроля и измерительным объёмом, то в целях сокращения времени, затрачиваемого на подготовительные работы, а также для обеспечения экономической эффективности необходимо выполнить оптимизацию измерительного процесса путем введения классификации геодезических сетей специального назначения. Классификация ГССН приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – 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

ГССН закрепляется посредством специальных пунктов, координаты которых определяются с высокой точностью. Эти пункты служат основой для определения пространственного положения средств измерений при последующем выполнении геодезических работ, обеспечивая точность и воспроизводимость измерительных процедур. Основным условием выбора положения пункта геодезической сети является наличие прямой видимости на него с различных станций прибора. Также следует учитывать тип конструкции, где закрепляется исходный пункт, назначение работ, требуемую точность, измерительный объем.

Геодезические сети специального назначения технического класса точности следует закреплять в цехах обслуживания летательных аппаратов, где определяется пространственное положение контрольных точек (кернов), нанесенных непосредственно на поверхности летательного аппарата.

Технические ГССН должны обеспечивать возможность позиционирования измерительного прибора с средней квадратической ошибкой, не превышающей 0,6 мм. Ключевым требованием к размещению пунктов сети является обеспечение прямой видимости не менее чем на пять пунктов с известными координатами из любой точки измерительного объема внутри производственного цеха. Это условие необходимо для повышения точности определения пространственного положения измерительных средств.

Пункты сетей технического класса точности рекомендуется закреплять на неподвижных и недеформируемых конструкциях, включая несущие элементы производственного цеха, а также на поверхности пола, при этом необходимо учитывать требования по влагозащите пунктов для обеспечения их долговременной сохранности и стабильности измерений.

Точные сети следует закреплять в цехах, где осуществляется сборка крупных агрегатов. Известно, что эти элементы собираются с использованием стапелей (рисунок 2.4), некоторые из состоят из несущих рам (1), ложементов, рубильников и прочих рабочих поверхностей (2).



1 – несущая рама; 2 – ложементы

Рисунок 2.4 – Стапель для сборки панели летательного аппарата

Точные ГССН должны обеспечивать возможность позиционирования измерительного прибора со средней квадратической ошибкой, не превышающей 0,3 мм.

Поскольку на данных объектах положение устанавливаемых рабочих элементов постоянно изменяется, то с каждой возможной станции геодезического прибора

должна быть видимость не менее 10 пунктов ГССН с известными координатами для избыточности измерений и уменьшения ошибки позиционирования прибора.

Пункты точной геодезической сети следует закреплять на недеформируемых и устойчивых основаниях рамы стапеля, на ее несущих конструкциях, а также возможно закрепление пунктов на несущих конструкциях соседних стапелей и самого цеха.

Высокоточные геодезические сети специального назначения следует закреплять на поверхностях сборочной оснастки, предназначенной для сборки малогабаритных агрегатов и узлов. Данная сборочная оснастка обладает сравнительно малыми размерами (от 300 мм до 7 000 мм) и небольшим весом. Данные условия делают возможным транспортировку сборочной оснастки как во время изготовления оснастки, так и в процессе эксплуатации (сборка узлов и агрегатов). Таким образом, развитие геодезической сети на неподвижных элементах, не связанных непосредственно с контролируемой конструкцией, является нецелесообразным. После первого же смещения сборочного устройства связь между ним и опорной сетью будет утрачена, что приведет к необходимости повторного создания геодезической сети специального назначения. По этой причине пункты сети закрепляются непосредственно на элементах сборочной оснастки, к которым предъявляются специальные требования, обеспечивающие их стабильность, неизменность положения и возможность точного позиционирования геодезического оборудования.

Высокоточные ГССН должны обеспечивать возможность позиционирования измерительного прибора с средней квадратической ошибкой, не превышающей 0,1 мм.

С любой станции прибора вокруг данного объекта должны быть видны все пункты локальной опорной геодезической сети.

Закреплять точки на поверхности следует, учитывая условия транспортировки и хранения устройств для сборки. Они должны находиться вне зон деформационных воздействий, вызванных перемещением оснастки. Необходимо обеспечить сохранность пункта, чтобы он не был утрачен в процессе хранения. Также необходимо принять во внимание, что некоторая оснастка подвергается термическому воздей-

ствию, следовательно, конструкция пункта не должна содержать элементов, нетолерантных к высоким температурам.

2.2 Проектирование геодезической сети специального назначения

Согласно мировым стандартам авиастроения СКО определения положения контролируемой точки относительно станции (m_p) не должна превышать 33 % от поля допуска, предъявляемого на отклонения фактических геометрических параметров от проектных значений. Однако ошибка определения положения точки – это не единственный параметр, который влияет на конечное измерение: при способе свободного стационарирования СКО определения положения контролируемой точки также зависит от СКО определения положения станции. СКО определения положения точки можно выразить формулой:

$$m_{xyz} = \sqrt{m_i^2 + m_p^2}, \quad (2.1)$$

где m_{xyz} – СКО определения положения точки с учетом всех факторов; m_i – СКО определения положения станции.

В свою очередь, на определение положения геодезического прибора в пространстве будут оказывать влияние геометрические характеристики геодезической сети, погрешности, возникшие в ходе ее создания и уравнивания, стабильность пунктов геодезической и единообразие центрирования визирной цели на пункты геодезической сети. В таком случае СКП определения положения точки можно выразить формулой:

$$m_{xyz} = \sqrt{m_i^2 + m_p^2 + m_{targ}^2}, \quad (2.2)$$

где m_{targ} – СКО центрирования визирной цели на пункт.

2.1.1 Типы пунктов геодезических сетей специального назначения

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 рисок;
- 4) светоотражающие марки.

SCRT отражатель (рисунок 2.5, *а*) – отражатель, встроенный либо в стену помещения, где производится сборка летательного аппарата, либо непосредственно в раму оснастки.

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

- 1) накладные;
- 2) углубленные.

К первым можно отнести накладные подставки фирмы Brunson (рисунок 2.5, *б*), неодимовые магниты (рисунок 2.5, *в*), стальные шайбы с отверстием (рисунок 2.5, *г*). Ко второй группе относятся конические и цилиндрические отверстия, обеспечивающие единообразную установку сферического отражателя.

Координаты пунктов, закрепленных в виде кернов и рисок, восстанавливаются различными способами в зависимости от типа поверхности, где находится керн. Если поверхность является плоскостью, то можно использовать специальную оснастку (рисунок 2.5, *д*), если поверхность криволинейная, координаты центра керна можно определить с использованием щупов (рисунок 2.5, *е*), а также различных жезлов скрытых точек.

Для выполнения измерений с использованием высокоточного роботизированного тахеометра, как правило, используются светоотражающие марки (рисунок 2.5, *ж*).

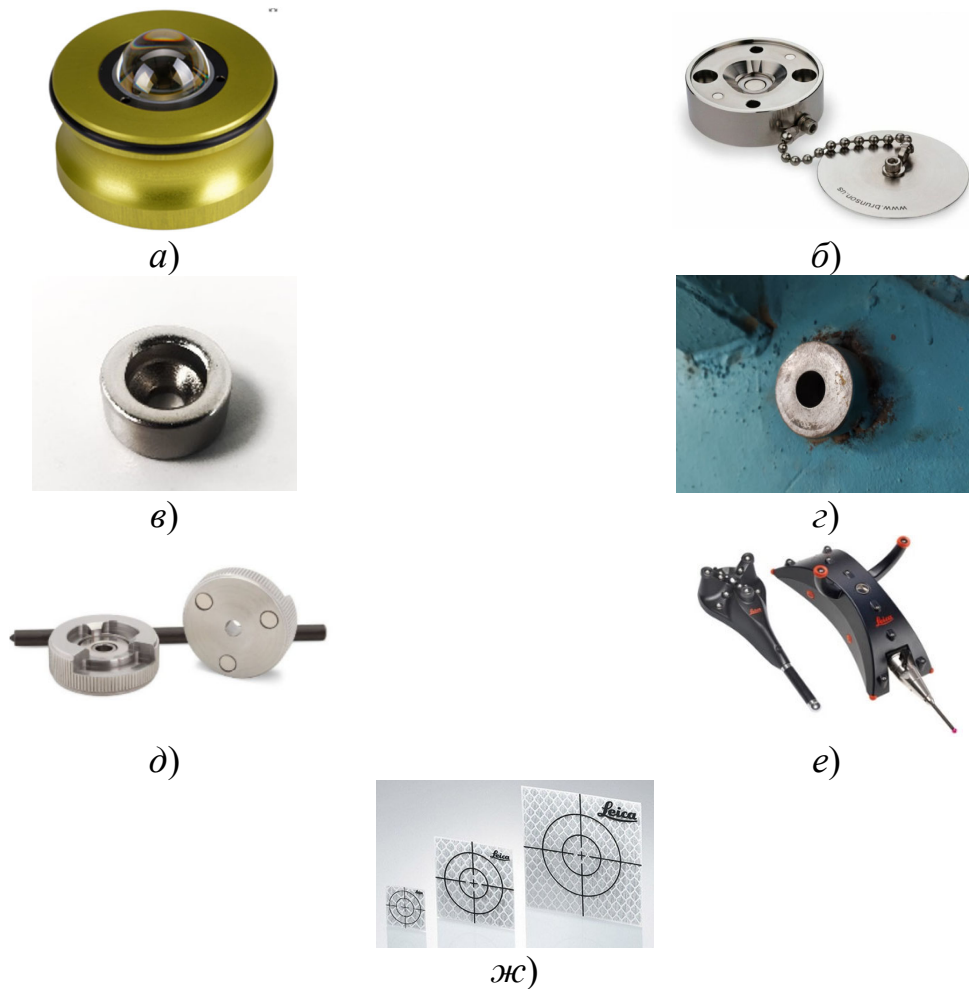


Рисунок 2.5 – Способы закрепления пунктов ГССН

2.1.2 Определение СКО центрирования визирной цели. Классификация и закрепление пунктов ГССН

При выборе типа пунктов для закрепления ГССН соответствующего класса точности предлагается руководствоваться двумя основными критериями: стабильностью основания, где закреплена точка с известными координатами, и единообразием центрирования визирной цели. Для оценки стабильности центрирования предполагается, что точка остается неизменной во времени и пространстве. В связи с этим для обоснованного выбора метода закрепления пунктов каждого класса ГССН 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 по формулам:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \sum \frac{X_i}{n} \\ \bar{Y} &= \sum \frac{Y_i}{n}, \\ \bar{Z} &= \sum \frac{Z_i}{n}\end{aligned}\quad (2.3)$$

где $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ – средние значения пространственного положения визирной цели; X_i, Y_i, Z_i – значения, вычисленные в результате отдельного измерения; n – количество измерений;

$$\begin{aligned}d_x &= X_i - \bar{X} \\ d_y &= Y_i - \bar{Y}, \\ d_z &= Z_i - \bar{Z}\end{aligned}\quad (2.4)$$

где d_x, d_y, d_z – отклонение значения каждой отдельной координаты от среднего значения;

$$d_{targ} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}. \quad (2.5)$$

Выборки, состоящие из измеренных данных для расчета СКО центрирования визирной цели с использованием различных типов пунктов, представлены в таблицах 2.2–2.6.

Таблица 2.2 – Выборка для расчета СКО центрирования визирной цели на пункты для установки отражателей (цилиндрические отверстия)

N п/п	X , мм	Y , мм	Z , мм	dx , мм	dy , мм	dz , мм	d_{targ} , мм
1	3061.13	2778.43	-621.36	0.01	-0.02	0.01	0.03
2	3061.13	2778.45	-621.37	0.01	0.00	0.01	0.01
3	3061.12	2778.46	-621.35	0.00	0.01	0.02	0.02
4	3061.12	2778.43	-621.36	0.00	-0.01	0.02	0.02
5	3061.12	2778.46	-621.37	0.00	0.01	0.01	0.02
6	3061.12	2778.46	-621.37	-0.01	0.01	0.00	0.01
7	3061.13	2778.46	-621.36	0.01	0.01	0.01	0.02
8	3061.10	2778.47	-621.36	-0.02	0.02	0.02	0.03
9	3061.13	2778.45	-621.37	0.01	0.00	0.00	0.01
10	3061.12	2778.46	-621.37	0.00	0.01	0.00	0.01

Окончание таблицы 2.2

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
11	3061.12	2778.46	-621.36	0.00	0.01	0.01	0.02
12	3061.12	2778.46	-621.36	0.00	0.01	0.01	0.02
13	3061.12	2778.46	-621.37	0.00	0.01	0.01	0.01
14	3061.11	2778.45	-621.39	-0.01	0.00	-0.02	0.02
15	3061.11	2778.46	-621.38	-0.01	0.01	-0.01	0.02
16	3061.11	2778.45	-621.39	-0.01	0.01	-0.02	0.02
17	3061.12	2778.46	-621.38	-0.01	0.01	0.00	0.01
18	3061.12	2778.46	-621.35	0.00	0.01	0.03	0.03
19	3061.11	2778.46	-621.36	-0.01	0.01	0.02	0.02
20	3061.13	2778.43	-621.38	0.01	-0.02	-0.01	0.03
21	3061.12	2778.46	-621.37	0.00	0.01	0.00	0.01
22	3061.12	2778.46	-621.38	0.00	0.01	0.00	0.01
23	3061.12	2778.45	-621.38	0.00	0.01	-0.01	0.01
24	3061.12	2778.44	-621.38	-0.01	-0.01	0.00	0.01
25	3061.12	2778.45	-621.39	0.00	0.00	-0.02	0.02
26	3061.12	2778.45	-621.39	0.00	0.00	-0.01	0.01
27	3061.12	2778.41	-621.39	0.00	-0.04	-0.02	0.05
28	3061.12	2778.40	-621.39	0.00	-0.05	-0.02	0.05
29	3061.12	2778.45	-621.40	0.00	0.00	-0.02	0.02
30	3061.12	2778.45	-621.38	0.00	0.00	-0.01	0.01
31	3061.13	2778.44	-621.40	0.01	-0.01	-0.02	0.03

Таблица 2.3 – Выборка для расчета СКО центрирования визирной цели на пункты в виде стальной шайбы

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
1	3061.09	2777.77	-614.09	-0.02	0.00	0.00	0.02
2	3061.07	2777.78	-614.11	-0.03	0.02	-0.02	0.04
3	3061.07	2777.78	-614.10	-0.03	0.01	-0.01	0.04
4	3061.07	2777.78	-614.08	-0.03	0.02	0.01	0.04
5	3061.09	2777.77	-614.09	-0.01	0.01	0.00	0.01
6	3061.08	2777.77	-614.08	-0.02	0.01	0.00	0.02
7	3061.10	2777.76	-614.09	0.00	0.00	0.00	0.01
8	3061.09	2777.77	-614.11	-0.01	0.00	-0.02	0.03
9	3061.10	2777.76	-614.09	0.00	0.00	-0.01	0.01
10	3061.10	2777.76	-614.10	0.00	0.00	-0.01	0.01
11	3061.10	2777.77	-614.09	0.00	0.00	0.00	0.00
12	3061.11	2777.76	-614.09	0.01	-0.01	0.00	0.01
13	3061.12	2777.76	-614.07	0.02	-0.01	0.02	0.03
14	3061.11	2777.76	-614.10	0.01	0.00	-0.01	0.01

Окончание таблицы 2.3

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
15	3061.11	2777.76	-614.09	0.01	0.00	0.00	0.01
16	3061.10	2777.77	-614.07	0.00	0.01	0.01	0.02
17	3061.12	2777.76	-614.10	0.01	-0.01	-0.02	0.02
18	3061.10	2777.76	-614.11	0.00	0.00	-0.03	0.03
19	3061.11	2777.76	-614.09	0.01	0.00	0.00	0.01
20	3061.11	2777.76	-614.10	0.01	0.00	-0.01	0.01
21	3061.11	2777.75	-614.09	0.00	-0.01	0.00	0.01
22	3061.10	2777.77	-614.08	0.00	0.00	0.00	0.01
23	3061.10	2777.76	-614.06	0.00	0.00	0.03	0.03
24	3061.13	2777.75	-614.07	0.02	-0.01	0.01	0.03
25	3061.12	2777.76	-614.07	0.02	0.00	0.02	0.03
26	3061.14	2777.75	-614.09	0.04	-0.02	-0.01	0.04
27	3061.14	2777.75	-614.06	0.04	-0.01	0.02	0.04
28	3061.11	2777.76	-614.09	0.01	0.00	0.00	0.01
29	3061.10	2777.77	-614.07	-0.01	0.01	0.02	0.02
30	3061.10	2777.76	-614.08	-0.01	0.00	0.01	0.01

Таблица 2.4 – Выборка для расчета СКО центрирования визирной цели на пункты в виде неодимового магнита

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
1	4927.05	216.60	-660.72	-0.01	-0.03	-0.01	0.03
2	4927.03	216.73	-660.69	-0.02	0.11	0.01	0.11
3	4927.04	216.61	-660.72	-0.02	-0.01	-0.02	0.03
4	4927.02	216.66	-660.69	-0.04	0.03	0.02	0.05
5	4927.06	216.61	-660.71	0.00	-0.02	0.00	0.02
6	4927.03	216.62	-660.70	-0.02	-0.01	0.00	0.02
7	4927.05	216.60	-660.69	-0.01	-0.03	0.01	0.03
8	4927.08	216.58	-660.69	0.02	-0.05	0.01	0.05
9	4927.03	216.66	-660.70	-0.03	0.03	0.00	0.04
10	4927.02	216.63	-660.70	-0.04	0.00	0.00	0.04
11	4927.07	216.63	-660.71	0.01	0.01	-0.01	0.01
12	4927.05	216.63	-660.69	-0.01	0.00	0.01	0.01
13	4927.05	216.70	-660.69	-0.01	0.07	0.01	0.07
14	4927.06	216.65	-660.71	0.01	0.02	0.00	0.03
15	4927.09	216.62	-660.69	0.03	0.00	0.01	0.03
16	4927.07	216.64	-660.71	0.02	0.02	0.00	0.03
17	4927.07	216.63	-660.72	0.02	0.01	-0.01	0.02
18	4927.06	216.62	-660.69	0.00	-0.01	0.01	0.01
19	4927.08	216.60	-660.71	0.02	-0.02	-0.01	0.03
20	4927.07	216.64	-660.69	0.01	0.02	0.01	0.02

Окончание таблицы 2.4

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
21	4927.05	216.61	-660.71	0.00	-0.01	-0.01	0.01
22	4927.07	216.61	-660.71	0.01	-0.02	0.00	0.02
23	4927.08	216.61	-660.72	0.02	-0.01	-0.02	0.03
24	4927.06	216.58	-660.70	0.01	-0.05	0.00	0.05
25	4927.06	216.58	-660.71	0.01	-0.04	0.00	0.04
26	4927.07	216.65	-660.70	0.01	0.02	0.00	0.02
27	4927.05	216.63	-660.70	0.00	0.00	0.01	0.01
28	4927.04	216.60	-660.71	-0.01	-0.02	0.00	0.03
29	4927.07	216.61	-660.72	0.02	-0.01	-0.01	0.03
30	4927.06	216.62	-660.69	0.00	-0.01	0.01	0.01

Таблица 2.5 – Выборка для расчета СКО центрирования визирной цели на пункты фирмы Brunson

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
1	4912.07	395.63	-658.87	0.01	0.00	-0.01	0.02
2	4912.06	395.65	-658.87	0.01	0.01	-0.01	0.02
3	4912.07	395.65	-658.87	0.01	0.01	-0.01	0.02
4	4912.06	395.63	-658.87	0.01	0.00	-0.01	0.01
5	4912.07	395.62	-658.87	0.01	-0.01	-0.01	0.02
6	4912.04	395.64	-658.86	-0.01	0.00	0.00	0.01
7	4912.05	395.64	-658.87	0.00	0.00	-0.01	0.01
8	4912.05	395.63	-658.86	0.00	0.00	0.00	0.00
9	4912.05	395.64	-658.86	0.00	0.00	0.00	0.00
10	4912.05	395.63	-658.86	-0.01	0.00	0.00	0.01
11	4912.05	395.64	-658.87	0.00	0.00	-0.01	0.01
12	4912.05	395.64	-658.86	0.00	0.00	0.00	0.00
13	4912.04	395.64	-658.86	-0.02	0.00	0.01	0.02
14	4911.99	395.64	-658.85	-0.06	0.00	0.01	0.06
15	4912.05	395.63	-658.85	0.00	-0.01	0.01	0.01
16	4912.05	395.64	-658.87	0.00	0.01	0.00	0.01
17	4912.06	395.64	-658.85	0.00	0.01	0.01	0.01
18	4912.05	395.65	-658.87	0.00	0.01	0.00	0.02
19	4912.06	395.64	-658.86	0.00	0.00	0.00	0.00
20	4912.05	395.64	-658.87	0.00	0.00	0.00	0.00
21	4912.05	395.64	-658.87	0.00	0.01	-0.01	0.01
22	4912.06	395.63	-658.86	0.00	-0.01	0.00	0.01
23	4912.06	395.64	-658.86	0.00	0.01	0.01	0.01
24	4912.06	395.64	-658.86	0.00	0.00	0.00	0.00
25	4912.06	395.64	-658.87	0.00	0.00	0.00	0.01
26	4912.06	395.64	-658.86	0.00	0.00	0.00	0.00

Окончание таблицы 2.5

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
27	4912.06	395.64	-658.86	0.00	0.00	0.00	0.00
28	4912.06	395.62	-658.85	0.01	-0.02	0.01	0.02
29	4912.06	395.64	-658.85	0.01	0.01	0.01	0.02
30	4912.07	395.62	-658.84	0.01	-0.01	0.02	0.03

Таблица 2.6 – Выборка для расчета СКО центрирования визирной цели на пункты в виде керн на плоскости

<i>N</i> п/п	<i>X</i> , мм	<i>Y</i> , мм	<i>Z</i> , мм	<i>dx</i> , мм	<i>dy</i> , мм	<i>dz</i> , мм	<i>dtarg</i> , мм
kern_1	4702.58	231.70	-658.28	-0.04	-0.07	0.00	0.08
kern_2	4702.61	231.73	-658.28	-0.01	-0.04	0.00	0.04
kern_3	4702.65	231.76	-658.29	0.03	-0.01	-0.01	0.04
kern_4	4702.64	231.84	-658.27	0.02	0.07	0.00	0.07
kern_5	4702.61	231.73	-658.28	-0.01	-0.04	0.00	0.04
kern_6	4702.63	231.80	-658.28	0.01	0.03	0.00	0.03
kern_7	4702.55	231.70	-658.27	-0.07	-0.07	0.00	0.10
kern_9	4702.65	231.71	-658.22	0.03	-0.07	0.06	0.09
kern_10	4702.62	231.78	-658.30	0.00	0.01	-0.02	0.02
kern_11	4702.65	231.80	-658.29	0.03	0.03	-0.01	0.04
kern_12	4702.63	231.67	-658.26	0.01	-0.10	0.02	0.10
kern_13	4702.64	231.78	-658.28	0.02	0.01	0.00	0.02
kern_14	4702.64	231.79	-658.27	0.02	0.02	0.00	0.03
kern_15	4702.63	231.82	-658.31	0.01	0.05	-0.03	0.06
kern_16	4702.59	231.78	-658.29	-0.02	0.01	-0.01	0.03
kern_17	4702.58	231.83	-658.26	-0.04	0.05	0.02	0.07
kern_18	4702.64	231.82	-658.27	0.02	0.05	0.00	0.05
kern_19	4702.57	231.78	-658.28	-0.05	0.00	-0.01	0.05
kern_20	4702.63	231.76	-658.27	0.01	-0.01	0.01	0.02
kern_21	4702.63	231.80	-658.29	0.01	0.03	-0.01	0.03
kern_22	4702.59	231.76	-658.26	-0.03	-0.02	0.01	0.03
kern_23	4702.61	231.75	-658.26	-0.01	-0.02	0.02	0.03
kern_24	4702.59	231.79	-658.27	-0.03	0.02	0.01	0.04
kern_25	4702.64	231.76	-658.27	0.02	-0.01	0.00	0.03
kern_26	4702.63	231.79	-658.31	0.01	0.02	-0.03	0.04
kern_27	4702.61	231.82	-658.29	-0.01	0.04	-0.01	0.04
kern_28	4702.63	231.78	-658.32	0.01	0.01	-0.04	0.04
kern_29	4702.67	231.78	-658.27	0.05	0.01	0.01	0.05

Результаты выполненных расчетов представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – 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

Анализируя полученные результаты, можно сделать 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.

2.3 Построение геодезической сети специального назначения

В настоящее время осуществление геометрического контроля крупногабаритных изделий, при котором требуется выполнять работы с различных станций наблюдений, осложняется следующими факторами.

1 Геометрия существующей сети не позволяет обеспечить позиционирование измерительного прибора с необходимой точностью по причине, например, малых (до 30°) и больших (от 150°) углов обратной линейно-угловой засечки.

2 Отсутствие видимости на необходимое количество пунктов с известными координатами.

3 Ошибки в исходных данных (координатах пунктов), повышающие ошибку позиционирования прибора в пространстве.

Для решения вышеописанных проблем необходимо скорректировать и типизировать конфигурацию геодезической сети специального назначения путем увеличения количества пунктов и их размещения не только на контролируемом объекте, но и на неподвижных конструкциях цеха и соседних сборочных приспособлениях. Обеспечение видимости на достаточное количество пунктов для позиционирования прибора осуществляется посредством анализа проектной документации, чертежей и цифровых моделей, который позволяет выявить и учесть при проектировании сети конструктивные элементы, ограничивающие видимость. Минимизация ошибок в исходных данных обеспечивается за счет многократных измерений при определении координат пунктов геодезической сети с различных станций наблюдений, что способствует повышению точности их пространственного положения.

В результате анализа, проведенного во время выполнения работ в действующем промышленном цехе по контролю геометрических параметров объектов авиастроения, включающих в себя сборочные приспособления, элементы летательных аппаратов и конечную продукцию, был разработан пример технологической схемы 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.

Пример схемы построения ГССН представлен на рисунке 2.6.

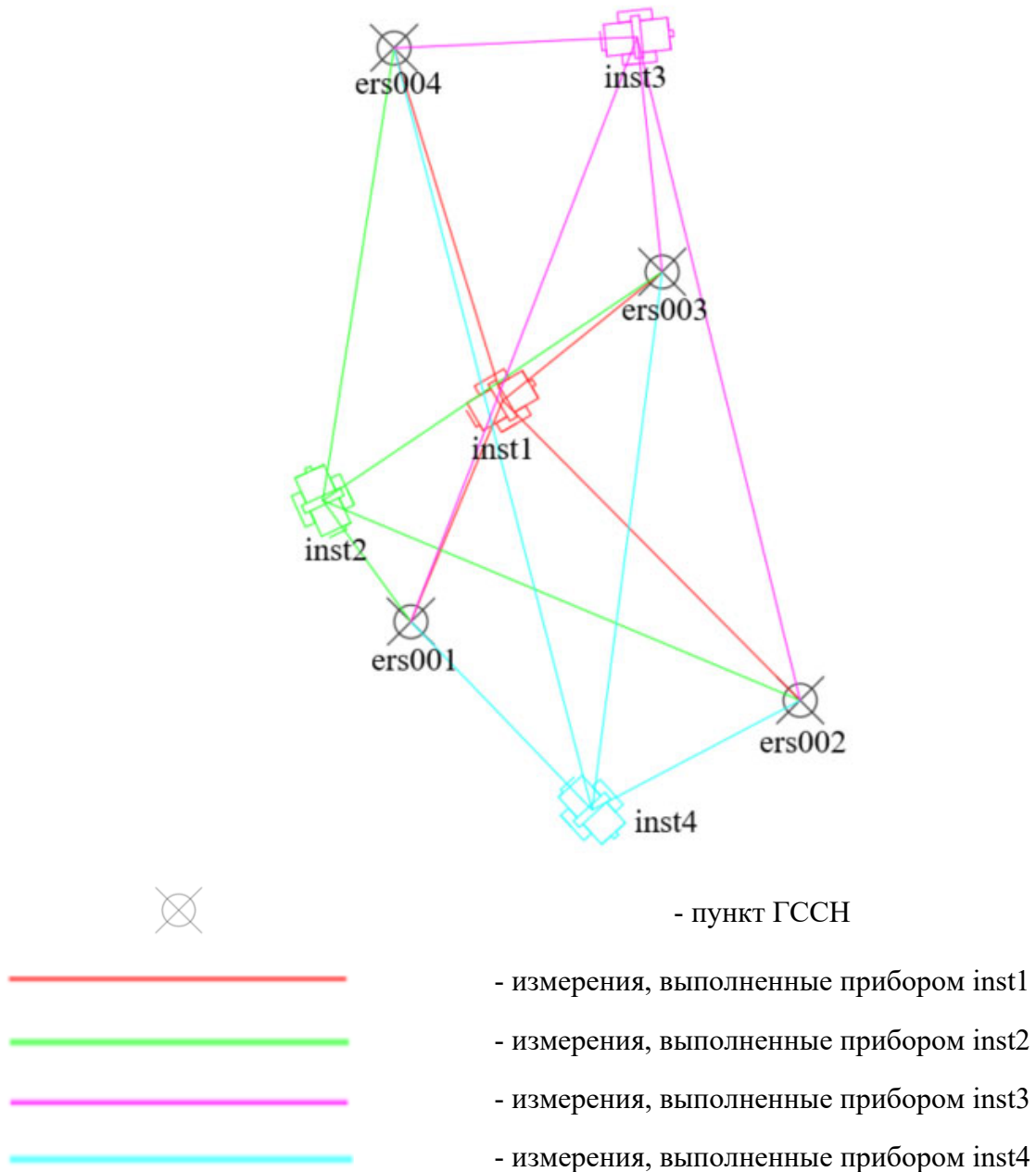


Рисунок 2.6 – Пример схемы построения ГССН

Уравнивание результатов измерений и оценка точности определения координат пунктов ГССН выполнены с использованием программного обеспечения Spatial Analyzer.

Для определения оптимальной схемы построения геодезической сети специального назначения в зависимости от числа избыточных измерений были проведены исследования, основанные на анализе различных комбинаций станций наблюдений при уравнивании. Результаты исследования приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – 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
Комбинация № 3		
inst1 + inst2 + inst3 + inst4	ers001	0,07
	ers002	0,10
	ers003	0,12
	ers004	0,10

В результате анализа полученных результатов экспериментальных исследований целесообразно сделать следующие выводы.

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

2 Несоблюдение условия выбора 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).

2.4 Выбор местоположения станции наблюдений

В процессе авиастроительного производства, включающего монтаж и выверку сборочных приспособлений, изготовление конструктивных элементов воздушного судна, финальную сборку планера и окончательную сборку летательного аппарата, видимость контрольных точек постоянно изменяется вследствие установки и демонтажа различных деталей.

Анализируя сборочные приспособления, изображенные на рисунке 2.7, можно восстановить весь перечень работ по контролю геометрических параметров, необходимый для изготовления финальной продукции (в данном случае – панели фюзеляжа).

- 1 Заложены фундаменты для рам сборочных приспособлений.
- 2 Выставлены в проектное положение рамы сборочных приспособлений.
- 3 Выставлены в проектное положение кронштейны для крепления обводообразующих элементов.
- 4 Доработаны до проектного положения поверхности ложементов.
- 5 Выполнена сборка панели фюзеляжа летательного аппарата.

Очевидно, что пункты геодезической сети специального назначения, обеспечивающие формирование единого координатного пространства и работу в общей установленной системе координат, на разных этапах закреплялись на различных конструктивных элементах. В частности, они размещались на колоннах и перекрытиях производственного цеха, в полу, на площадках оснований рам, на рамах сборочного приспособления.

При переходе на каждый последующий этап производства условия видимости пунктов геодезической сети специального назначения изменялись, что влияло на возможность использования их для позиционирования геодезического оборудования.

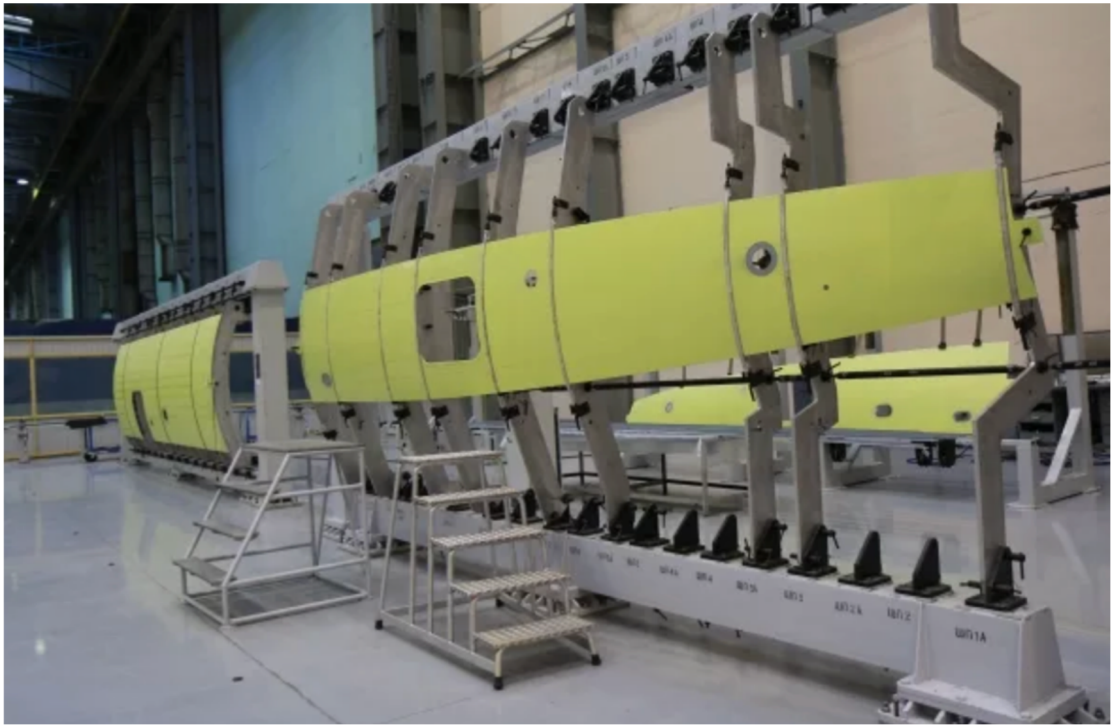


Рисунок 2.7 – Сборочное приспособление для изготовления панели фюзеляжа
(<https://rg.ru/2015/03/24/samolet-site-anons.html>)

Описанная особенность авиастроительного производства, характерная для большинства объектов авиастроения, 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 требуют гибкого подхода к проектированию сети, который учитывает этапность процессов производства.

Как отмечалось ранее, геометрическая конфигурация геодезической сети специального назначения, достаточное количество пунктов и их стабильность являются факторами, определяющими ошибку положения станции наблюдений. Ошибка, с которой определено положение геодезического прибора, влияет на точность дальнейших наблюдений и, как следствие, на качество выполняемых технологических операций и конечной продукции. В этой связи для обеспечения требуемой точности геодезических работ в авиастроении процесс определения положения станции должен обладать высокой надежностью и устойчивостью к возможным ошибкам.

Для решения данной задачи разработан алгоритм, позволяющий минимизировать погрешность определения положения измерительного оборудования, зависящую от конфигурации геодезической сети специального назначения.

1 Внесение в базу координат (X, Y, Z) пунктов геодезической сети специального назначения.

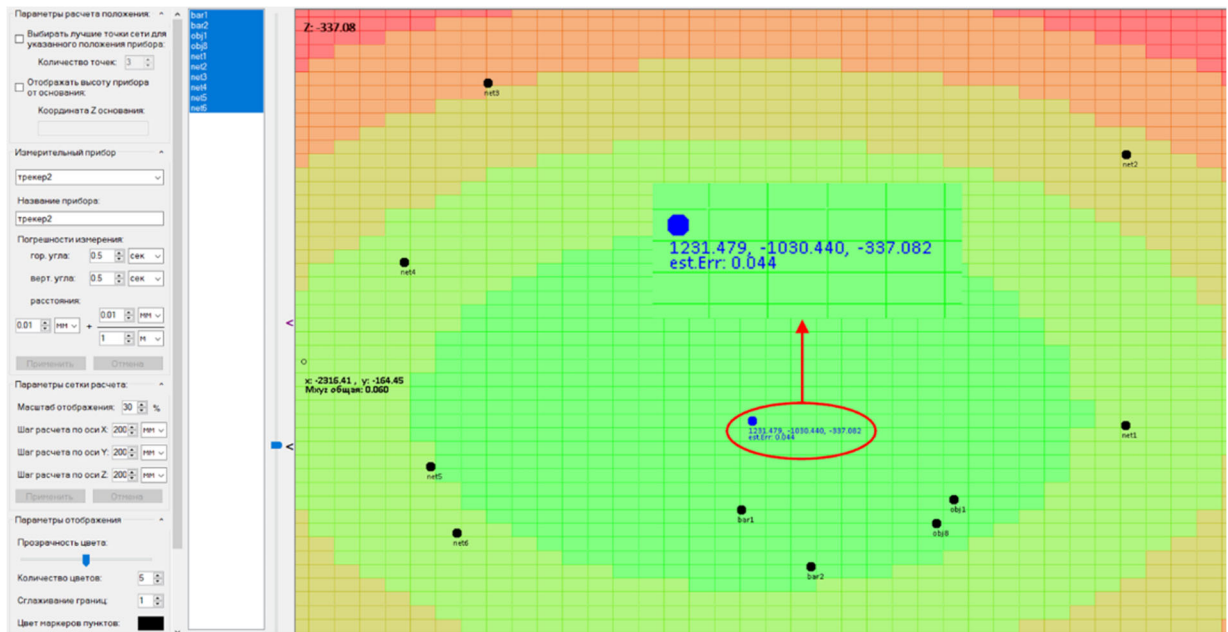
2 Оценка условий видимости пунктов сети перед началом измерительных работ.

2.1 При наличии видимости на все пункты ГССН выполняется расчет СКО определения положения станции наблюдений в пространстве (est.Err). Расчет осуществляется с учетом геометрии геодезической сети специального назначения и точностных характеристик применяемого оборудования (СКО измерения вертикального и горизонтального углов, СКО измерения расстояний). Для вычисления СКО положения станции наблюдений в пространстве используются выражения:

$$\begin{aligned}
 m_X &= \sqrt{(\cos v \cos \beta)^2 m_S^2 + (S \cos v \cos \beta)^2 \left(\frac{m_v}{\rho}\right)^2 + (S \cos v \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2}; \\
 m_Y &= \sqrt{(\cos v \sin \beta)^2 m_S^2 + (S \sin v \sin \beta)^2 \left(\frac{m_v}{\rho}\right)^2 + (S \cos v \cos \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2}; \\
 m_Z &= \sqrt{(\sin v)^2 m_S^2 + (S \cos v)^2 \left(\frac{m_v}{\rho}\right)^2}; \\
 m_P &= \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_Z^2}; \\
 m_{inst} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_{p_i}^2}{N}},
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

где m_S – СКО измерения расстояния; m_β – СКО измерения горизонтального угла; m_v – СКО измерения угла наклона; S – измеряемое расстояние (наклонное); β – горизонтальный угол; v – угол наклона; m_P – СКО определения положения пункта ГССН; m_{inst} – СКО определения положения станции наблюдений.

По результатам расчета определяются оптимальные зоны установки измерительного прибора (рисунок 2.8).



- – пункт ГССН
- – измерительный прибор

Рисунок 2.8 – Определение оптимального с точки зрения СКО положения измерительного прибора

2.2 В условиях ограниченной видимости выполняется определение доступных для наблюдений пунктов ГССН, использование которых позволяет повысить точность позиционирования измерительного прибора.

3 Выполняется расчет СКО определения положения станции наблюдений.

Если на объекте отсутствует геодезическая сеть специального назначения, то осуществляется ее проектирование с учетом пространственных ограничений (путем сопоставления плана или трехмерной компьютерной модели контролируемого объекта) и требований к точности измерений.

Описанный алгоритм можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рисунке 2.9.

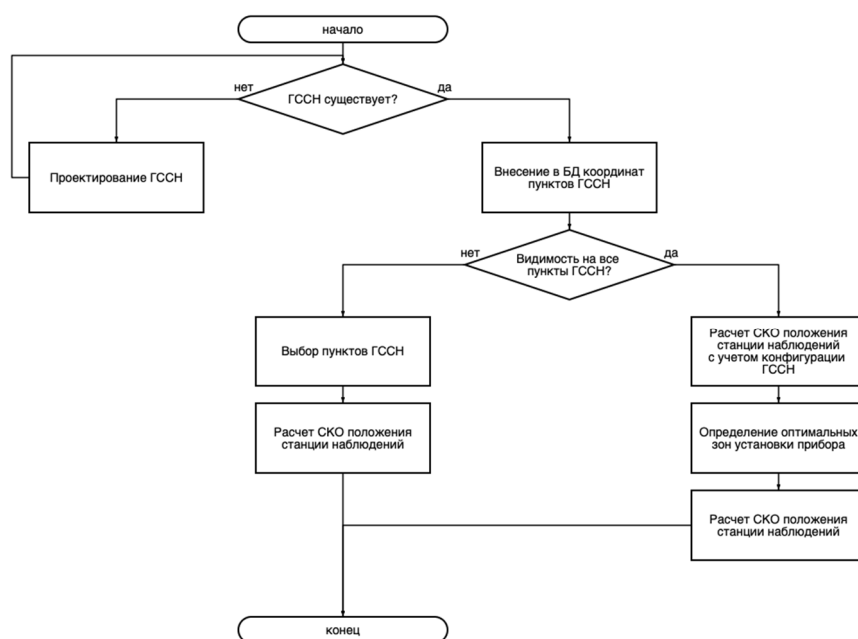


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритма

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.

2.5 Выводы по разделу 2

1 Разработана классификация объектов авиастроения, включающая сборочные приспособления, конструктивные элементы летательных аппаратов и сами летательные аппараты, основанная на допустимых отклонениях от проектных значений, которая послужила основой для дифференциации геодезических сетей специального назначения в зависимости от требуемой точности к координатному определению положения элементов.

2 Определено влияние ошибки центрирования визирной цели при установке ее на пункты геодезических сетей специального назначения на определение положения контролируемых точек. Рассмотрены различные способы закрепления геодезических сетей и определены СКО центрирования визирной цели. Разработана классификация типов пунктов геодезических сетей специального назначения.

3 Предложена методика определения координат пунктов геодезических сетей специального назначения, позволяющая уменьшить ошибку положения пунктов путем избыточных измерений, выполняемых с различных станций наблюдений определенной конфигурации.

4 Разработан алгоритм выбора расположения станции наблюдений, позволяющий определять наиболее оптимальные зоны установки геодезического оборудования в условиях существующей ГССН, оптимизировать выбор пунктов ГССН в условиях ограниченной видимости, а также позволяющий проектировать сеть с учетом требований к точности измерений и пространственным ограничениям.

На основе полученных результатов решена задача разработки технологической схемы построения геодезических сетей специального назначения с применением прецизионного геодезического оборудования для контроля геометрических параметров элементов конструкций сборочных приспособлений и летательных аппаратов.

Сформулированы следующие новые научные результаты работы:

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

2 Получены теоретические зависимости средней квадратической ошибки определения координат пунктов, исходя из конфигурации схемы ГССН, построенной в условиях промышленного цеха авиастроительного предприятия.

Сформулировано научное положение.

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 при монтаже конструкций сборочных приспособлений и сборке летательных аппаратов с заданной точностью.

Данные исследования будут основой для решения задачи учета температурного режима при контроле геометрических параметров в промышленных условиях, а также будут учтены при разработке практических рекомендаций.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО АЛГОРИТМА ПО УЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

3.1 Постановка эксперимента

Для организации контроля геометрических параметров объекта авиационной промышленности, предназначенного для сборки летательного аппарата, была создана геодезическая сеть специального назначения, включающая 213 пунктов. Пункты были закреплены с использованием стальных шайб на рамах и основаниях сборочного приспособления, а также на колоннах и в полу производственного помещения. Данная сеть обеспечивала возможность выполнения измерения в рабочем объеме, составляющем 500 м³.

В ходе полевых работ было выявлено, что пространственное положение пунктов изменяется в диапазоне от 0,50 до 2,50 мм в зависимости от сезонных температурных колебаний. По этой причине геодезическая сеть, созданная летом 2018 г. при температуре 28 °С для монтажа и выверки стапеля, а также для дальнейшего контроля геометрических параметров при сборке элементов летательного аппарата, не обеспечила требуемой точности позиционирования измерительного прибора в зимний период 2019 г. при температуре 12 °С. Это обусловлено тем, что возникающие ошибки определения пространственного положения измерительного прибора превышали допустимые отклонения геометрии элементов сборочного приспособления более чем в три раза.

На производственных предприятиях решение данной проблемы осуществляется следующими способами.

1 Исключение нестабильных пунктов при определении положения прибора в пространстве. Определение нестабильности пункта выполняется, как правило, путем многократных наблюдений с различных станций и анализа при расчете местоположения прибора.

2 Выполнение повторного цикла координирования всех пунктов геодезической сети специального назначения, включающее в себя полевые работы, обработку результатов наблюдений и их уравнивание.

Однако оба описанных подхода имеют существенные недостатки. В случае исключения пунктов методом подбора есть вероятность, что деформации, которые произошли в одном направлении и на одинаковую величину, могут быть не замечены, и будет предполагаться, что данные пункты стабильны. Повторное координирование всех пунктов ГССН требует значительных временных затрат, что снижает экономическую и производственную эффективность производства. Это, в свою очередь, увеличивает стоимость изделия и удлиняет его производственный цикл.

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 в пространстве, что недопустимо при прецизионном контроле геометрических параметров объектов авиастроения.

Влияние температуры при выполнении высокоточных измерений является предметом исследований многих ученых – Jelena Gucevic, Stefan Miljkovic, Siniša Delcev, Vukan Ogrizovic [102]. Также проводились исследования, где изучалось поведение различных конструкций при изменении их температуры и описывались способы регистрации возникших деформаций [132]. Однако ошибкам, возникающим при определении положения прибора путем позиционирования относительно пунктов геодезической сети, уделено крайне мало внимания [142, 137].

Программное обеспечение SpatialAnalyzer обладает инструментом, позволяющим учесть температурное расширение объектов.

Любой объект можно масштабировать на произвольную величину. В результате получается объект, который увеличился или уменьшился на соответствующий масштабный коэффициент.

Для масштабирования можно использовать два различных метода:

– расчет коэффициента на основе существующих программных алгоритмов. При использовании этой опции необходимо выбрать материал, начальную и конечную температуру, а программное обеспечение рассчитывает коэффициент масштабирования автоматически, используя уравнение линейного теплового расширения;

– введение масштабного коэффициента, рассчитанного на основе выполненного анализа, вручную.

Пример диалогового окна приведен на рисунке 3.1.

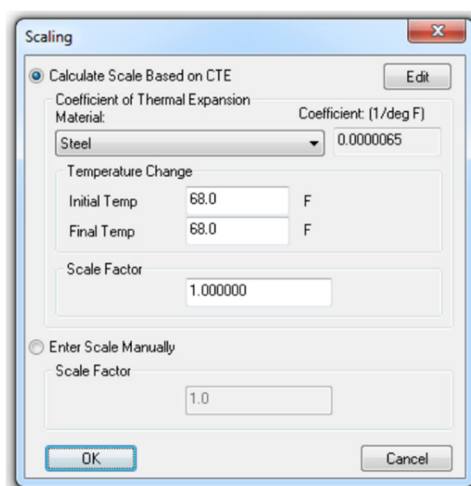


Рисунок 3.1 – Пример диалогового окна для учета температурной деформации

Однако реализованный в ПО алгоритм подразумевает, что исследуемый объект является однородной конструкцией и все точки его поверхности смещаются по одному закону.

Важно отметить, что выявленные на объекте смещения характеризовались разнонаправленностью и отличной друг от друга скоростью деформаций. Таким образом, максимальное зафиксированное смещение пунктов, закрепленных в первом секторе объекта, составило 2,31 мм, а у пунктов, закрепленных в четвертом секторе, было не более 0,83 мм.

Различия в величинах и направлениях смещений пунктов ГССН можно объяснить неоднородностью закрепления конструкций объекта, где они расположены. В частности, одни элементы зафиксированы посредством сварки, другие – с использованием болтовых и клепочных соединений, третьи – с применением цементирования. Кроме того, пункты расположены на разной высоте, что также сказывается на неравномерности деформационных процессов. Из этого можно сделать выводы о том, что изменение положения пунктов ГССН происходит по разным сценариям.

На основании вышеизложенного было выдвинуто предположение о том, что пространственное положение пунктов геодезических сетей специального назначения 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.

3.2 Проведение экспериментальных исследований

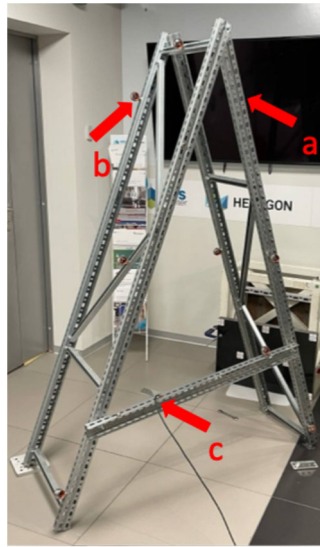
Для решения данной задачи был проведен эксперимент в лабораторных условиях, целью которого являлась оценка деформаций точек геодезической сети специального назначения, закрепленных на тест-объекте, представляющем собой металлическую конструкцию, элементы которой соединены различными способами: посредством болтовых и клепочных соединений, сварки. Также тестовый объект был неоднороден по материалу производства: часть элементов была изготовлена из нержавеющей стали, часть – из алюминия. Конструкция была надежно закреплена в лаборатории.

На тестовом объекте было установлено 8 пунктов геодезической сети специального назначения, выполненных в виде неодимовых магнитов. На каждом из них размещались сферические уголкового отражатели Leica RRR 1.5, ориентированные на прибор. В течение всего периода проведения эксперимента отражатели оставались неподвижными и не снимались с тест-объекта, что позволило исключить ошибку центрирования визирной цели на пункте.

Во время эксперимента контролировалась температура:

- окружающего воздуха;
- исследуемого объекта.

Для контроля температуры использовалась метеорологическая станция и контактные щупы. Все описанные элементы представлены на рисунке 3.2. Схема расположения отражателей представлена на рисунке 3.3.



a – тест-объект; b – пункты ГССН; c – термощуп

Рисунок 3.2 – Исследуемый объект

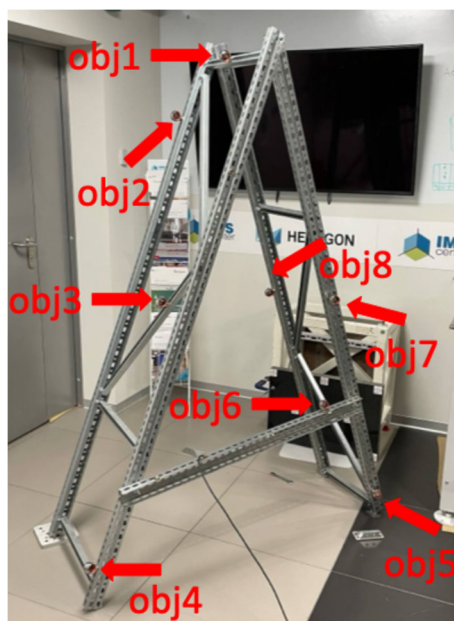


Рисунок 3.3 – Схема расположения отражателей

Наблюдения проводились с использованием абсолютного лазерного трекера Leica AT403, установленного на деревянный штатив (рисунок 3.4). Использование деревянного штатива позволило минимизировать влияние температурных изменений на положение прибора при проведении измерений на протяжении всего эксперимента.



Рисунок 3.4 – Пример установки прибора

Однако при проведении измерений в условиях быстро изменяющейся температуры было зафиксировано изменение положения прибора. Для обеспечения выполнения всех измерений в единой системе координат и переопределения положения прибора была создана опорная геодезическая сеть. Пункты данной сети, характеризующиеся высокой стабильностью при изменении температурного режима, были закреплены в стенах лаборатории с использованием анкеров (b), на которые установлены отражатели (a) (рисунок 3.5).



a – сферический отражатель, b – анкер, заложенный в конструкцию сооружения

Рисунок 3.5 – Опорная сеть

Для контроля измерений, выполняемых лазерным трекером (постоянство и корректность дальномерного и угломерного блоков), использовался масштабный жезл (а), на концах которого установлены сферические отражатели (b) (рисунок 3.6). Масштабный жезл – это высокоточная оснастка, позволяющая проконтролировать заявленную точность измерений, выполняемых прибором. Жезл изготовлен из термостабильного материала – инвара, который имеет низкий коэффициент теплового расширения, что обеспечивает неизменность длины жезла, необходимую для проведения эксперимента. Длина жезла – 1 000 мм ± 0,007 мм (https://shop.hexagonmi.com/na/en_US/USD/Catalog/Laser-Tracker/Calibration-Artifacts/MAC55-Invar-Reference-Bar%2C-1000-mm/p/576893).



Рисунок 3.6 – Масштабный жезл (а), сферические отражатели (b)

В ходе эксперимента температура в лабораторном помещении изменялась 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). Измерения проводились в автоматизированном режиме с интервалом 10 минут.

Результаты измерений, характеризующие смещения пунктов, представлены в таблицах 3.1–3.8, а также визуализированы на графиках на рисунках 3.7–3.30.

Таблица 3.1 – Смещение пункта obj1 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
1	24,8	0,00	0,00	0,00
2	23,3	0,00	0,01	0,01
3	19,0	0,00	0,00	0,01
4	15,5	0,01	0,01	0,02
5	9,7	-0,01	-0,01	0,05
6	7,1	0,00	0,00	0,21
7	5,7	-0,02	0,00	0,31
8	4,6	0,00	0,00	0,43
9	3,9	-0,02	0,01	0,53
10	4,0	-0,01	0,00	0,55
11	4,5	0,00	-0,01	0,55
12	5,0	-0,01	0,00	0,46
13	5,3	-0,01	0,01	0,41
14	6,0	0,00	0,00	0,30
15	6,7	-0,01	0,00	0,27
16	7,0	0,00	0,00	0,21
17	7,9	0,00	-0,01	0,17
18	8,5	0,01	0,00	0,11
19	10,1	0,00	-0,01	0,10
20	10,9	0,01	0,00	0,08
21	12,5	0,01	0,00	0,08
22	14,0	0,01	0,01	0,05
23	15,2	0,01	0,00	0,05
24	15,9	0,00	0,00	0,04
25	17,0	0,00	0,00	0,04
26	18,2	0,00	0,00	0,04
27	19,1	0,00	-0,01	0,03
28	20,1	-0,01	0,00	0,03
29	20,9	0,00	0,01	0,03
30	22,0	0,00	0,00	0,03
31	22,1	0,00	0,00	0,03
32	22,8	0,00	-0,01	0,02
33	23,1	-0,01	0,00	0,03

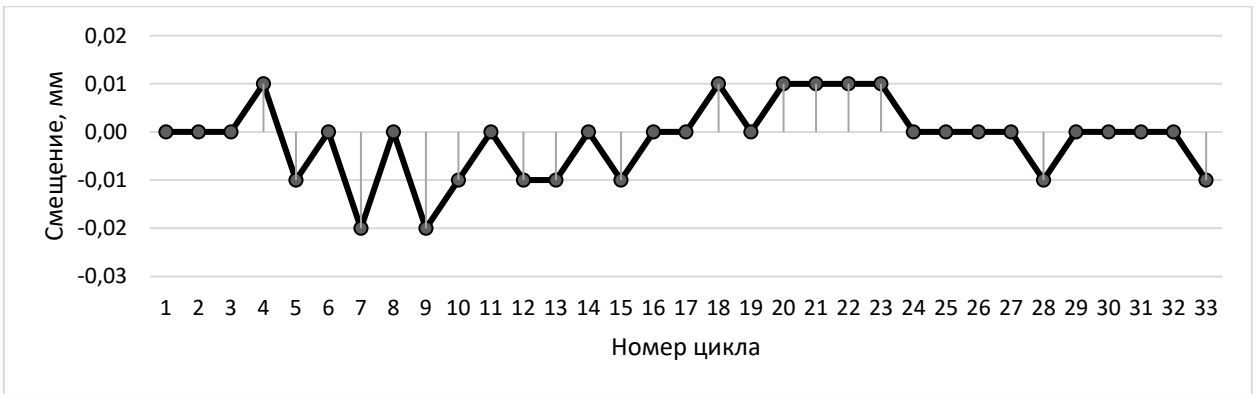


Рисунок 3.7 – График зависимости смещения пункта obj1 вдоль оси X от температуры

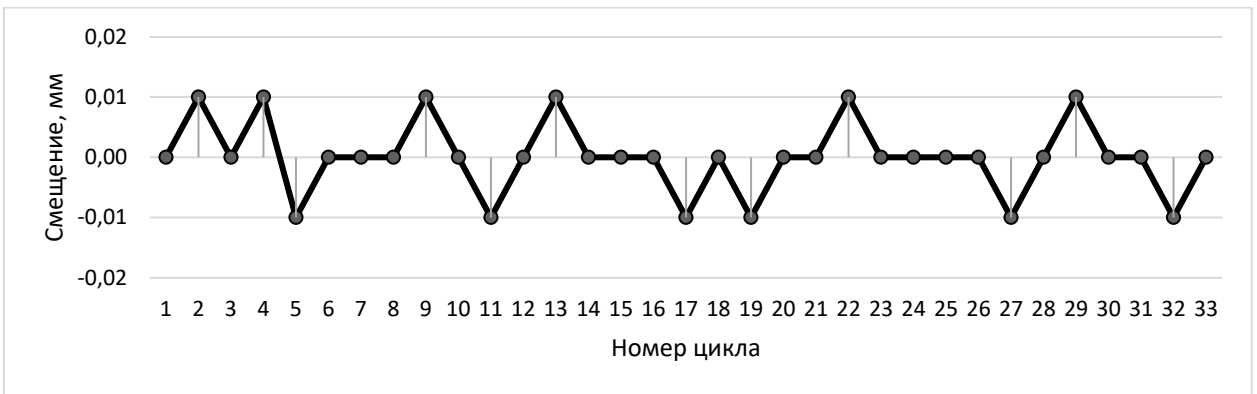


Рисунок 3.8 – График зависимости смещения пункта obj1 вдоль оси Y от температуры



Рисунок 3.9 – График зависимости смещения пункта obj1 вдоль оси Z от температуры

Таблица 3.2 – Смещение пункта obj2 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
2	23,3	0,02	0,00	0,02
3	19,0	0,02	-0,02	0,05
4	15,5	0,02	-0,04	0,10
5	9,7	0,03	-0,06	0,15
6	7,1	0,04	-0,06	0,21
7	5,7	0,06	-0,08	0,30
8	4,6	0,10	-0,08	0,44
9	3,9	0,14	-0,11	0,51
10	4,0	0,12	-0,10	0,50
11	4,5	0,11	-0,11	0,49
12	5,0	0,11	-0,09	0,41
13	5,3	0,09	-0,09	0,39
14	6,0	0,09	-0,08	0,37
15	6,7	0,08	-0,07	0,28
16	7,0	0,07	-0,08	0,22
17	7,9	0,07	-0,06	0,19
18	8,5	0,05	-0,06	0,18
19	10,1	0,05	-0,05	0,15
20	10,9	0,04	-0,04	0,14
21	12,5	0,04	-0,05	0,14
22	14,0	0,03	-0,05	0,11
23	15,2	0,03	-0,04	0,12
24	15,9	0,03	-0,03	0,11
25	17,0	0,02	-0,03	0,11
26	18,2	0,02	-0,02	0,10
27	19,1	0,01	-0,02	0,08
28	20,1	0,01	-0,02	0,09
29	20,9	0,01	-0,01	0,08
30	22,0	0,01	-0,01	0,08
31	22,1	0,01	-0,01	0,07
32	22,8	0,01	-0,02	0,06
33	23,1	0,01	-0,02	0,08



Рисунок 3.10 – График зависимости смещения пункта obj2 вдоль оси X от температуры



Рисунок 3.11 – График зависимости смещения пункта obj2 вдоль оси Y от температуры



Рисунок 3.12 – График зависимости смещения пункта obj2 вдоль оси Z от температуры

Таблица 3.3 – Смещение пункта obj3 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
1	24,8	0,00	0,00	0,00
2	23,3	0,02	0,01	0,04
3	19,0	0,02	-0,01	0,07
4	15,5	0,02	0,00	0,09
5	9,7	0,04	-0,03	0,11
6	7,1	0,12	0,00	0,16
7	5,7	0,14	0,01	0,25
8	4,6	0,14	-0,01	0,31
9	3,9	0,18	0,00	0,37
10	4,0	0,16	-0,03	0,35
11	4,5	0,16	0,02	0,36
12	5,0	0,14	0,00	0,34
13	5,3	0,14	0,00	0,32
14	6,0	0,14	0,01	0,24
15	6,7	0,14	0,02	0,18
16	7,0	0,12	0,00	0,13
17	7,9	0,12	0,00	0,11
18	8,5	0,10	-0,01	0,10
19	10,1	0,10	-0,02	0,09
20	10,9	0,08	0,00	0,08
21	12,5	0,08	0,00	0,08
22	14,0	0,08	0,01	0,07
23	15,2	0,06	0,02	0,07
24	15,9	0,06	0,00	0,06
25	17,0	0,06	-0,01	0,06
26	18,2	0,08	-0,01	0,07
27	19,1	0,04	-0,01	0,04
28	20,1	0,06	-0,01	0,05
29	20,9	0,06	0,01	0,04
30	22,0	0,04	0,00	0,04
31	22,1	0,06	-0,01	0,04
32	22,8	0,06	-0,01	0,03
33	23,1	0,04	-0,01	0,04



Рисунок 3.13 – График зависимости смещения пункта obj3 вдоль оси X от температуры



Рисунок 3.14 – График зависимости смещения пункта obj3 вдоль оси Y от температуры

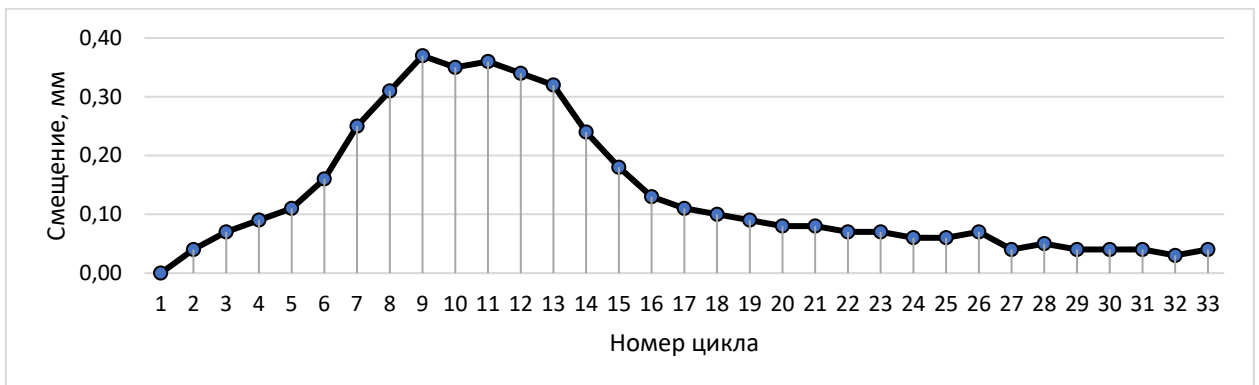


Рисунок 3.15 – График зависимости смещения пункта obj3 вдоль оси Z от температуры

Таблица 3.4 – Смещение пункта obj4 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
1	24,8	0,00	0,00	0,00
2	23,3	0,01	0,00	-0,01
3	19,0	0,01	-0,01	-0,01
4	15,5	0,02	0,00	-0,01
5	9,7	0,02	0,02	0,02
6	7,1	0,03	0,05	0,04
7	5,7	0,04	0,09	0,07
8	4,6	0,05	0,09	0,08
9	3,9	0,06	0,11	0,10
10	4,0	0,06	0,10	0,08
11	4,5	0,05	0,10	0,09
12	5,0	0,04	0,08	0,09
13	5,3	0,04	0,08	0,10
14	6,0	0,04	0,05	0,06
15	6,7	0,05	0,00	0,06
16	7,0	0,06	0,02	0,05
17	7,9	0,04	0,03	0,05
18	8,5	0,04	0,01	0,03
19	10,1	0,04	0,02	0,03
20	10,9	0,04	0,03	0,03
21	12,5	0,04	0,03	0,04
22	14,0	0,03	0,03	0,02
23	15,2	0,04	0,02	0,03
24	15,9	0,03	0,01	0,02
25	17,0	0,03	0,00	0,02
26	18,2	0,04	-0,01	0,03
27	19,1	0,03	-0,03	0,01
28	20,1	0,04	-0,04	0,02
29	20,9	0,03	-0,03	0,01
30	22,0	0,03	-0,02	0,01
31	22,1	0,03	-0,03	0,01
32	22,8	0,03	-0,02	0,00
33	23,1	0,03	-0,02	0,01



Рисунок 3.16 – График зависимости смещения пункта obj4 вдоль оси X от температуры



Рисунок 3.17 – График зависимости смещения пункта obj4 вдоль оси Y от температуры



Рисунок 3.18 – График зависимости смещения пункта obj4 вдоль оси Z от температуры

Таблица 3.5 – Смещение пункта obj5 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
1	24,8	0,00	0,00	0,00
2	23,3	0,00	0,00	0,00
3	19,0	0,00	-0,01	0,00
4	15,5	-0,01	-0,02	0,00
5	9,7	-0,02	-0,04	-0,01
6	7,1	-0,02	-0,06	0,04
7	5,7	-0,04	-0,06	0,05
8	4,6	-0,06	-0,09	0,09
9	3,9	-0,08	-0,09	0,10
10	4,0	-0,08	-0,10	0,08
11	4,5	-0,07	-0,09	0,06
12	5,0	-0,07	-0,09	0,06
13	5,3	-0,05	-0,09	0,05
14	6,0	-0,05	-0,09	0,05
15	6,7	-0,04	-0,08	0,04
16	7,0	-0,03	-0,09	0,04
17	7,9	-0,04	-0,09	0,03
18	8,5	-0,02	-0,08	0,04
19	10,1	-0,03	-0,09	0,04
20	10,9	-0,02	-0,08	0,03
21	12,5	-0,01	-0,09	0,03
22	14,0	-0,01	-0,09	0,03
23	15,2	-0,02	-0,05	0,03
24	15,9	-0,02	-0,05	0,01
25	17,0	-0,02	-0,05	0,02
26	18,2	-0,02	-0,05	0,01
27	19,1	-0,03	-0,04	0,02
28	20,1	-0,01	-0,05	0,01
29	20,9	-0,02	-0,05	0,00
30	22,0	-0,03	-0,06	0,02
31	22,1	-0,02	-0,05	0,01
32	22,8	-0,01	-0,04	0,00
33	23,1	-0,01	-0,05	0,02



Рисунок 3.19 – График зависимости смещения пункта obj5 вдоль оси X от температуры



Рисунок 3.20 – График зависимости смещения пункта obj5 вдоль оси Y от температуры



Рисунок 3.21 – График зависимости смещения пункта obj5 вдоль оси Z от температуры

Таблица 3.6 – Смещение пункта obj6 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
1	24,8	0,00	0,00	0,00
2	23,3	0,02	0,00	0,01
3	19,0	0,02	-0,02	0,00
4	15,5	0,02	0,00	0,00
5	9,7	-0,01	-0,04	0,10
6	7,1	-0,02	-0,08	0,13
7	5,7	-0,08	-0,08	0,19
8	4,6	-0,14	-0,10	0,23
9	3,9	-0,18	-0,12	0,28
10	4,0	-0,18	-0,12	0,28
11	4,5	-0,18	-0,11	0,29
12	5,0	-0,18	-0,10	0,29
13	5,3	-0,08	-0,10	0,24
14	6,0	-0,06	-0,10	0,17
15	6,7	-0,04	-0,10	0,13
16	7,0	-0,03	-0,10	0,11
17	7,9	-0,01	-0,10	0,10
18	8,5	0,02	-0,10	0,07
19	10,1	0,04	-0,07	0,08
20	10,9	0,02	-0,05	0,06
21	12,5	0,02	-0,05	0,07
22	14,0	0,02	-0,04	0,05
23	15,2	0,02	-0,03	0,05
24	15,9	0,02	-0,02	0,05
25	17,0	0,02	-0,02	0,05
26	18,2	0,02	-0,02	0,05
27	19,1	0,00	-0,02	0,04
28	20,1	0,02	-0,02	0,03
29	20,9	0,02	-0,02	0,03
30	22,0	0,02	-0,02	0,03
31	22,1	0,02	-0,03	0,02
32	22,8	0,02	-0,01	0,02
33	23,1	0,02	-0,01	0,03



Рисунок 3.22 – График зависимости смещения пункта об'їб вдоль оси X от температуры



Рисунок 3.23 – График зависимости смещения пункта об'їб вдоль оси Y от температуры



Рисунок 3.24 – График зависимости смещения пункта об'їб вдоль оси Z от температуры

Таблица 3.7 – Смещение пункта obj7 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
1	24,8	0,00	0,00	0,00
2	23,3	0,04	0,00	0,01
3	19,0	0,04	0,00	0,03
4	15,5	0,02	0,00	0,02
5	9,7	-0,02	-0,01	0,06
6	7,1	-0,04	-0,04	0,17
7	5,7	-0,10	-0,03	0,25
8	4,6	-0,18	-0,06	0,33
9	3,9	-0,24	-0,07	0,40
10	4,0	-0,24	-0,07	0,39
11	4,5	-0,22	-0,07	0,40
12	5,0	-0,20	-0,07	0,39
13	5,3	-0,17	-0,06	0,34
14	6,0	-0,17	-0,05	0,25
15	6,7	-0,16	-0,05	0,19
16	7,0	-0,13	-0,05	0,15
17	7,9	-0,05	-0,06	0,14
18	8,5	-0,03	-0,05	0,12
19	10,1	-0,03	-0,06	0,10
20	10,9	-0,01	-0,06	0,09
21	12,5	0,00	-0,06	0,09
22	14,0	0,01	-0,06	0,08
23	15,2	0,01	-0,04	0,08
24	15,9	0,01	-0,04	0,07
25	17,0	0,01	-0,03	0,07
26	18,2	0,02	-0,04	0,06
27	19,1	0,01	-0,02	0,06
28	20,1	0,03	-0,02	0,05
29	20,9	0,02	-0,01	0,05
30	22,0	0,02	0,00	0,05
31	22,1	0,02	-0,01	0,04
32	22,8	0,03	0,00	0,03
33	23,1	0,03	-0,01	0,05



Рисунок 3.25 – График зависимости смещения пункта obj7 вдоль оси X от температуры

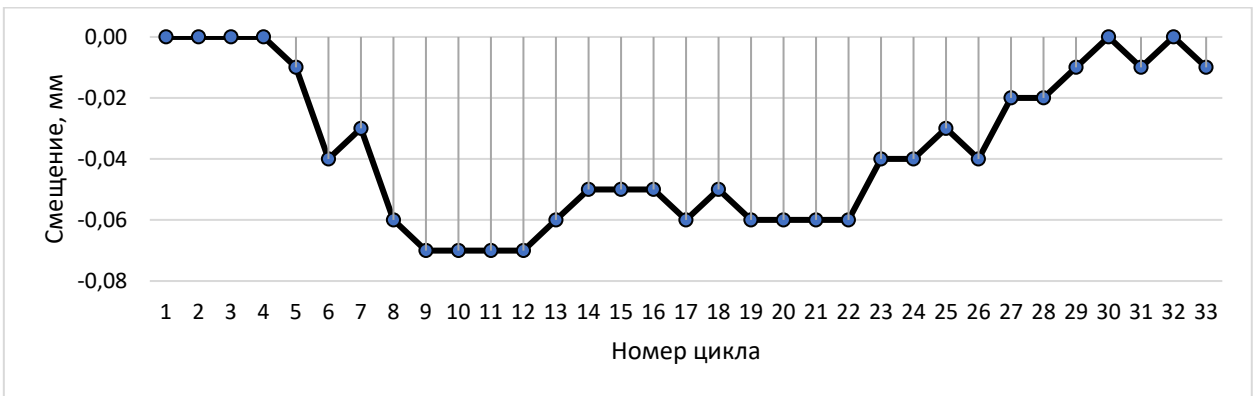


Рисунок 3.26 – График зависимости смещения пункта obj7 вдоль оси Y от температуры



Рисунок 3.27 – График зависимости смещения пункта obj7 вдоль оси Z от температуры

Таблица 3.8 – Смещение пункта obj8 геодезической сети специального назначения между различными циклами измерений

Номер цикла	Температура объекта, °С	Смещение вдоль оси X, мм	Смещение вдоль оси Y, мм	Смещение вдоль оси Z, мм
1	24,8	0,00	0,00	0,00
2	23,3	0,00	0,00	0,00
3	19,0	0,02	-0,04	0,01
4	15,5	0,02	-0,04	0,02
5	9,7	0,04	-0,06	0,05
6	7,1	0,05	-0,08	0,15
7	5,7	0,08	-0,12	0,23
8	4,6	0,10	-0,14	0,30
9	3,9	0,18	-0,16	0,38
10	4,0	0,19	-0,15	0,36
11	4,5	0,18	-0,14	0,34
12	5,0	0,15	-0,13	0,32
13	5,3	0,16	-0,12	0,30
14	6,0	0,10	-0,12	0,22
15	6,7	0,11	-0,12	0,19
16	7,0	0,10	-0,12	0,17
17	7,9	0,10	-0,10	0,15
18	8,5	0,09	-0,08	0,15
19	10,1	0,10	-0,08	0,15
20	10,9	0,10	-0,08	0,13
21	12,5	0,10	-0,07	0,11
22	14,0	0,06	-0,05	0,09
23	15,2	0,06	-0,06	0,09
24	15,9	0,06	-0,06	0,08
25	17,0	0,05	-0,04	0,08
26	18,2	0,05	-0,04	0,07
27	19,1	0,04	-0,05	0,06
28	20,1	0,04	-0,04	0,06
29	20,9	0,04	-0,02	0,05
30	22,0	0,02	-0,02	0,06
31	22,1	0,01	-0,02	0,04
32	22,8	0,02	-0,02	0,03
33	23,1	0,02	-0,02	0,04



Рисунок 3.28 – График зависимости смещения пункта obj8 вдоль оси X от температуры



Рисунок 3.29 – График зависимости смещения пункта obj8 вдоль оси Y от температуры

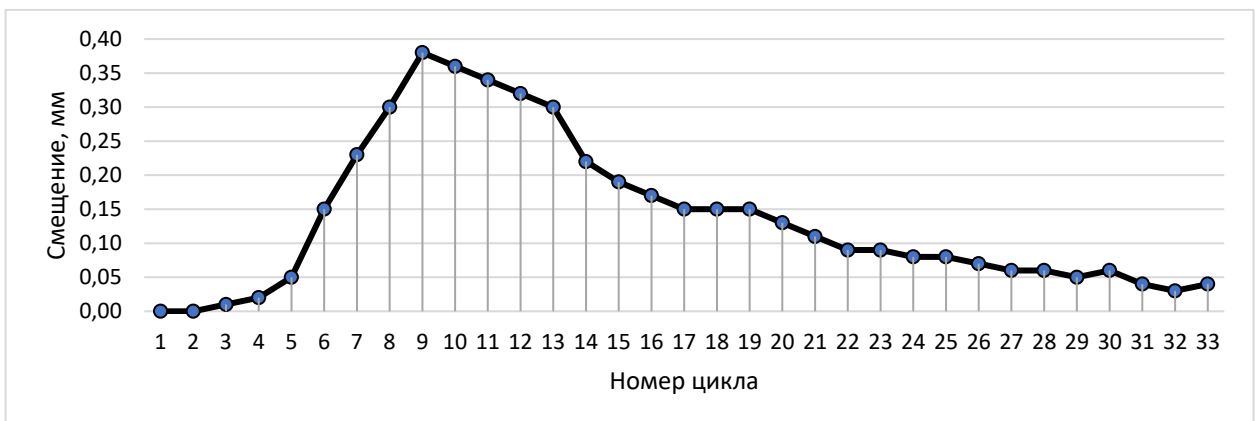


Рисунок 3.30 – График зависимости смещения пункта obj8 вдоль оси Z от температуры

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.

3.3 Разработка алгоритма учета температурных деформаций

С целью повышения точности контроля геометрических параметров объектов авиастроения был разработан алгоритм, позволяющий учитывать смещения, связанные с изменением температурного режима.

1 Внесение в базу данных координат пунктов геодезической сети специального назначения (X , Y , Z), а также температуры окружающего воздуха ($T_{\text{окр.возд.}}$) и объекта, на котором расположены пункты ГССН ($T_{\text{об}}$), при которой были выполнены наблюдения.

С учетом того, что срок эксплуатации сборочных приспособлений может достигать несколько десятков лет, формирование репрезентативной выборки, обеспечивающей наполнение базы данных, возможно в течение первого года использования приспособления.

2 Запрос температурных данных для анализа при последующем позиционировании геодезического прибора, позволяющий определить наличие температурного значения, для которого необходимо рассчитать актуальные координаты пунктов геодезической сети специального назначения.

3 Проверка наличия данных в сформированной базе, позволяющая определить наличие зарегистрированных наблюдений при запрашиваемом температурном значении. Основным критерием является соответствие запрашиваемой температуры сформированному диапазону, представленному в базе данных. В случае соблюде-

ния данного условия осуществляется переход к следующему этапу (см. п. 4). В противном случае выполнение задачи становится невозможным, однако полученные данные подлежат добавлению в базу данных для дальнейшего использования.

4 Вычисление значений координат пунктов, соответствующих запрашиваемой температуре, основанное на методах интерполяции, обеспечивающих восстановление функции зависимости координат от температурных изменений.

Для приближения функций важное место занимают задачи восстановления функции по исходным данным, заданным на конечном множестве точек. Исходными данными являются: значения координат пунктов геодезической сети специального назначения, измеренные прибором при различных температурах, и значения температур. Для решения поставленной задачи необходимо выполнение интерполирования. Традиционно рассматривается линейная интерполяция, когда функция линейно зависит от параметров, то есть представлена в виде обобщенного многочлена. Опираясь на данные, представленные в таблицах 3.1–3.8, свидетельствующие, что изменения происходят нелинейно, для решения поставленной задачи необходимо выполнение интерполирования с использованием сплайн-функции. Интерполяционная функция представлена кубическим сплайном, опирающимся на промежуточные точки, характеризующие положения пункта в зависимости от температуры. Математическое представление сплайн функции приведено в выражении:

$$F_i(T) = \{X_i(T); Y_i(T); Z_i(T)\} \quad (3.1)$$

где $X_i(T)$, $Y_i(T)$, $Z_i(T)$ – значения координат пункта i при выбранной (заданной) температуре.

Важно отметить, что согласно результатам проведенного эксперимента, функции зависимости смещения от температуры следует определять отдельно для каждой координаты (X , Y , Z) каждого пункта сети.

Схема описанного процесса представлена на рисунке 3.31.



Рисунок 3.31 – Схема построения функций для интерполирования

5 Вывод значений координат (X, Y, Z) пунктов геодезических сетей специального назначения, соответствующих заданной температуре.

Описанный алгоритм можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рисунке 3.32.



Рисунок 3.32 – Блок-схема алгоритма учета температурных деформаций

С помощью разработанного алгоритма обеспечивается определение пространственного положения пунктов ГССН при различной температуре на основе корректирующей зависимости.

Разработанный алгоритм был протестирован на объектах авиастроения.

3.4 Проверка разработанного алгоритма в натуральных условиях

Разработанная методика применялась для учета температурных деформаций и расчета корректирующих поправок на промышленном объекте.

На поверхностях исследуемого объекта была создана локальная геодезическая сеть по методике, описанной во втором разделе. Пункты локальной геодезической сети были представлены стальными шайбами в количестве 25 штук.

Наблюдения выполнялись с июля 2021 г. по сентябрь 2022 г. при различных температурах: диапазон температур во время промышленного эксперимента в производственном помещении был от $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общее количество циклов наблюдений – 19.

Во время наблюдений были зафиксированы смещения пунктов, наибольшее значение которых составило 1,39 мм.

Для определения положения прибора, устанавливаемого для контроля геометрических параметров при выверке сборочного приспособления, были выбраны семь пунктов сети, обеспечивающих наилучшую геометрию обратной линейно-угловой засечки.

Погрешность определения станции наблюдений без учета температурной коррекции составила 0,32 мм.

Погрешность определения станции наблюдений с учетом температурной коррекции составила 0,07 мм.

Исходя из полученных результатов промышленного эксперимента, можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм повышает точность определения положения станции наблюдений и, следовательно, позволяет обеспечить необходимые условия для выполнения геометрического контроля параметров объектов авиастроения.

3.5 Выводы по разделу 3

1 Выполнена постановка эксперимента, заключающаяся в выявленных смещениях пространственного положения пунктов геодезических сетей специального назначения, связанная с изменением температурного режима в производственном помещении. Установлено, что деформационные процессы имеют циклический характер, зависящий от температуры. При этом смещения пунктов геодезической сети вдоль координатных осей неравномерны.

2 Для установления зависимости смещений пунктов от температуры был проведен эксперимент, заключающийся в оценке деформаций точек сети, закрепленных на тест-объекте. В результате эксперимента было установлено, что при изменении температурного режима смещения пунктов происходят с разной скоростью и разнонаправленно, что не позволяет использовать общий коэффициент учета деформаций.

3 На основе сформированной базы данных, связывающей температуру и положение пунктов геодезической сети специального назначения, разработан алгоритм учета температурных деформаций, обеспечивающий определение пространственного положения пунктов при различной температуре с применением корректирующих температурных поправок.

4 Разработанная методика была протестирована на реальном объекте авиастроения. Результатом промышленного эксперимента является заключение о том, что алгоритм позволяет повысить точность определения положения станции наблюдения более чем в четыре раза при изменении температуры на 22 °С и, следовательно, обеспечить необходимые условия для выполнения геометрического контроля параметров объектов авиастроения.

На основе полученных результатов была решена задача разработки программного алгоритма по учету температуры при выполнении геодезических измерений для контроля геометрических параметров в промышленных условиях.

Сформулирована научная новизна:

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

Сформулировано научное положение.

Разработанная схема учета температуры позволяет повысить точность геодезических измерений при построении геодезической сети специального назначения и контроле геометрических параметров элементов конструкций и летательных аппаратов в процессе их сборки и монтажа.

4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ АВИАСТРОЕНИЯ

На основе выполненных исследований с учетом результатов существующих научных разработок в разделе представлены практические рекомендации по контролю геометрических параметров элементов конструкций сборочных приспособлений и летательных аппаратов.

Практические рекомендации структурированы в несколько основных этапов, обеспечивающих комплексный подход к организации геодезического контроля в авиастроении.

1 Критерии выбора средств измерений и оснастки.

2 Типизированные схемы выполнения геометрического контроля.

Данный подход позволяет повысить точность и надежность (однозначность) геометрического контроля, минимизировать вероятность возникновения ошибок, допускаемых исполнителем, и сократить временные затраты на выполнение измерений в условиях производства авиационной техники.

4.1 Критерии выбора геодезического оборудования

Выбор измерительного оборудования для выполнения контроля геометрических параметров объектов авиастроения зависит от допустимых отклонений от проектной формы, регламентируемых для различных компонентов.

Ранее была выполнена классификация объектов, результаты которой представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Классификация объектов авиастроения

Тип объекта	Малогабаритные сборочные приспособления	Сборочные приспособления, используемые при производстве и стыковке крупных конструктивных частей летательного аппарата	Летательные аппараты на этапе установки отдельных компонентов, после окончательной сборки, при ремонте, реконструкции и эксплуатации
Категория	Высокоточная	Точная	Техническая
Допуск на отклонение от проектного значения	не превышает $\pm 1,0$ мм	не превышает $\pm 2,0$ мм	более $\pm 2,0$ мм

В зависимости от категории объекта следует применять различные геодезические приборы и оснастку для его геометрического контроля.

Таким образом, при выверке объектов, входящих в категорию «высокоточные», рекомендуется применять абсолютные лазерные трекеры в совокупности с прецизионными сферическими уголковыми отражателями и щупами, предназначенными для измерения положения объектов, находящихся вне прямой видимости прибора, удовлетворяющими техническим характеристикам, представленным в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики, предъявляемые к абсолютному лазерному трекеру (<https://www.promgeo.com/equipment/trackers/at960-930/>)

Параметр	Значение
СКО измерения горизонтального угла	0,5"
СКО измерения вертикального угла	0,5"
СКО измерения расстояния	0,01 мм + 0,005 мм/м
Дополнительная СКО определения положения точки, возникающая при использовании щупа	0,03 мм

При выверке объектов, входящих в категорию «точные», рекомендуется применять абсолютные лазерные трекеры в совокупности с прецизионными сферическими уголковыми отражателями и щупами, предназначенными для измерения положения объектов, находящихся вне прямой видимости прибора, удовлетворяющими техническим характеристикам, представленным в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Технические характеристики, предъявляемые к абсолютному лазерному трекеру (<https://www.promgeo.com/equipment/trackers/at403/>)

Параметр	Значение
СКО измерения горизонтального угла	0,5"
СКО измерения вертикального угла	0,5"
СКО измерения расстояния	0,01 мм + 0,005 мм/м
Дополнительная СКО определения положения точки, возникающая при использовании щупа	0,20 мм

Помимо лазерного трекера, для выполнения выверки объектов авиастроения точной категории возможно применение прецизионного роботизированного промышленного тахеометра, обеспечивающего СКО определения положения с использованием сферического отражателя в пределах $\pm 0,3 \text{ мм} + 13 \text{ мкм/м}$ (<https://www.promgeo.com/equipment/total-stations/total-station-leica-tdra6000/>).

При выполнении контроля геометрических параметров объектов авиастроения, входящих в группу технических, рекомендуется использование высокоточных роботизированных тахеометров, удовлетворяющих техническим характеристикам, представленным в таблице 4.4. Важно отметить, что также допускается использование оборудования, описанного выше. Представленные рекомендации ориентированы на повышение экономической и производственной эффективности. В частности, для контроля геометрических параметров объектов технической категории целесообразно применять тахеометры, поскольку их использование сокращает временные затраты на развертывание измерительного комплекса и выполнение измерений, а также позволяет привлечь более широкий круг специалистов к проведению работ.

Таблица 4.4 – Технические характеристики, предъявляемые к роботизированному тахеометру (<https://www.promgeo.com/equipment/trackers/at403/>)

Параметр	Значение
СКО измерения горизонтального угла	0,5"
СКО измерения вертикального угла	0,5"
СКО измерения расстояния на отражатель	0,60 мм + 1 ppm

При выборе оборудования, помимо категории объекта и предъявляемых требований к точности измерений, рекомендуется учитывать следующие факторы:

- измерительный объем: если с одной станции наблюдений требуется определить положение объектов, находящихся на расстоянии более 160 м, то в таком случае необходимо использовать тахеометр;

- мобильность измерительного комплекса и оперативность выполняемых измерений: данный параметр определяется рядом факторов, включающих в себя применяемые методы измерений, массу и габаритные размеры оборудования, ав-

тономность работы комплекса и скорость его развертывания, а также удобство транспортировки;

– тип контроля геометрических параметров: в условиях оперативного полевого контроля, когда информация, полученная непосредственно с экрана оборудования, обеспечивает необходимую полноту данных для принятия решений, применение тахеометра будет являться наиболее рациональным по сравнению с лазерным трекером, требующим подключения к персональному компьютеру для проведения измерений;

– условия эксплуатации: при выборе комплекта оборудования, необходимого для выполнения поставленных задач, необходимо учитывать особенности производственной среды, включающие в себя запыленность, непостоянство температурного режима, вибрационные нагрузки, возможную работу над открытым воздухом, подразумевающую атмосферные осадки в виде дождя и снега, а также иные факторы, способные повлиять на измерительные процессы.

Таким образом определяются ключевые критерии выбора оборудования, обусловленные категорией контролируемого объекта и иными факторами. Обобщенные результаты представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Обобщенные критерии выбора оборудования для контроля геометрических параметров объектов авиастроения

Прибор / Критерий	Лазерный трекер	Прецизионный роботизированный тахеометр
Категория объекта (зависящая от допустимых отклонений от проектной формы)		
Высокоточный	+	
Точный	+	+
Технический	+	+
Менее 160 м	+	+
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

Окончание таблицы 4.5

Прибор / Критерий	Лазерный трекер	Прецизионный роботизированный тахеометр
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

4.2 Разработка типизированных схем геодезических работ для контроля геометрических параметров объектов авиастроения

4.2.1 Схема, применяемая для монтажа и выверки сборочного приспособления, предназначенного для производства крупных элементов летательного аппарата (объект точной категории)

Как было определено в первом разделе, геодезический контроль геометрических параметров при выверке сборочных приспособлений необходим, так как он играет ключевую роль при последующем производстве элементов конструкций летательных аппаратов и их сборке. Данный процесс позволяет обеспечить соответствие геометрических характеристик изделий проектным расчетам, что, в свою очередь, является критически важным фактором для их безопасной эксплуатации.

Допустимые значения отклонений контролируемых параметров относительно проектных позволяют отнести данный объект к категории точных. Следовательно, согласно разработанным критериям, для выполнения геодезических работ возможно применение лазерного трекера, а в ряде некоторых случаев и роботизированного тахеометра.

Геодезический контроль при монтаже и выверке крупногабаритных сборочных приспособлений (рисунок 4.1) должен выполняться на следующих стадиях.

- 1 Вынос в натуру точек установки опор рам сборочного приспособления.
- 2 Горизонтирование опор рам сборочного приспособления.

- 3 Выставление рам в соответствии с проектным положением.
- 4 Установка кронштейнов для крепления рубильников в проектное положение.
- 5 Доработка рабочей поверхности обводообразующих элементов до проектного положения.

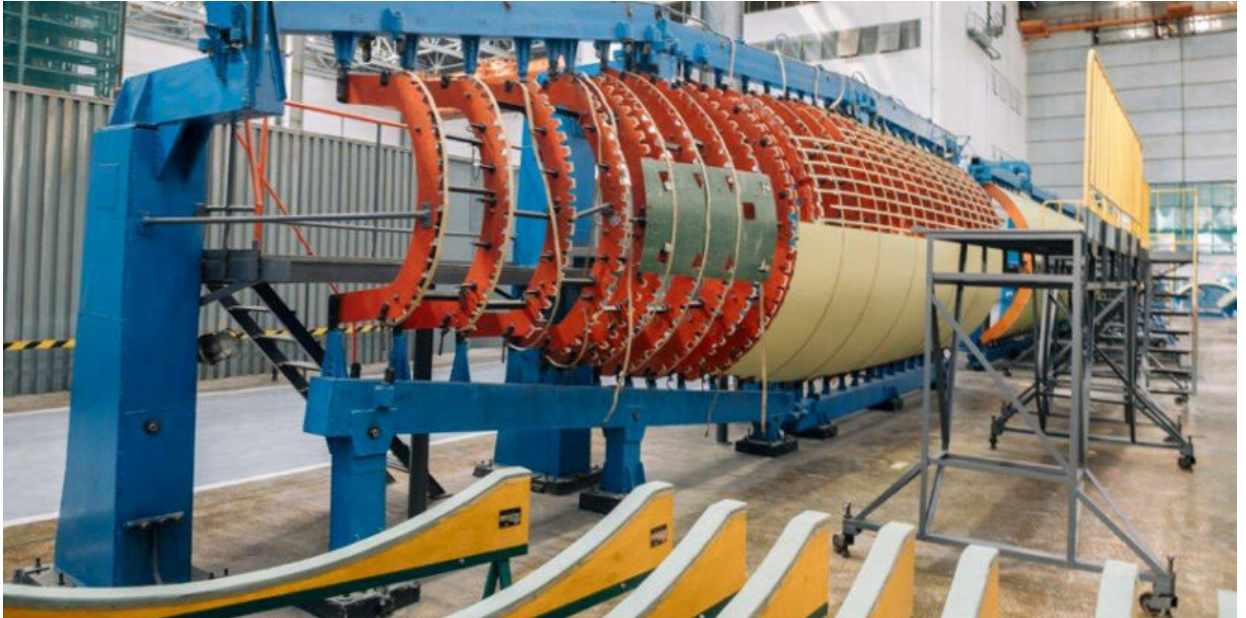


Рисунок 4.1 – Сборочное приспособление (<https://aviation21.ru/dlya-sborki-tu-214-na-aviazavode-v-kazani-nachalas-ustanovka-novyx-stapelej/>)

В соответствии с разработанной классификацией геодезических сетей специального назначения, представленной во втором разделе, для контроля геометрических параметров объектов авиастроения данной категории рекомендуется создание сети точного класса. Однако для выполнения первых трех этапов (вынос в натуру точек установок опор рам, установка опор в горизонтальное положение и выставление рам) целесообразно создание сети технического класса точности. Пункты ГССН точного класса рекомендуется закреплять на недеформируемых и устойчивых основаниях рамы стапеля, на ее несущих конструкциях, а также возможно закрепление пунктов на несущих конструкциях соседних стапелей и самого цеха с использованием отражателей типа «SCRT», пунктов, предназначенных для установки сферических отражателей первой и второй группы, пунктов, закрепленных в виде кернов и рисок. Пункты ГССН технического класса закрепляются на несущих

щих колоннах производственного цеха, а также на поверхности пола в специально сконструированных углублениях посредством конструкций, предназначенных для установки сферических отражателей первой группы, светоотражающими марками, пунктами, закрепленными в виде кернов и рисок.

Геодезические работы рекомендуется разделить на четыре основных этапа.

1 Создание сети технического класса точности, которая должна быть закреплена на колоннах цеха и в полу.

2 Монтаж и выверка силовых элементов сборочного приспособления (опор и рам).

3 Развитие по методике, описанной во втором разделе, точной геодезической сети, закрепляемой на поверхности самого сборочного приспособления, на поверхностях близлежащих сборочных приспособлений и на колоннах производственного помещения.

4 Установка кронштейнов, фиксаторов и обводообразующих элементов, а также доработка их рабочих поверхностей в соответствии с данными трехмерной компьютерной модели.

Первый и второй этап рекомендуется выполнять с использованием роботизированного тахеометра, при этом допускается использование безотражательного режима, так как обеспечиваемая данным методом точность измерения является достаточной для данного вида работ.

Третий и четвертый этап следует выполнять с применением лазерных трекеров в сочетании со специализированной оснасткой, включающей подставки для сферических прецизионных отражателей, щупы, зеркала и другие измерительные приспособления.

4.2.1.1 Создание и развитие геодезической сети специального назначения

Известно, что для определения положения геодезического прибора требуется наличие минимум трех пунктов с известными координатами. Однако, согласно проведенным экспериментальным исследованиям, количество пунктов, на которые обеспечена прямая видимость с любой возможной станции наблюдений, должно

составлять не менее пяти для закрепляющих техническую сеть и не менее десяти для закрепляющих точную ГССН.

Пункты рекомендуется располагать равномерно относительно сборочного приспособления с целью обеспечения оптимальных углов засечки. Такой подход позволяет минимизировать СКО определения положения станции и, как следствие, повышает точность контроля геометрических параметров сборочного приспособления. Примеры корректного и некорректного закрепления пунктов представлены на рисунке 4.2.

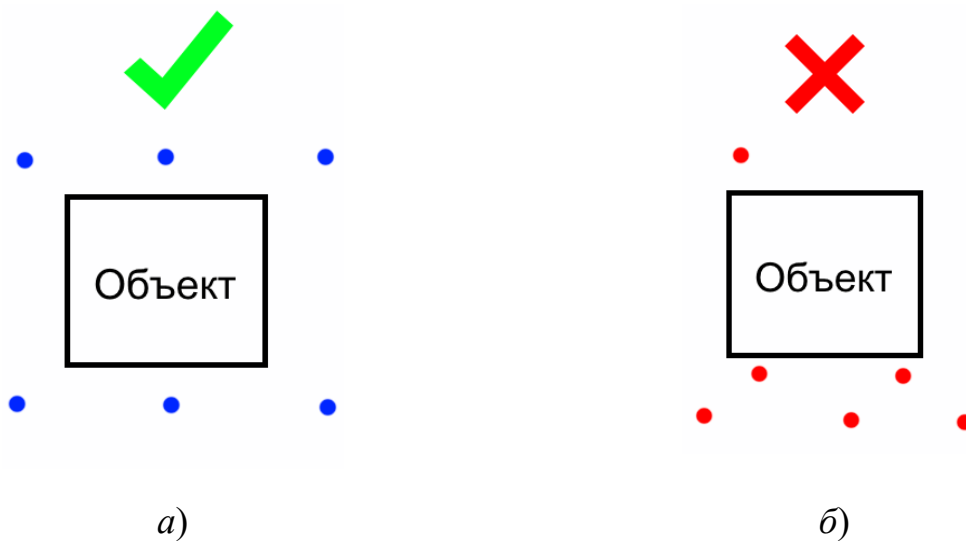


Рисунок 4.2 – Корректное (а) и некорректное (б) расположение пунктов

4.2.1.2 Выполнение измерений

Установка кронштейнов в проектное положение, как правило, осуществляется путем сопоставления положения оси отверстий фиксатора, полученного на основе данных трехмерной компьютерной модели, с определенной координатой точки, расположенной на данной оси. Для определения положения точки рекомендуется использовать сферический отражатель (либо 0,5", либо 1,5"), соответствующий диаметру отверстия. Установку отражателя рекомендуется выполнять с применением специальных держателей в соответствии с методикой, представленной на рисунке 4.3.

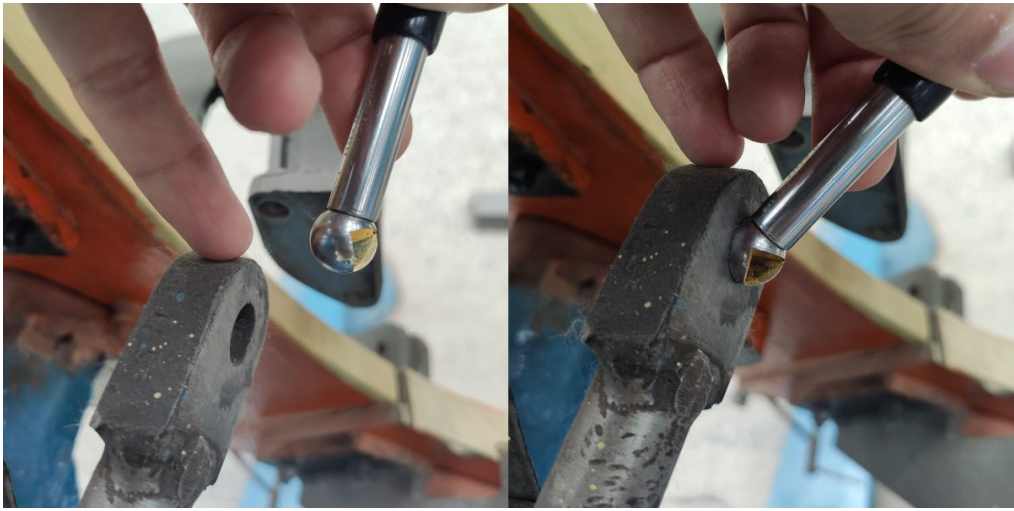


Рисунок 4.3 – Определение положения точки, находящейся на оси отверстия фиксатора

Проектное положение обводообразующих элементов определяется не только соответствием заданным параметрам их рабочей поверхности, но и точным позиционированием вдоль продольной оси сборочного приспособления. В этой связи первоочередной задачей является установка детали в проектное положение с контролем ее поверхностей, как представлено на рисунке 4.4, *а*.

После фиксации детали в проектном положении необходимо приступить к выверке и доработке рабочей поверхности ложементов (рисунок 4.4, *б*).



(а)



(б)

Рисунок 4.4 – Контроль положения поверхности детали (а), контроль рабочей поверхности ложементов (б)

После проведения геодезических наблюдений необходимо выполнить определение координат нескольких пунктов геодезической сети специального назначения, которые использовались для позиционирования прибора. Данная процедура позволяет контролировать неизменность положения оборудования в ходе выполнения работ. Согласно проведенным экспериментальным исследованиям, критическими являются отклонения более 0,10 мм. В связи с этим целесообразно осуществлять проверку стабильности положения прибора не только по завершении работ, но и в процессе их выполнения.

При нестабильном температурном режиме для повышения точности контроля геометрических параметров сборочных приспособлений следует учитывать температурные деформации в соответствии с алгоритмом, представленным в третьем разделе.

Предложенные рекомендации по применению геодезических методов для геометрического контроля при монтаже и выверке сборочных приспособлений были реализованы на натуральных объектах. При этом было обеспечено соответствие требованиям нормативной точности.

4.2.2 Схема, применяемая для определения положения контрольных точек летательного аппарата (объект технической категории)

Определение положения контрольных точек самолета (нивелирование самолета) является одним из ключевых способов обеспечения корректной стыковки отдельных агрегатов и элементов воздушного судна, правильной установки на самолет различного вида оборудования. В процессе эксплуатации данный контроль также применяется для выявления деформаций летательного аппарата, вызванных нагрузками, возникающими в результате многократных циклов «взлет-посадка», а также жесткими посадками самолета.

Допустимые отклонения положений контрольных параметров относительно проектных позволяют отнести данный объект к категории технических. Следовательно, согласно разработанным критериям, для выполнения геодезических работ возможно применение как лазерного трекера, так и роботизированного тахеометра.

Согласно разработанной классификации геодезических сетей специального назначения, для контроля геометрических параметров объектов авиастроения данной категории рекомендуется создать сеть технического класса точности. Пункты ГССН закрепляются на несущих колоннах производственного цеха, а также на поверхности пола в специально сконструированных углублениях посредством конструкций, предназначенных для установки сферических отражателей первой группы, светоотражающими марками, пунктами, закрепленными в виде кернов и рисок.

Определение координат пунктов ГССН следует осуществлять в соответствии с методикой, разработанной во второй главе. Конфигурация сети должна быть спроектирована таким образом, чтобы повысить количество видимых пунктов из любой возможной точки расположения станции наблюдений. Для определения положения измерительного прибора необходимо, чтобы одновременно была видимость как минимум трех пунктов с известными координатами. Однако с целью обеспечения проведения работ в случае, если некоторые точки с известными координатами будут уничтожены или утрачены, а также для повышения точности определения положения станции, рекомендуется увеличить их плотность.

Нивелирование летательного аппарата выполняется по специальным точкам, закрепленным на поверхности самолета в виде керна (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Контрольная точка на поверхности самолета

Для определения координат керна предлагается использовать два метода. Первый основан на применении прецизионного роботизированного тахеометра. Второй метод предполагает использование лазерного трекера в сочетании с жезлом скрытых точек.

4.2.2.1 Определение координат керна с использованием роботизированного тахеометра

Для решения данной задачи предлагается использовать разработанный алгоритм.

1 Получение исходных данных, включающих информацию о параметрах, подлежащих контролю в процессе нивелирования самолета, таких как расстояния и превышения между двумя контрольными точками. Как правило, проектное положение контрольных точек и номинальное расстояние между ними указаны на схеме нанесения нивелировочных точек. Помимо этого, исходные данные могут быть извлечены из трехмерной компьютерной модели.

Полевые работы можно разделить на две группы: первичный и последующий контроль.

2 Первичный контроль.

2.1 Подготовка летательного аппарата к измерениям, включающая нанесение на поверхность обшивки минимум трех светоотражающих вспомогательных марок, расположенных вокруг керна. Пример их закрепления представлен рисунке 4.6.

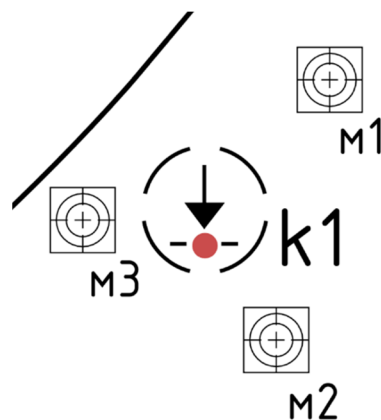


Рисунок 4.6 – Пример закрепления светоотражающих марок

2.2 Определение пространственного положения трех вспомогательных марок m_1 , m_2 , m_3 (рисунок 4.7, а) и контрольного керна k_1 (рисунок 4.7, б) с использованием лазерного трекера или роботизированного тахеометра.

2.3 Установление взаимосвязей между вспомогательными марками и керном с целью дальнейшего восстановления координат керна по измеренным координатам светоотражающих марок. Пример взаимосвязей, где определяются элементы h , x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , представлен на рисунке 4.7, в, г.

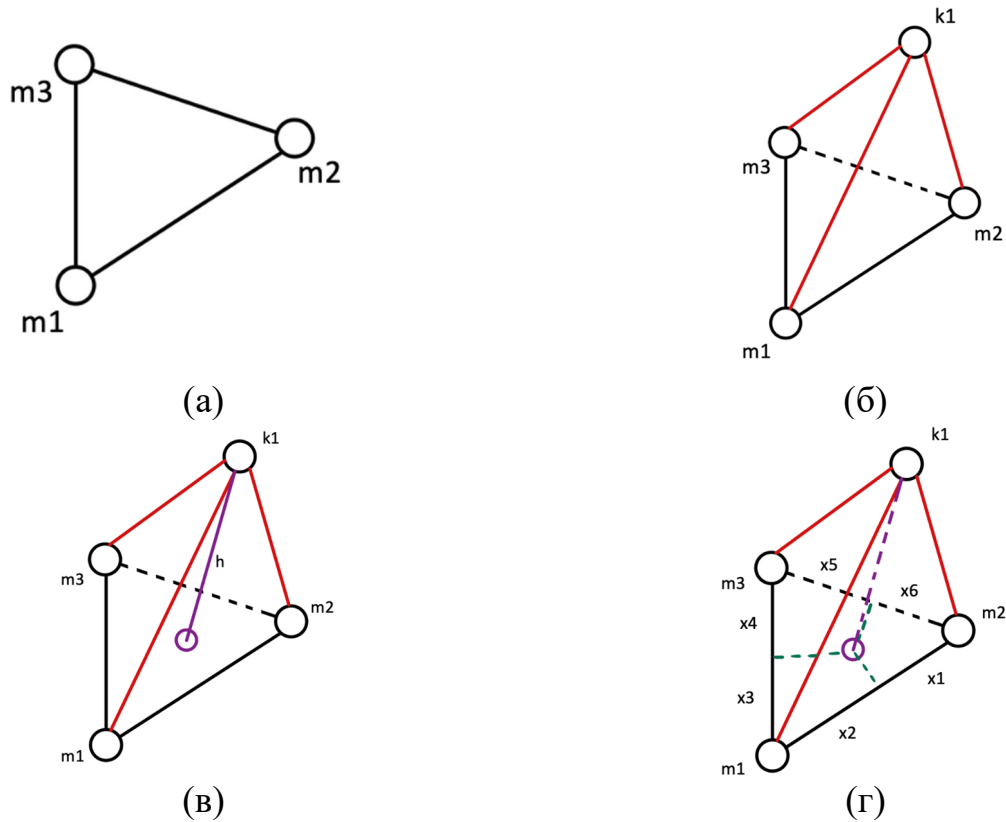


Рисунок 4.7 – Определение элементов

Как было описано ранее, контролируемые параметрами при нивелировании являются длины линий, образованных контрольными точками.

Следовательно, аналогичные действия необходимо выполнить для всех кернов, нанесенных на поверхности летательного аппарата.

2.4 Расчет длин линий, соединяющих контрольные точки, по формуле:

$$D_{i-j} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2} \quad (4.1)$$

где X_i , Y_i , Z_i – значения координат керна i ; X_j , Y_j , Z_j – значения координат керна j , образующих контрольную линию D_{i-j} .

2.5 Сравнение результатов расчетов с проектными значениями.

2.6 Внесение измеренных параметров и вычисленных геометрических зависимостей в базу данных, откуда они будут извлекаться для последующих циклов наблюдений.

3 Последующий контроль.

3.1 Проведение измерений с использованием прецизионного роботизированного тахеометра с целью определения пространственных координат вспомогательных марок. Схема позиционирования прибора и выполнения контрольных наблюдений представлена на рисунке 4.8.

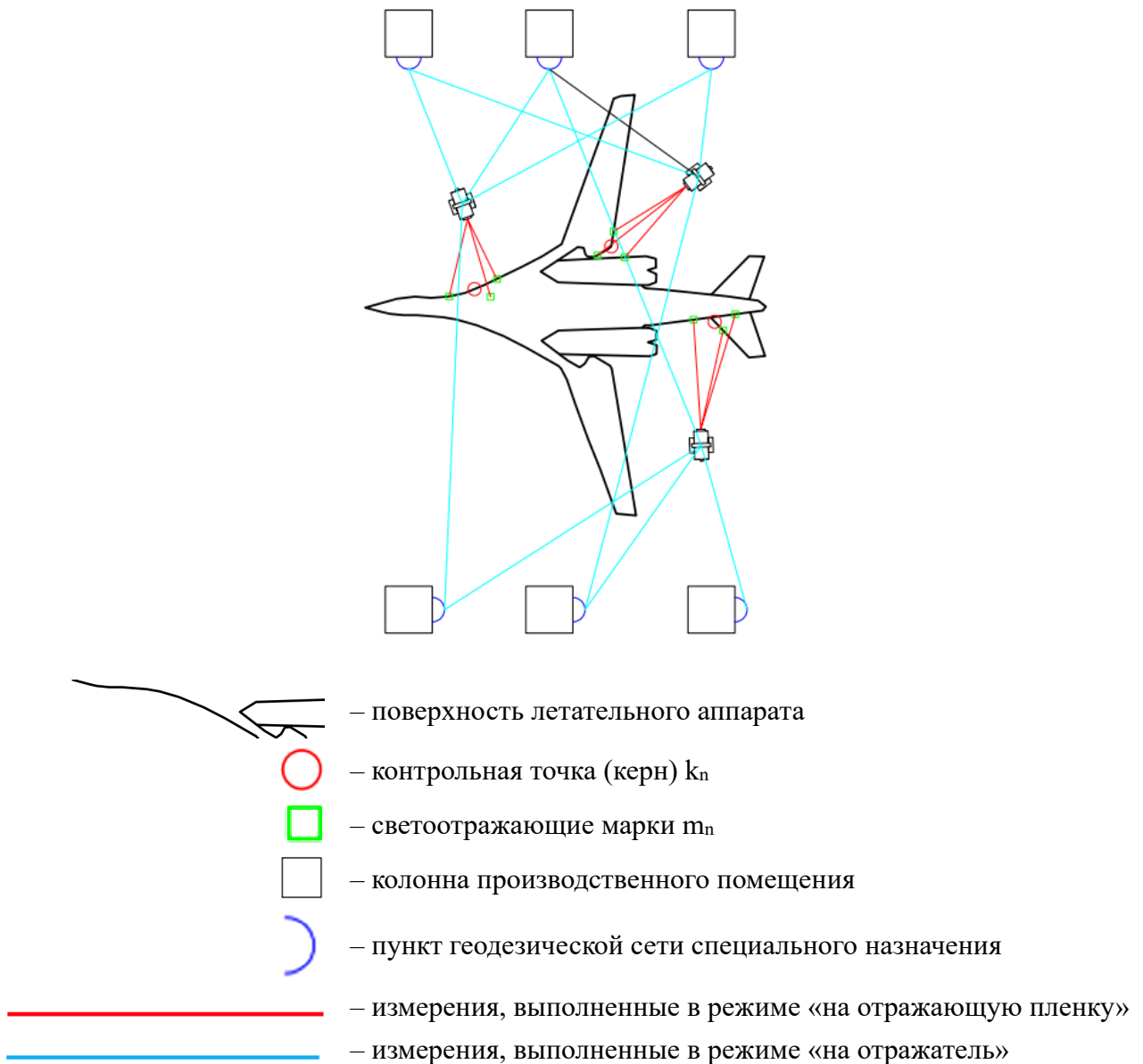


Рисунок 4.8 – Схема выполнения контрольных наблюдений последующих циклов

3.2 Определение координат керна на основе сформированных взаимосвязей между вспомогательными марками и контролируемой точкой.

3.3 Расчет длин линий, соединяющих контрольные точки.

3.4 Сравнение результатов измерений с данными предыдущих циклов наблюдений и проектными значениями.

3.5 Формирование отчета с внесением полученных результатов в документацию установленного образца

Описанный алгоритм можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рисунке 4.9.

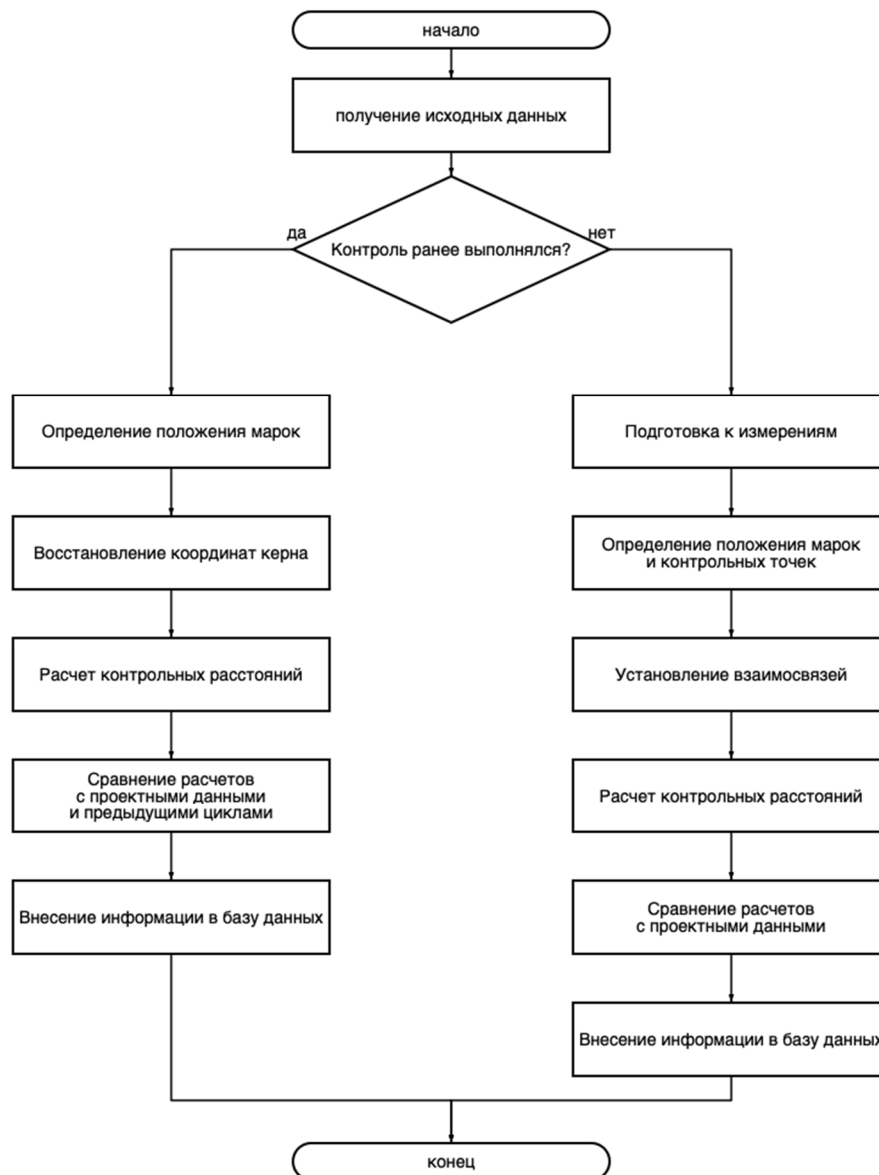


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритма нивелирования самолета

Разработанная схема геодезических наблюдений обеспечивает определение координат контрольных точек, расположенных на поверхности летательного аппарата с требуемой точностью. Ее основным преимуществом является возможность выполнения наблюдений без необходимости сооружения специальных конструкций, аналогичных строительным лесам и стремянкам, необходимых при проведении контактных измерений на недоступной высоте.

4.2.2.2 Определение координат керна с использованием лазерного трекера

Для решения данной задачи разработан метод, основанный на использовании лазерного трекера, сферического отражателя и специального жезла скрытых точек. Конструкция жезла может быть различной. Основное назначение данного устройства – определение координат точек, на которые отсутствует прямая видимость. Один из возможных примеров исполнения применяемой оснастки представлен на рисунке 4.10. Она представляет собой стальную трубку, оснащенную с одной стороны острием для точного центрирования, а с другой – магнитной подставкой, обеспечивающей надежную установку сферического отражателя.

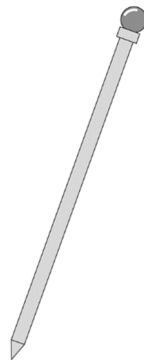


Рисунок 4.10 – Применяемая оснастка

Как известно, на поверхности самолета нанесены контрольные точки (керны). Пример расположения керна, размещенного на киле летательного аппарата, представлен на рисунке 4.11. Поскольку поверхность киля имеет криволинейную форму, использование стандартных подставок под сферические отражатели,

предназначенных для их установки на плоские поверхности, является невозможным для определения координат точки керна.

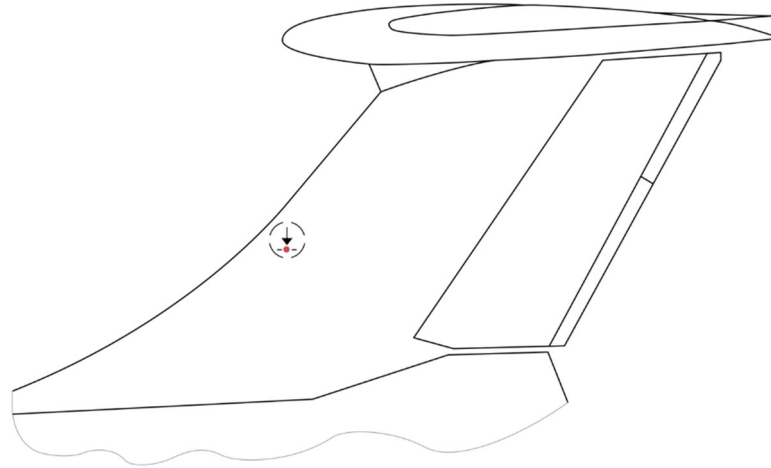


Рисунок 4.11 – Пример киля летательного аппарата с нанесенным керном

В данном случае для выполнения измерений рекомендуется применение жезла, рассмотренного ранее. Наблюдения следует проводить в соответствии с разработанным алгоритмом.

1 Установить жезл скрытых точек таким образом, чтобы его острие было точно отцентрировано в керне, а сферический отражатель – в подставке.

2 Вращая отражатель вокруг зафиксированного острия, определить координаты точек, равноудаленных от центра керна и расположенных на воображаемой сферической поверхности. Рекомендуется выполнить избыточное количество измерений, так как это позволяет повысить точность выполняемых работ. Согласно проведенным экспериментальным исследованиям, минимальное число точек с определенными координатами не должно быть менее 10 штук.

3 С использованием специализированного программного обеспечения выполнить аппроксимацию сферы по измеренным точкам методом наименьших квадратов.

4 С использованием специализированного программного обеспечения вычислить координаты центра аппроксимированной сферы, которые будут соответствовать координатам керна, расположенного на поверхности летательного аппарата.

Схема выполнения описанных наблюдения представлена на рисунке 4.12.

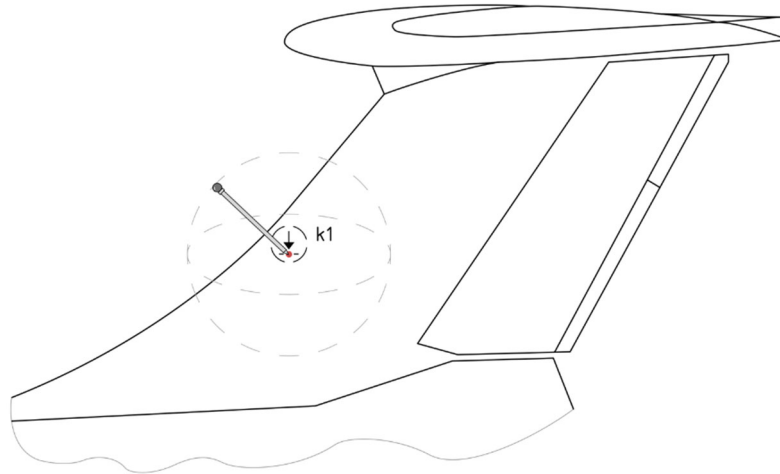


Рисунок 4.12 – Схема определения координат керна с использованием жезла скрытых точек

Разработанный алгоритм можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Блок схема алгоритма определения координат керна с использованием жезла скрытых точек

При нестабильном температурном режиме для повышения точности контроля геометрических параметров летательных аппаратов следует учитывать температурные деформации в соответствии с алгоритмом, представленным в третьем разделе.

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

4.3 Выводы по разделу 4

1 Разработаны критерии выбора применяемого оборудования и вспомогательной оснастки, позволяющие в зависимости от классифицированных конструктивных элементов выбирать средство измерений, например лазерный трекер или прецизионный роботизированный тахеометр. Сформулированы факторы (измерительный диапазон, мобильность и т. д.), которые необходимо учитывать при выборе оборудования помимо предъявляемых требований к точности измерений.

2 Разработана типизированная схема геодезических работ, применяемая для монтажа и выверки сборочного приспособления, предназначенного для производства крупных элементов летательного аппарата, включающая создание и развитие геодезической сети специального назначения, а также описание методики производства контрольных измерений.

3 Разработана типизированная схема геодезических работ, применяемая для определения положения контрольных точек летательного аппарата (кернов). Для определения координат керна предложены два метода, один из которых основан на применении прецизионного роботизированного тахеометра, а второй предполагает использование лазерного трекера в сочетании с жезлом скрытых точек. Разработаны алгоритмы для решения данной задачи.

На основе полученных результатов была решена задача по разработке системы практических рекомендаций по геодезическому контролю геометрических параметров конструктивных элементов при монтаже сборочных приспособлений, сборке и эксплуатационном обслуживании летательных аппаратов.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Анализ применения современных измерительных комплексов для получения качественных отливок авиастроения / К. А. Батышев, А. А. Прохоров, К. Г. Семенов, В. И. Безпалько. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 1 (9). – С. 32–36.

2 Асташенков, Г. Г. Геодезические работы при эксплуатации крупногабаритного промышленного оборудования / Г. Г. Асташенков – М. : Недра, 1986. – 151 с. – Текст : непосредственный.

3 АТФ : официальный сайт. – URL: https://atf.ru/articles/materialy_dlya_promyshlennogo_oborudovaniya/resurs-samoleta-kak-rasschityvaetsya-i-ot-chego-zavisit-srok-sluzhby-letatelnykh-apparatov/. – Текст : электронный.

4 Ахатов, Р. Х. Технология монтажа сборочной оснастки с применением промышленного робота / Р. Х. Ахатов, К. А. Однокурцев, Е. В. Зыкова. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 1-5. – С. 1284–1291.

5 Ахатов, Р. Х. Формализованный выбор конструктивной компоновки сборочной оснастки для изделий самолётостроения / Р. Х. Ахатов, К. А. Однокурцев. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения. – 2009. – № 13. – С. 16–17.

6 Бойцов, В. В. Сборка агрегатов самолета : учеб. пособие / В. В. Бойцов, Ш. Ф. Ганихагов, В. Н. Крысин. – Москва : Машиностроение, 1988. – 152 с. – Текст : непосредственный.

7 Будниченко, М. А. Обеспечение угловой соосности блок-модулей при сборке основного корпуса подводного корабля с применением локальных измерительных сетей / М. А. Будниченко, А. С. Голубкин, Д. В. Кузьмин. – Текст : непосредственный // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – № 3 (389). – С. 180–184.

8 Вашуков, Ю. А. Технология и оборудование сборочных процессов: мультимедийное пособие / Ю. А. Вашуков, О. В. Ломовской, А. А. Шаров. – Самара: Самар. гос. аэрокосмический ун-т им. С. П. Королева, 2011. – Текст : непосредственный.

9 Вшивкова, О. В. Разработка алгоритма реализации комбинированного способа учета влияния вертикальной рефракции в электронной тахеометрии / О. В. Вшивкова,

С. Ю. Решетило. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2018. – Т. 62, №5. – С. 489–494.

10 Вшивкова, О. В. Разработка методики производства комплексных градиентных измерений для целей учета влияния вертикальной рефракции / О. В. Вшивкова, С. Ю. Решетило. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – 2021. – №4. – С. 185–192.

11 Вялов, А. В. Автоматизация технологического проектирования в авиастроении : учебное пособие / А. В. Вялов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – 171 с. – Текст : непосредственный.

12 Геодезический контроль геометрии выравниваемого здания / Ю. С. Забазнов, И. Г. Гайрабеков, Ю. И. Пимшин. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2010. – Т. 14, № 4. – С. 60–66.

13 Геодезическое обеспечение реконструкции гидроагрегатов / Г. А. Уставич, В. С. Писарев, С. В. Середович, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, В. И. Дударев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 74–88.

14 Гольдберг, Е. С. Технология агрегатно-сборочного производства вертолётов / Е.С. Гольдберг, В. М. Михайликов, В. М. Швачун, С. Н. Шевцов, М. Б. Флек, А. А. Филиппов. – Ростов-на-Дону : ДГТУ. – Текст : непосредственный.

15 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. – Москва : Госстандарт России, 2002. – Текст : непосредственный.

16 Гришанов, В. Н. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники / В. Н. Гришанов, А. А. Ойнонен. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (Национального исследовательского университета). – 2012. – № 1 (32). – С. 24–35.

17 Гусева, Р. И. Особенности технологии сборки планера самолета : учебное пособие / Р. И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 133 с. – Текст : непосредственный.

18 Ефремкин, О. С. Контроль геометрических параметров посадочных мест под приборы высокой точности установки / О. С. Ефремкин, С. Н. Шапошников. –

Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2020. – Т. 22, № 6 (98). – С. 21–26.

19 Ефремкин, О. С. Применение высокоточных измерительных систем в условиях пониженного давления / О. С. Ефремкин. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра РАН. – 2019. – № 5. – С. 62–66.

20 Жаров, В. И. Методика определения кинематических характеристик элементов главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 с использованием современных лазерных измерительных систем / В. И. Жаров. – Текст : непосредственный // Астрофизический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 520–526.

21 Ильина, О. В. Оптико-электронные системы позиционирования сборочных конструкций в авиастроении : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ильина Ольга Владимировна. – Казань, 2013. – 24 с. – Текст : непосредственный.

22 Информационное руководство CESSNA 172S SKYHAWK SP. – 353 с. – Текст : непосредственный.

23 Катастрофа Boeing 747 над Тайваньским проливом. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Катастрофа_Boeing_747_над_Тайваньским_проливом#Расследование. – Текст : электронный.

24 Катастрофа Boeing 747 под Токио. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Катастрофа_Boeing_747_под_Токио#Расследование. – Текст : электронный.

25 Комкова, М. А. Разработка методов и средств измерений лазерными системами в авиационном сборочном производстве : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.5.13 / Комкова Мария Андреевна. – Казань, 2024. – 143 с. – Текст : непосредственный.

26 Костеша, В. А. BIM и информационные модели автомобильных дорог / В. А. Костеша, И. К. Колесникова. – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов V Национальной научно-практической конференции, 24–26 ноября 2021 г., Новосибирск. В 3 ч. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. Ч. 2. – С. 79–82. – DOI 10.22764/2687-041X-2022-2-79-82.

27 Костеша, В. А. Применение геоинформационных технологий при мониторинге полосы отвода автомобильных дорог / В. А. Костеша, И. К. Колесникова. – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов IV Национальной научно-практической конференции, 17–19 ноября 2020 г., Новосибирск. В 3 ч. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Ч. 2. – С. 142–149. – DOI 10.33764/2687-041X-2021-2-142-149.

28 Костеша, В. А. Применение лазерного сканера Trimble TX8 для построения 3D-модели объекта культурного наследия / В. А. Костеша, О. А. Марычева, И. К. Колесникова. – Текст : непосредственный // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2021. – №2. – DOI 10.33920/se1-04-2102-11.

29 Кузин, А. А. Геодезическое обеспечение выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа с применением лазерных трекеров / А. А. Кузин, В. В. Петров, А. А. Пештиев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 22–32.

30 Лабораторный практикум (методические указания к лабораторным работам) / Сост. В. И. Халиулин. – Казань : КНИТУ-КАИ, 2014. – 84 с. – Текст : непосредственный.

31 Лазерный трекер в монтаже сборочных ступеней. – URL: <https://3dcontrol.ru/articles/lazernyj-treker-v-montazhe-sborochnyh-stapelej>. – Текст : электронный.

32 Лебедев, А. В. Совершенствование проектирования технологической оснастки с использованием информационных технологий / А. В. Лебедев, М. В. Гришин. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 1-5. – С. 1456–1462.

33 Мантыкова, М. В. Влияние габаритов сборочного приспособления на компенсационный зазор / М. В. Мантыкова, Н. К. Елаева. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. – 2019. – № 3 (24). – С. 30–34.

34 Маслов, Н. А. Установка инерциальных систем навигации с применением высокоточных систем лазерного трекинга / Н. А. Маслов, А. Р. Гисметулин. – Текст : непосредственный // Вестник науки. – 2021. – № 3 (1 (34)). – С. 143–150.

35 Мельник, А. М. Современные технологии, позволяющие повысить эффективность фрезерной обработки сотовых панелей / А. М. Мельник, В. В. Двирный. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения. – 2018. – С. 143–145.

36 Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве / В. Д. Большаков, И. Ю. Васютинский, Е. Б. Ключин, Н. Н. Лебедев, В. Е. Новак, М. Е. Пискунов, Г. Е. Рязанцев, Х. К. Ямбаев. – Москва : Недра, 1976. – 335 с. – Текст : непосредственный.

37 Мустафин, М. Г. Оценка смещений пунктов свободной геодезической сети при повторных наблюдениях с незакрепленных точек / М. Г. Мустафин, Г. Е. Васильев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 38–48.

38 Наука сегодня: фундаментальные и прикладные исследования : материалы Международной научно-практической конференции, г. Вологда, 27 сентября 2017 г. : в 2 частях. Часть 2. – Вологда : ООО «Маркер», 2017. – 128 с. – Текст : непосредственный.

39 Нивелировка самолета. – URL: <https://3dcontrol.ru/articles/nivelirovka-samoleta>. – Текст : электронный.

40 О выборе местоположения станций лазерного трекера для установки технологического оборудования / Л. Е. Сердаков, П. П. Мурзинцев, Д. Б. Буренков, А. В. Полянский. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2019. – № 11. – С. 22–25. – DOI 10.22389/0016-7126-2019-953-11-22-25.

41 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.

42 Однокурцев, К. А. Лабораторное техническое оснащение для автоматизированного управления элементами сборочной оснастки / К. А. Однокурцев. – Текст : непосредственный // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 12 (59). – С. 41–47.

43 Определение кинематических параметров макетов космических аппаратов проекта «Луна-Глоб» при проведении бросковых испытаний с применением систем лазерных координатно-измерительных / В. В. Петров, С. А. Заширинский, П. В. Ключев, Г. Б. Бузик, Ю. В. Зуев. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения. – 2017. – № 21-1. – С. 351–353.

44 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.

45 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.

46 Палкин, П. О. Определение высотных отметок контрольных точек корпуса самолета с использованием роботизированных высокоточных тахеометров / П. О. Палкин. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов (XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых, 15–21 мая 2022 г.) – 2022. – С. 111–112.

47 Палкин, П. О. Применение геодезических методов для размерного контроля при проведении работ в авиастроительной 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.

48 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.

49 Петров, В. В. Применение лазерного трекера для контроля положения клиньев статора крупных гидрогенераторов / В. В. Петров, В. О. Медяников, Е. В. Краев. – Текст : непосредственный // Гидротехника. – 2012. – № 5. – С. 58–63.

50 Петров, В. В. Применение прецизионного электронного тахеометра для исследования взаимного расположения валов и механизмов бумагоделательных машин / В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. 2001. – Т. 146. – С. 168–171.

51 Пимшин, Ю. И. Анализ геодезических методов контроля геометрических параметров технологического оборудования / Ю. И. Пимшин, Г. А. Науменко, Д. М. Арсеньев. – Текст : электронный / Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4 (часть 2). – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2742>.

52 Потюхляев, В. Г., Худяков Г. И. Рекомендации о содержании и периодичности геодезического контроля цеховых подкрановых путей электромостовых кранов / В. Г. Потюхляев, Г. И. Худяков. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 27–32.

53 Прикладная геодезия. Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, в. Г. Конусов. – Москва : Недра, 1981. – Текст : непосредственный.

54 Применение автоматизированных геодезических приборов при монтаже технологического оборудования / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, А. М. Андосова, О. А. Сладкевич. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 31–37.

55 Происшествие с Boeing 737 над Кахулуи. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Происшествие_с_Boeing_737_над_Кахулуи#Расследование. – Текст : электронный.

56 Промышленные изменения. – URL: <https://promzamer.com/docs/aviapromishlennost-PI.pdf>. – Текст : электронный.

57 Рабочая программа дисциплины «Проектирование и технология монтажа сборочных приспособлений». – Комсомольск-на-Амуре, 2015. – 14 с. – Текст : непосредственный.

58 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. 145–53. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-45-53.

59 Регулировка положения и ориентации рефлекторов спутника связи в процессе производства, с применением гексапода под контролем лазерного трекера /

В. В. Петров, А. В. Юсов, С. А. Козлов, Е. А. Устинова, Г. Б. Бузик, Ю. В. Зуев. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения. – 2017. – № 21-1. – С. 160–161.

60 Руководство по центровке и загрузке самолетов гражданской авиации СССР. – Москва : Воздушный транспорт, 1983. – 249 с. – Текст : непосредственный.

61 Савельев, А. А. Расчётные исследования обтекания мотогондол гражданских самолётов с учётом ламинарно-турбулентного перехода и методика автоматизированного проектирования их формы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.07.01 / Савельев Андрей Александрович. – Жуковский, 2019. – 118 с. – Текст : непосредственный.

62 Самохвалов, В. В. Особенности базирования деталей по сборочным отверстиям / В. В. Самохвалов, В. М. Чернов. – Текст : непосредственный // Вестник ВГТУ. – 2011. – № 11-2. – С. 54–57.

63 Сердаков, Л. Е. Создание 3D-модели участка перепускного канала бустер-нуклотрон на основе данных геодезических измерений / Л. Е. Сердаков. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 63–65.

64 Скрипников, В. А. Исследование влияния турбулентности на погрешность визирования для автоматизированного тахеометра / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 217–222.

65 Современные тенденции и направления в развитии геодезии: прогноз на ближайшие пять-семь лет / А. П. Карпик, И. А. Мусихин, Ф. Швигер, О. В. Горобцова. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2016. – № 10. – С. 2–11. – DOI 10.22389/0016-7126-2016-916-10-2-11.

66 Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – Москва : Аграф-пресс, 2006. – 304 с. – Текст : непосредственный.

67 Солдатов, К. Е. Современные методы изготовления и монтажа сборочной оснастки / К. Е. Солдатов. – URL: http://elib.osu.ru/bitstream/123456789/2303/1/elibrary_28976849_61855142.pdf. – Текст : непосредственный.

68 Тайгин, В. Б. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов / В. Б. Тайгин, А. В. Лопатин. – Текст : непосредственный // Космические аппараты и технологии. – 2019. – № 4 (30). – С. 200–208.

69 Терешонков, В. А. Анализ стоимости использования лазерного трекера в сборке агрегата планера воздушного судна по сравнению с традиционными методами сборки с использованием и без использования КМ / В. А. Терешонков, Д. А. Прокопенко. – Текст : непосредственный // Вестник УГАТСУ. – 2021. – Т. 25, № 3 (93). – С. 80–88.

70 Технология сборки летательных аппаратов : методические документы, разработанные образовательной организацией для обеспечения образовательного процесса. – Махачкала : ДГТУ, 2015. – 179 с. – Текст : непосредственный.

71 Технология сборки самолетов : методические указания по проведению практических занятий. Часть 3 / Сост. И. М. Колганов, П. Б. Томов. – Ульяновск : УлГТУ, 1999. – 55 с. – Текст : непосредственный.

72 Хорошилов, В. С. О развитии в геодезии идеи выбора понижающих коэффициентов для обоснования точности геодезических измерений / В. С. Хорошилов. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 44–47.

73 Чевелева, А. О. Исследование влияния технологической наследственности на формирование методики выполнения измерения на координатно-измерительной машине при выявлении неплоскостности деталей авиастроения / А. О. Чевелева, М. А. Болотов. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (Национального исследовательского университета). – 2012. – № 5-2 (36). – С. 118–124.

74 Шапошников, С. Н. Контроль геометрических параметров посадочных мест высокой точности для чувствительных элементов системы управления движением космического аппарата / С. Н. Шапошников, О. С. Ефремкин. – Текст : непосред-

ственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – № 20 (4-1). – С. 55–60.

75 Шапошников, С. Н. Разработка конструкции малого космического аппарата с учётом применения лазерных систем измерений / С. Н. Шапошников. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 138–144.

76 Шоломицкий, А. А., Геодезический мониторинг большепролетных сооружений с пространственной металлической конструкцией / А. А. Шоломицкий, Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ – 2020. – Т. 25, № 3 – С. 117–126. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-117-126.

77 Энциклопедия Минобороны РФ. – URL: <https://энциклопедия.минобороны.рф/encyclopedia/dictionary/>. – Текст : электронный.

78 Юстировочно-метрологический комплекс для регулировки положения и ориентации антенн при сборке космических аппаратов / М. А. Филина, Н. Ю. Костикова, В. В. Петров, Г. Б. Бузык, Ю. В. Зуев, А. В. Юсов, С. А. Козлов, Е. А. Устинова. – Текст : непосредственный // Космическая техника и технологии. – 2019. – № 3 (26). – С. 48–56.

79 3D Measurement Simulation and Relative Pointing Error Verification of the Telescope Mount Assembly Subsystem for the Large Synoptic Survey Telescope / U. Mutilba, G. Kortaberria, F. Egaña, JA. Yagüe-Fabra. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2018. – № 18(9). – P. 3023.

80 A New Survey Adjustment Method for Laser Tracker Relocation / An Wan, Jing Xu, Zonghua Zhang, Ken Chen. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics. – 2015. – P. 2383–2388.

81 A Proposed Interim Check for Field Testing a Laser Tracker's 3-D Length Measurement Capability Using a Calibrated Scale Bar as a Reference Artifact / V. D. Lee, C. Blackburn, B. Muralikrishnan, D. Sawyer. – URL: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8016>. – Текст : электронный.

82 Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends / R. H. Schmitt, M. Peterek, E. Morse, W. Knapp, M. Galetto, F. Hartig, G. Goch, B. Hughes, A. Forbes, W. T. Estler. – Текст : электронный // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2016. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002>.

83 An Accurate Point-Based Rigid Registration Method for Laser Tracker Relocation / An Wan, Jing Xu, Dongjing Miao, Ken Chen. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. – 2017. – Vol. 66, № 2. – P. 254–262.

84 Analysis of the initial thermal stabilization and air turbulences effects on Laser Tracker measurements / P. P. Muñoz, J. A. A. García, J. S. Mazo. – Текст : непосредственный // Journal of Manufacturing Systems. – 2016. – Vol. 41. – P. 277–286.

85 Angular error calibration of laser tracker system / J. Ouyang, W. Liu, Y. Yan, D. Sun. – Текст : непосредственный // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2006. – P. 63442U–63442U.

86 Antonopoulos, A. Fixation by Hidden Points Bar from One Theodolite / A. Antonopoulos. – Текст : электронный // Journal of Surveying Engineering. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2005\)131:4\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2005)131:4(113)).

87 Application of laser tracker in the industrial measurement field / C. Hu, S. Luo, W. Li, D. Cai, J. Li. – Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series – Vol. 1820. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1820/1/012119>.

88 Assessing Sustainability in the Shipbuilding Supply Chain 4.0: A Systematic Review / M. Ramirez-Peña, F. J. Abad Fraga, J. Salguero, M. Batista. – Текст : непосредственный // Sustainability. – 2020. – Vol. 12(16). – P. 6373.

89 Automatic Astronomical Survey Method Based on Video Measurement Robot / Chunlin Shi, Chao Zhang, Lan Du, Jiansheng Li, Kai Ye, Wei Zhang, Changyuan Chen, Chonghui Li, Li Ma, Huihui Lin, Kefeng Mi. – Текст : электронный // Journal of Surveying Engineering. – 2020. – Vol 146, № 2. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29SU.1943-5428.0000300>.

90 Aviation safety Network. – URL: <https://asn.flightsafety.org/asndb/322033>. – Текст : электронный.

91 Brown, J. V-STARS/S Acceptance Test Results / J. Brown. – URL: <https://gancell.com/papers/S%20Acceptance%20Test%20Results%20-%20imperial%20version.pdf>. – Текст : электронный.

92 Brunner, F. On the methodology of Engineering Geodesy / F. Brunner. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Geodesy. – 2007. – Vol. 1. – P. 57–62.

93 Brunson Instrument Company. Low Thermal Expansion Scale Bar. – URL: <https://www.brunson.us>. – Текст : электронный.

94 Caprace, J.-D. A real-time assessment of the ship design complexity / J.-D. Caprace, P. Rigo. – Текст : непосредственный // *Comput. Aided Des.* – 2012. – Vol. 44. – P. 203–208.

95 Configuration Analysis of the ERS Points in Large-Volume Metrology System / Zhangjun Jin, Cijun Yu, Jiangxiong Li and Yinglin Ke. – Текст : непосредственный // *Sensors.* – 2015. – Vol. 15. – P. 24397–24408.

96 Configuration Optimisation of Laser Tracker Location on Verification Process / S. Aguado, P. Pérez, J. A. Albajez, J. Santolaria, J. Velázquez. – Текст : электронный // *Materials.* – 2020. – Vol. 13(2):331. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma13020331>.

97 Deboni, J. E. Portable Metrology and Dimensional Control in Integrated Shipbuilding Assembly Process / J. E Deboni, Z. Rogers, I. Juricic. – Текст : электронный // *Conference: 14th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries.* – URL: https://www.researchgate.net/publication/278963544_Portable_Metrology_and_Dimensional_Control_in_Integrated_Shipbuilding_Assembly_Process.

98 Detection of Track Static Regularities Based on a Laser Tracker / Lianbi Yao, Haili Sun, Xuan Wang, Yueyin Zhou. – Текст : электронный // *Journal of Surveying Engineering.* – 2017. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29SU.1943-5428.0000209>.

99 Determination of misalignment and angular scale errors of a laser tracker using a new geometric model and a multi-target network approach / A. Lewis, B. Hughes, A. Forbes, W. Sun, D. Veal, K. Nasr. – Текст : электронный // *MacroScale.* – 2011. – URL: https://www.researchgate.net/publication/267569481_Determination_of_misalignment_and_angular_scale_errors_of_a_laser_tracker_using_a_new_geometric_model_and_a_multi-target_network_approach.

100 Development of a vision based deflection measurement system and its accuracy assessment / J. Sładek, K. Ostrowska, P. Kohut, K. Holak, A. Gąska, T. Uhl. – Текст : непосредственный // *Measurement.* – 2013. – Vol. 46, Iss. 3. – P. 1237–1249.

101 Doukas, I. D. Industrial Metrology (and 3D Metrology) vs. Geodetic Metrology (and Engineering Geodesy). Common ground and topics / I. D. Doukas. – Текст : непосредственный // *Living with GIS.* – P. 148–163.

102 Effects of Low Temperatures in the Line of Sight of Digital Levels / J. Gučević, S. Miljković, S. Delčev, V. Ogrizović. – Текст : электронный // Journal of Surveying Engineering. – 2017. – Vol. 143, No. 2. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29SU.1943-5428.0000210>.

103 Engineering survey planning for the alignment of a particle accelerator: part II. Design of a reference network and measurement strategy / Rodrigo Junqueira Leão, Christian Raffaello Baldo, Maria Luisa Collucci da Costa Reis, Jorge Luiz Alves Trabanco. – Текст : электронный // IOP Science. – 2018. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aa9dc3>.

104 Error Correction for the Tracking Mirror / Yonggang Yan, Jianfei Ouyang, Wanli Liu, Xiaoling Deng, Xiaobo Wang. – Текст : непосредственный // International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. – 2008. – P. 1048–1051.

105 Error mapping of large CMMs by sequential multi-lateration using a laser tracker / K. Wendt, H. Schwenke, F. Wäldele, M. Krawczyk, K. Kniel. – Текст : электронный // Proc. of 2nd euspen International Conference. – 2001. – URL: https://www.researchgate.net/publication/237473933_Error_mapping_of_large_CMMs_by_sequential_multi-lateration_using_a_laser_tracker.

106 Estimation of uncertainty in three-dimensional coordinate measurement by comparison with calibrated points / J. Muelaner, Z. Wang, O. Martin, J. Jamshidi, P. Maropoulos. – Текст : непосредственный // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21. – P. 025106.

107 Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system / K. Umetsu, R. Furutani, S. Osawa, T. Takatsuji, T. Kurosawa. – Текст : непосредственный // Measurement Science and Technology. – Measurement Science and Technology. – 2005. – Vol. 16, No. 12. – P. 2466.

108 Geometric Error Analysis for Spherical Mounted Retroreflector in Laser Tracker / Y. Yonggang, W. Zhankui, H. Junjie, Z. Mingjun. – Текст : непосредственный // Geometric Error Analysis for Spherical Mounted Retroreflector in Laser Tracker. – 2010. – P. 391–394.

109 Haitjema, H. Calibration of Displacement Laser Interferometer Systems for Industrial Metrology / H. Haitjema. – Текст : электронный // Sensors. – 2019. – Vol. 19(19):4100. – URL: <https://doi.org/10.3390/s19194100>.

110 Identification and Kinematic Calculation of Laser Tracker Errors / J. Conte, J. Santolaria, A. C. Majarena, A. Brau, J. J. Aguilar. – Текст : непосредственный // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 63. – P. 379–387.

111 Key digital enterprise technology methods for large volume metrology and assembly integration / P. G. Maropoulos, D. Zhang, P. Chapman, D. G. Bramall & B. C. Rogers. – Текст : непосредственный // International Journal of Production Research. – 2007. – Vol. 45:7. – P. 1539–1559.

112 Kovalevich, M. Calculation of accuracy with the coordinate-positional method of basing / M. Kovalevich, T. Neypert, P. Davydov. – Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2131/3/032005>.

113 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>.

114 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>.

115 Kyle, S. Automated part positioning with the laser tracker / S. Kyle, R. Loser, D. Warren. – Текст : электронный // Fifth International Workshop on Accelerator Alignment. – 1997. – URL: https://www.researchgate.net/publication/257061818_Automated_part_positioning_with_the_laser_tracker.

116 Large volume metrology process models: A framework for integrating measurement with assembly planning / P. G. Maropoulos, Y. Guo, J. Jamshidi, B. Cai. – Текст : непосредственный // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57. – P. 477–480.

117 Large-scale accelerator alignment using an inclinometer / T. Kume, M. Satoh, T. Suwada, K. Furukawa, E. Okuyama. – Текст : электронный // Precision Engineering. – 2013. – Vol. 37, Iss. 4. – P. 825–830.

118 Large-Scale Dimensional Metrology (LSDM): from Tapes and Theodolites to Multi-Sensor Systems / F. Franceschini, M. Galetto, D. Maisano, L. Mastrogiacomo. –

Текст : непосредственный // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2014. – Vol. 15. – P. 1739–1758.

119 Large-Scale Metrology – An Update / W. T. Estler, K. L. Edmundson, G. N. Peggs, D. H. Parker. – Текст : непосредственный // CIRP Annals. – 2002. – Vol. 51, Iss. 2. – P. 587–609.

120 Laser tracker error determination using a network measurement / B. Hughes, A. Forbes, A. Lewis, W. Sun, D. Veal, K. Nasr. – Текст : непосредственный // Measurement Science and Technology. – 2011. – Vol. 22. – P. 045103.

121 Lee, V. D. Improvised Long Test Lengths via Stitching Scale Bar Method: Interim Testing of Laser Trackers / V. D. Lee, D. Sawyer, B. Muralikrishnan. – Текст : электронный // J Res Natl Inst Stan. – 2020. – Vol. 125. – URL: <https://doi.org/10.6028/jres.125.016>.

122 Liu, Wan Li. New Method for Large-Scale Dimensional Metrology Using Laser Tracker System / Wan Li Liu, Zhan Kui Wang. – Текст : непосредственный // Advanced Materials Research. – 2010. – Vol. 97–101. – P. 4247–4250.

123 Matos, E. Model for determination of three-dimensional coordinates of hidden points / E. Matos, A. Siguel, P. Luis Faggion. – Текст : непосредственный // Boletim de Ciências Geodésicas. – 2017. – Vol. 23. – P. 182–195.

124 Method for Accuracy Assessment of the Length Measurement Unit of Laser Tracking Systems / M. Gruza, A. Gąska, J. A. Sładek, S. M. Stojadinovic, V. D. Majstorovic, P. Gąska, W. Harmatys. – Текст : электронный // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11(19):9335. – URL: <https://doi.org/10.3390/app11199335>.

125 Morse, E. Dynamic testing of laser trackers / E. Morse, V. Welty. – Текст : непосредственный // CIRP Annals. – 2015. – Vol. 64, Iss. 1. – P. 475–478.

126 Muelaner, J. Large scale metrology in aerospace assembly / J. Muelaner, P. Maropoulos. – Текст : электронный // Proceedings of DET2008 5th International Conference on Digital Enterprise Technology. – 2008. – URL: https://www.researchgate.net/publication/266607542_LARGE_SCALE_METROLOGY_IN_AEROSPACE_ASSEMBLY.

127 Muralikrishnan, B. Laser Trackers for Large Scale Dimensional Metrology: A Review / Muralikrishnan, Bala & Phillips, Steve & Sawyer, Daniel // Precision Engineering. – 2015. – Vol. 44. – P. 13–28.

128 New boresighting method of the aircraft gun using a laser tracker / Qing Wang, Peng Huang, Jiangxiong Li, Yinglin Ke. – Текст : непосредственный // *Sensor Review*. – Vol. 35, Iss. 3. – P. 251–262.

129 Patent No. US 8,947,678 B2. Method for correcting three-dimensional measurements of a spherically mounted retroreflector. – Текст : непосредственный.

130 Proof-of-concept study of the virtual optical scale bar by the pulse-to-pulse interferometry / Yang Liu, Jianshuang Li, Jiafu Li, Xu Liang, Yue Shang, Qiang Zhou, Mingzhao He, Dongjing Miao, and Jigui Zhu. – Текст: непосредственный // *Opt. Express* 30. – 2022. – P. 2063–2077.

131 Saadat, M. Dimensional variations during Airbus wing assembly / M. Saadat, C. Cretin. – Текст : непосредственный // *Assembly Automation*. – 2002. – Vol. 22, Iss. 3. – P. 270–276.

132 Saleh, B. Study of temperature effect on behavior of structures / B. Saleh, P. A. Blum. – Текст : непосредственный // *J. Surv. Eng.* – 1990. – Vol. 116. – P. 1–12.

133 Sandwith, S. C. Real-time 5-Micron Uncertainty with Laser Tracking Interferometer Systems using Weighted Trilateration / S. C. Sandwith, R. Predmore. – Текст : электронный // *SPIE*. – 2001. – URL: <https://www.kinematics.com/images/TrilaterationPaperR1.pdf>.

134 Sandwith, S. Thermal Stability of Laser Tracking Interferometer Calibration / S. Sandwith. – Текст : непосредственный // *SPIE Conference on Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection V*. – 1999. – P. 93–103.

135 Savio, E. Metrology of freeform shaped parts / E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt. – Текст : непосредственный // *CIRP Annals*. – 2007. – Vol. 56, Iss. 2. – P. 810–835.

136 Scott, P. F. A rapid method for measuring the figure of a radio telescope reflector / P. F. Scott, M. Ryle. – Текст : непосредственный // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1977. – Vol. 178. – P. 539–545.

137 Spatial Analyzer Instruments Manual. 2022 – Текст : непосредственный.

138 Teskey, W. F. Hidden Point Bar Method for High-Precision Industrial Surveys / W. F. Teskey, B. Paul, W. J. Teskey. – Текст : непосредственный // *J. Surv. Eng.* – 2005. – Vol. 131. – P. 103–106.

139 Teskey, W. F. Hidden Point Bar Method for Precise Heighting / W. F. Teskey, R. J. Fox, D. H. Adler. – Текст : электронный // *Journal of Surveying Engineering*. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:4\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:4(179)).

140 The relationship between the measurement error and the arrangement of laser trackers in laser trilateration / Toshiyuki Takatsuji, Mitsuo Goto, Atsushi Kirita, Tomizo Kurosawa, Yoshihisa Tanimura. – Текст : непосредственный // Measurement Science and Technology. – 2000. – Vol. 11. – 477–483.

141 The use of geodetic techniques in stability monitoring of floating structures / V. Zacharis, S. Dimitrellou, K. Politis, G. Livanos, V. Pagounis, O. Arabatzi, M. Tsakiri. – Текст : электронный // Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15–17 May 2019, Athens, Greece. – URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/2019/04_JISDM2019/78.pdf.

142 Thermal Deformation Compensation of Laser Tracker Relocating in Aircraft Assembly / Jin, Z., Ke, C., Xiong, R. et al. – Текст : непосредственный // Int. J. Precis. Eng. Manuf. – 2020. – Vol. 21. – P. 641–647.